

Recommandations pour la conception, le suivi de réalisation et l'exploitation des dispositifs de protection par merlons pare-blocs



Guide technique

Recommandations pour la conception, le suivi de réalisation et l'exploitation des dispositifs de protection par merlons pare-blocs

Ont participé à la rédaction de ce guide :

- Stéphane LAMBERT (INRAE)
- Lucas MEIGNAN (Géolithe)
- Jean Philippe JARRIN (Géolithe)
- Yassine BENNANI (Terre Armée)
- Christine GACHET (Pyrite Ingénierie)
- Eloïse OLLIER (Alpes Ingé)

Groupe de relecture :

- Marion BOST (UGE)
- Marie-Aurélien CHANUT (Cerema)
- Pierre DUPIRE (ONF-RTM)
- Cédric Lambert (IMSRN)
- Marie MALASCRABES (Cerema)
- Jacques MARTIN (EGIS)
- Rémy MARTIN (ONF-RTM)
- Patrice MAURIN (Cerema)
- Didier VIRELY (Cerema)

Comment citer cet ouvrage :

Projet National C2ROP. *Recommandations pour la conception, le suivi de réalisation et l'exploitation des dispositifs de protection par merlons pare-blocs*

Bron : Cerema, 2020. Collection : Connaissances. ISBN : 978-2-37180-481-4

Sommaire

Avant-propos	5
Introduction	7
Chapitre 1 - Portée et domaine d'application des recommandations	8
Chapitre 2 - Synthèse bibliographique	9
2.1. Contrôle de la trajectoire du bloc	9
2.1.1. Hauteur	9
2.1.2. Inclinaison du talus amont du merlon	10
2.1.3. Commentaires généraux	10
2.2. Comportement sous impact	11
2.2.1. Etat des connaissances	11
2.2.2. Approches de dimensionnement	13
2.2.3. Normes et recommandations existantes	15
2.2.4. Exemples de dimensionnement	15
2.2.5. Critère d'efficacité	16
2.2.6. Commentaires généraux	16
Chapitre 3 - Conception des dispositifs de protection par merlon	17
3.1. Besoins du maître d'ouvrage	17
3.1.1. Phénomènes considérés	18
3.1.2. Protection des enjeux	18
3.1.3. Durée de service	18
3.1.4. Besoins d'exploitation	18
3.1.5. Besoins écologique, paysager et environnemental	19
3.2. Contraintes d'opération	19
3.2.1. Réglementation	19
3.2.2. Phénomènes naturels	20
3.2.3. Contraintes d'exploitation chantier	21
3.2.4. Maintenance	21
3.3. Principes généraux de conception	21
3.3.1. Principes de fonctionnement	21
3.3.2. Typologie	22
3.3.3. Choix de principe de solution	26
3.4. Conception et dimensionnement du dispositif	27
3.4.1. Principes	27
3.4.2. Données initiales	30
3.4.3. Tâches de conception et résultats intermédiaires	31
3.4.4. Tâches de dimensionnement	34
3.5. Préparation de l'opération de construction	38

Chapitre 4 - Construction	39
4.1. Dossier de Consultation des Entreprises et opérateur de construction	39
4.1.1. Dossier de Consultation des Entreprises	39
4.1.2. Opérateurs de construction	39
4.2. Reconnaissances et informations préalables	40
4.3. Etudes et suivi d'exécution, visa	41
4.4. Contrôles	41
4.4.1. Contrôles chantier	42
4.4.2. Contrôle réception	42
Chapitre 5 - Exploitation	43
5.1. La gestion des enjeux	43
5.2. La maintenance	43
Glossaire spécifique	45
Références bibliographiques	47

Avant-propos

Le projet national C2ROP Chutes de blocs, *Risques Rocheux et Ouvrages de Protection* (2015-2019) s'est proposé d'aborder de manière globale et concertée la problématique du risque rocheux depuis les processus de genèse (aléas), jusqu'aux stratégies de protection (parades, gestion du risque). A ce titre, ce projet a su rassembler la plupart des éléments de connaissance à ce jour disponibles dans le domaine du risque rocheux, puis développer et transférer vers le monde opérationnel des outils, méthodes et concepts nouveaux en s'appuyant sur l'ensemble des plateformes expérimentales, afin d'améliorer tant les produits que les bonnes pratiques à mettre en œuvre.

Ces dernières années, des avancées considérables ont été obtenues dans le domaine académique : mécanique appliquée aux géomatériaux et aux structures, modélisation numérique, investigation expérimentale en laboratoire ou *in-situ*, analyse de l'aléa et du risque. Elles ont trouvé au travers de ce projet un formidable champ d'application et une source d'inspiration et d'innovation. Les méthodes numériques modernes permettent désormais de modéliser de manière pertinente le comportement de structures complexes sous chargement dynamique. Les puissances de calcul auxquelles on peut accéder aujourd'hui rendent possible des simulations remarquablement fines, prenant en compte les mécanismes élémentaires fondamentaux, mais ouvrant sur des résultats pertinents pour l'ingénieur. Des installations sur site permettent d'explorer le comportement des ouvrages en vraie grandeur ; le site expérimental de Montagnole en Savoie pour les structures de protection en est une illustration parfaite. Cette connaissance et ces outils rassemblés par C2ROP sont le socle fondamental du processus de gestion du risque associé.

L'ancrage très fort du projet national auprès de l'ensemble de la communauté académique (universités, organismes publics de recherche) et opérationnelle (gestionnaires, maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, bureaux d'ingénierie, entreprises) a garanti son exigence et sa crédibilité. Sa capacité à supporter des actions de recherche a permis de lever les principaux verrous et de donner accès à des outils, méthodes, guides et référentiels techniques, attendus par toute la profession. Le présent document est l'un des 10 guides et recommandations produits par C2ROP autour des trois axes du projet :

Axe Aléas

- Glossaire du risque rocheux
- Caractérisation de l'aléa éboulement rocheux : Etat de l'art

Axe Parades

- Merlons pare-blocs : Recommandations pour la conception, le suivi de réalisation et la maintenance
- Les Ouvrages Déflecteurs : Guide technique
- Surveillance instrumentale pour la gestion du risque rocheux : Recommandations

Axe Risque

- Prise en compte des risques rocheux par les Maîtres d'Ouvrage gestionnaires d'infrastructures : Recommandations
- Cahier des charges type pour l'étude de l'aléa éboulement rocheux et la définition des travaux
- Cahier des charges type pour les travaux de protection contre les éboulements rocheux
- Mémento des ouvrages de protection contre les éboulements rocheux : Maintenance et Coûts
- Aide à la formalisation de retours d'expérience à la suite d'un événement rocheux sur infrastructures de transport : Note méthodologique

Cette production technique conséquente et aboutie est le reflet de près de 5 années de travail collaboratif des 45 partenaires du projet. Qu'ils soient ici tous chaleureusement remerciés pour leurs multiples efforts engagés et leur dynamisme. Il ne fait aucun doute que la communauté du risque rocheux saura exploiter avec intérêt cette production technique.

Le Comité de Pilotage du Projet National C2ROP

Alors que plusieurs centaines de dispositifs de protection par merlon ont été construits en France depuis le milieu du XX^e siècle, ce document propose les premières recommandations pour leur conception, leur dimensionnement, leur réalisation et leur exploitation.

Elles sont issues du retour d'expérience des membres du collectif de rédaction. Elles devront être améliorées pour ce qui concerne notamment l'utilisation des données issues des simulations trajectographiques, le détail du dimensionnement sous sollicitation dynamique (définition et quantification des actions, combinaisons d'actions, coefficients de sécurité, etc.), et les opérations de réparation et de réhabilitation. Un élargissement des retours d'expérience permettra de partager d'autres pistes de préconisations et recommandations.

Un complément et une évolution de ces recommandations sont prévus dans le cadre de C2ROP 2 pour aboutir à un guide technique.

Participants au projet C2ROP



Introduction

Les dispositifs de protection par merlon* sont des ouvrages de protection passive contre l'aléa éboulement rocheux. Ils sont constitués d'un merlon et d'une fosse* (Figure 1). Les merlons sont des structures massives en élévation par rapport au terrain naturel, le plus souvent constituées de matériaux de remblai renforcés* ou non. Ils sont implantés à l'amont des enjeux à protéger et permettent d'intercepter et d'arrêter ou dévier des masses rocheuses dévalant la pente, en un ou une succession d'évènements.

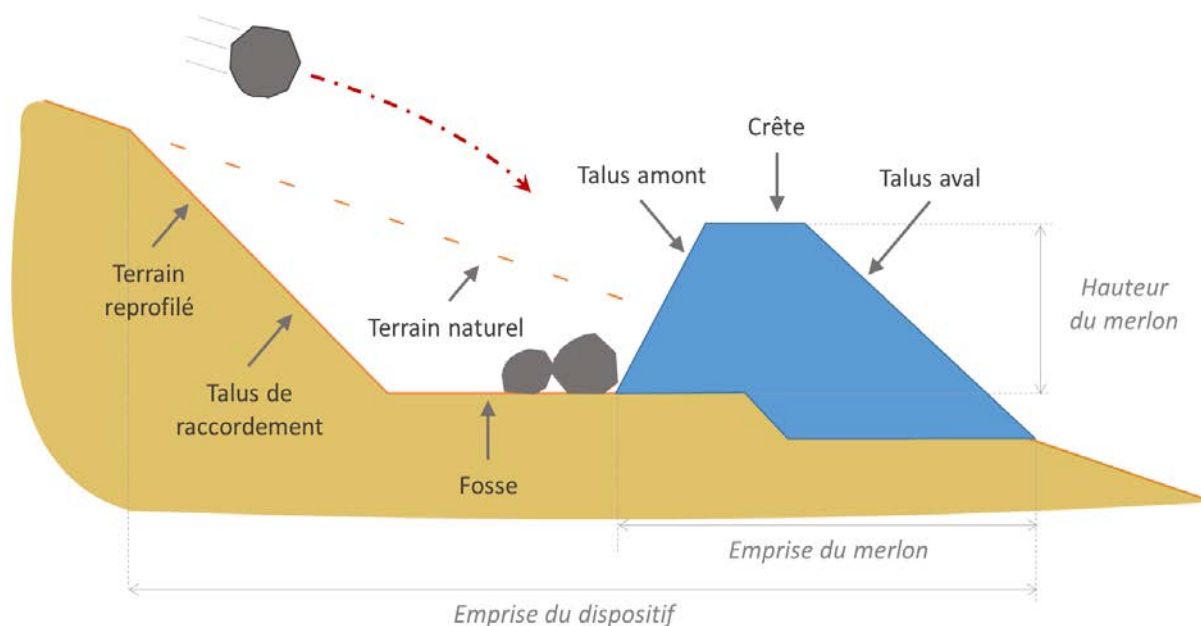


Figure 1 : Croquis type de dispositif de protection par merlon pare-blocs.
Voir le glossaire en page 54 pour les définitions de ces termes (Source : Stéphane LAMBERT - INRAE)

Les dispositifs de protection par merlon sont susceptibles d'intercepter des blocs rocheux développant des énergies allant de quelques kilojoules à plusieurs dizaines de mégajoules. Cette capacité peut dépasser celle des filets pare-blocs et dépend de la technologie employée et des dimensions du dispositif.

Les merlons peuvent être endommagés et leur fosse remplie à l'occasion d'éboulements. Pour conserver leur rôle protecteur, les dispositifs de protection par merlon doivent alors être réparés, réhabilités et leur fosse régulièrement entretenue.

Ces dispositifs sont potentiellement exposés à d'autres phénomènes naturels tels que crue torrentielle, avalanche, glissement superficiel et séisme. Ces phénomènes ne doivent altérer ni l'efficacité ni la durabilité du dispositif.

La conception, l'aménagement, les travaux et l'exploitation doivent être compatibles avec les règlements qui s'appliquent au site considéré.

Chapitre 1 - Portée et domaine d'application des recommandations

Le présent document a pour objet de proposer des recommandations pour la conception, le dimensionnement, la réalisation et l'exploitation de dispositifs de protection par merlon.

Sont concernés par ces recommandations les dispositifs destinés à la protection contre des phénomènes caractérisés par des volumes rocheux au départ compris entre une dizaine de litres et plusieurs milliers de mètres cubes.

Lorsque la fonction de protection assignée au dispositif concerne également des aléas d'autre nature (avalanche, crue torrentielle, etc.), les présentes recommandations doivent être adaptées.

Ces recommandations sont destinées à l'ensemble des opérateurs concernés par ces ouvrages:

- Maîtres d'ouvrages (MOA)
- Exploitants
- Concepteurs
- Maîtres d'œuvres (MOE)
- Bureaux d'Études
- Entreprises de Travaux
- etc.

Ces recommandations proposent à ces opérateurs une démarche de conception et de dimensionnement qui se veut tout à la fois générique et souple dans son application. Les phases de construction et de maintenance sont également abordées.

Ces recommandations abordent des phases de conception, de réalisation et de maintenance communes à différents types d'ouvrages, à commencer par les parades actives et passives contre l'aléa éboulement rocheux, avant d'aborder les spécificités relatives aux dispositifs de protection par merlon. Les phases communes à d'autres types de parades sont rappelées pour mémoire, sans intention de substitution à d'autres documents. Pour ces phases, on recherchera la cohérence avec les démarches retenues pour les autres types de parades, notamment si celles-ci ont été formalisées (ex : filets).

L'avant-propos fournit des indications complémentaires quant au contenu et aux limites de ces recommandations.

Les termes utilisés dans ce document sont en cohérence avec le glossaire du risque rocheux de C2ROP. En complément, un glossaire donne la définition de certains termes spécifiques (page 53). Les termes définis dans ce dernier sont indiqués par une astérisque, à leur première apparition dans le texte.

Chapitre 2 - Synthèse bibliographique

La conception des dispositifs de protection par merlons se distingue de celui des autres ouvrages de génie civil en particulier par deux volets concernant, d'une part, le contrôle de la trajectoire des blocs et, d'autre part, la résistance à l'impact. Ces deux points sont abordés par la suite en s'appuyant sur la littérature scientifique ainsi que sur la documentation technique disponible sous forme d'articles, de rapports ou de recommandations. Un état des connaissances plus détaillé est disponible par ailleurs (Durville et al., 2010 ; Lambert et Bourrier, 2013 ; Lambert et Kister, 2017). On trouvera en particulier dans le document édité par l'OFEV (Lambert et Kister, 2017) une analyse critique des méthodes de dimensionnement proposées à ce jour.

2.1. Contrôle de la trajectoire du bloc

Ce volet géométrique de la conception vise à vérifier que le dispositif constitué du merlon et de la fosse est en mesure de contrôler la trajectoire du bloc rocheux compte tenu de ses dimensions et forme. La littérature scientifique est assez pauvre sur cette question : aucune étude ne l'a abordée en détail en considérant l'influence des différents paramètres (largeur de fosse, inclinaison du talus amont* du merlon, cinématique du bloc, etc.). A ce jour, quelques recommandations ont été éditées (Calvino et al., 2001; UNI, 2012; ONR, 2013). Les critères abordés concernent principalement la hauteur du merlon* et l'inclinaison de son talus amont. La principale donnée utilisée pour ce dimensionnement est la hauteur de passage* du bloc, issue de simulations trajectographiques.

2.1.1. Hauteur

La hauteur du merlon est ici définie comme la distance entre le pied et le sommet du talus amont du merlon, mesurée suivant la verticale (Figure 2). D'autres définitions existent et prennent pour référence la cote du terrain naturel à l'aplomb du sommet du talus ou considèrent la longueur du talus entre pied et sommet.

La hauteur du merlon est généralement la somme de la hauteur d'impact* et d'une revanche*. La hauteur d'impact est généralement déterminée à partir de résultats de simulations des trajectoires des blocs. On note que la hauteur d'impact est également considérée pour le dimensionnement du merlon vis-à-vis de l'impact.

Les normes italiennes et autrichiennes (UNI, 2012; ONR, 2013) proposent de retenir pour hauteur d'impact le percentile à 95 % des hauteurs de passage du bloc considéré, sur la base de simulations probabilistes des trajectoires. En outre, la norme autrichienne propose d'appliquer à cette valeur de percentile un coefficient de sécurité variant de 1,05 à 1,3 en fonction des effets sur le merlon et des enjeux protégés.

Les recommandations actuelles concernant la revanche proposent de retenir un multiple du rayon du bloc (ou de la sphère équivalente). Le rapport varie entre 1 et 4 en fonction de la situation (Tableau 1). On notera que la revanche considérée en Autriche est mesurée suivant le rampant, depuis le point haut du bloc. Les autres recommandations ne précisent rien quant à l'axe de mesure ni quant au point du bloc pris en référence.

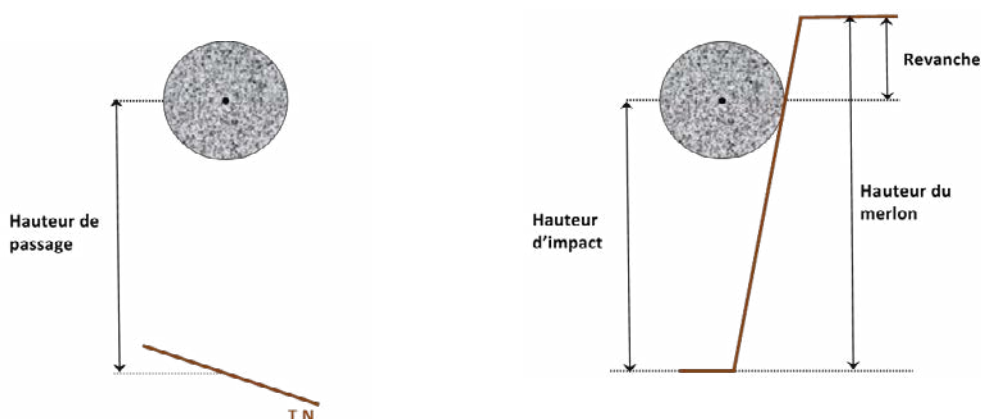


Figure 2 : Hauteur de passage du bloc, hauteur du merlon, hauteur d'impact et revanche : définitions retenues dans ce document (voir également le glossaire) (Source : Stéphane LAMBERT - INRAE)

Pays (réf.)	Hauteur de revanche recommandée (min)	Contexte
France (Calvino et al., 2001)	Rayon du bloc*1	Rayon du plus gros bloc attendu
Italie (UNI, 2012)	Rayon du bloc*1	
Autriche ⁱ (ONR, 2013)	Rayon du bloc*2	Merlon non renforcé, avec parement en enrochement d'inclinaison > 50°
	Rayon du bloc*2	Merlon renforcé, avec talus amont d'inclinaison > 70°
	Rayon du bloc*3	Merlon renforcé, avec talus amont d'inclinaison < 70°
	Rayon du bloc*4	Autres merlons (sol compacté)

Tableau 1 : Recommandations pour la valeur minimale de la hauteur de la revanche, dans différents pays

2.1.2. Inclinaison du talus amont du merlon

Le talus amont* du merlon, exposé à l'impact, doit être suffisamment incliné pour limiter l'effet tremplin, en particulier pour les blocs ayant une vitesse de rotation élevée avant impact, roulant ou chutant. Une inclinaison minimale de 65° par rapport à l'horizontale a été proposée en France (Calvino et al., 2001), mais des valeurs plus élevées sont parfois évoquées dans la littérature. La norme autrichienne recommande un talus fortement incliné, et ajuste la hauteur de la revanche en conséquence (cf. Tableau 1).

2.1.3. Commentaires généraux

La revanche permet d'assurer le contrôle de la trajectoire du bloc considéré. En effet, les impacts trop proches de la crête peuvent conduire à une importante déformation du talus amont du merlon, laquelle peut, en fonction de l'inclinaison de la trajectoire incidente du bloc, favoriser le franchissement du merlon par le bloc. Il est donc impératif de tenir compte d'une revanche.

Dans la pratique, l'exigence relative à l'inclinaison du talus amont n'est parfois appliquée que sur la moitié inférieure du talus amont, partie principalement concernée par les blocs roulants. Ceci conduit à des parements amont présentant deux inclinaisons différentes suivant le rampant (cf. § 4.3.2.1.).

Les recommandations actuelles, de même que la pratique courante, s'appuient uniquement sur la hauteur de passage du bloc et l'inclinaison du talus amont. Ni l'inclinaison de la trajectoire du bloc, ni la vitesse de rotation du bloc ne sont considérées, bien que certains travaux suggèrent leur influence sur la capacité du bloc à franchir le merlon, notamment quand l'inclinaison du talus amont est faible ou que le bloc impacte le merlon à proximité de sa crête* (Plassiard et Donzé, 2009 ; Kister, 2015).

On notera par ailleurs que la simulation des trajectoires de blocs au voisinage du merlon, lorsque celui-ci est implanté dans le modèle numérique de terrain, est confrontée aux limites des outils actuels, avec une incidence potentielle sur l'estimation des probabilités de franchissement du merlon. Ces limites sont liées aux modèles de rebond implémentés dans les codes et à la résolution spatiale des modèles numériques de terrain 3D utilisés pour les études trajectographiques à l'échelle du versant (Lambert et al., 2013). Ces limites sont moins pénalisantes pour la simulation des trajectoires avant l'atteinte du merlon, et tout particulièrement avec des modèles 2D.

2.2. Comportement sous impact

L'interception du bloc rocheux par le merlon se traduit par l'application d'un chargement relativement localisé sur son talus amont, sur une durée courte. Cette action dynamique d'impact se traduit par une onde de contrainte se propageant dans toutes les directions au sein de l'ouvrage.

2.2.1. Etat des connaissances

De nombreux travaux expérimentaux se sont intéressés à la réponse des merlons sous sollicitations d'impact localisé, par des essais grandeur réelle ou réduite. Ces derniers ont un intérêt principalement qualitatif, contrairement aux essais en conditions réelles dont l'intérêt est également quantitatif. Ils rendent compte de la réponse réelle des merlons sous impact. Les principales données relatives à des essais sur merlons mobilisant des énergies supérieures à 800 kJ sont présentées en Tableau 2. La limite de 800 kJ a été retenue car elle constitue le seuil en-dessous duquel les merlons étudiés ont présenté des déformations très faibles. Ces données concernent des ouvrages très différents et parfois singuliers par leur constitution et leurs dimensions (Figure 3), limitant les possibilités d'extrapolation des résultats à d'autres ouvrages. En particulier, les données concernant des ouvrages en remblai* non renforcé sont très limitées.

Réf.	Structure			Impact			Déplacement / horizontale	
	Type	Haut. (m)	Larg. (crête/base) (m)	Masse bloc (kg)	Energie cinétique (kJ)	Haut. impact (m)	À l'amont (m)	À l'aval (m)
A1	Remblai renforcé + bois	3,05	1,8/1,8	5 300	1 010	1,5	0,6	0,2
A2		3,05	1,8/1,8	8 300	1 400	1,4	0,9	0,7
A3		3,05	1,8/1,8	5 580	770			0,17
A4		3,7	2,4/2,4	6 900	952			0,11
A5		3,7	2,4/2,4	8 400	1 410			0,34
B1	Renforcé	4,2	0,9/5	5 000	2 500	3	0,6	0,23
B2		4,2	0,9/5	8 780	4 350		1	0,9
B3	Non renforcé	4,2	0,9/6	8 780	4 350	3	1,5	Effondré
C1	GeoRockwall	4	3,3/5,3	3 300	970	2	0,22	0
C2		4	3,3/5,3	7 700	2 000	2-3		0,09
C3		4	3,3/5,3	17 000	2 700	3-4		0,5
D1	Remblai renforcé + géo cellules	4,2	2,2/4,3	10 100	1 243	2,31	1,56	0,266
D2		4,2	3/5,1	17 100	1 567	2,85	1,44	0,091
D3		4,2	2,2/4,3	5 200	786	0,7	0,82	0,03
D4		4,2	2,2/4,3	17 100	2 037	2,55	1,73	0,239
E1	Parement gabion + remblai	3	4,5/9	6 500	1 040	2,1	0,42	0
E2		3	4,5/9	6 500	2 200	2,1	0,71	0
F1	Mur gabions, 3 couches	4	3/3	6 500	2 200	2,5	1,4	0,9
F2		4	3/3	6 500	2 200	1,7	0,9	0,7
G	Parement minéral sur 2 faces + remblai renforcé	3	3,4/3,4	2 700	800	1,8	0,40	0,1

Tableau 2 : Principales données expérimentales sur ouvrages grandeur réelle (énergie > 800 kJ)
 (Sources par lettre référence : A - Hearn et al., 1996 ; B - Peila et al., 2002, 2007 ; C - Yoshida et al., 1999 ; D - Maegawa et al., 2011 ; E - Lambert et al., 2014 ; F - Heymann, 2012 ; G - Joffrin et al., 2016.)

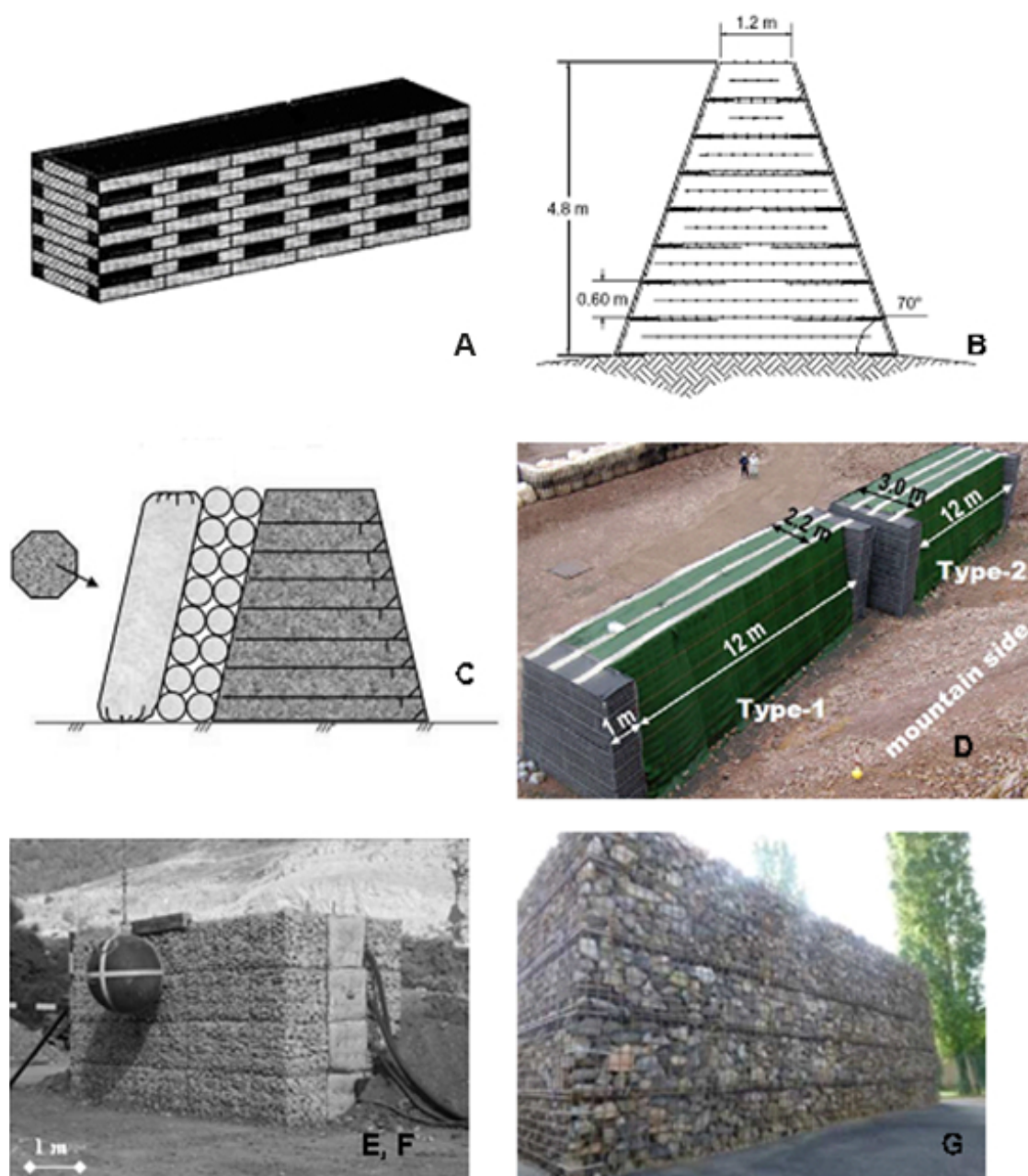


Figure 3 : Ouvrages en vraie grandeur soumis aux expérimentations d'impact mentionnées en Tableau 2 (voir ce dernier pour le descriptif des ouvrages et la source des illustrations, en fonction de leur lettre référence : A - Hearn et al., 1996 ; B - Peila et al., 2002, 2007 ; C - Yoshida et al., 1999 ; D - Maegawa et al., 2011 ; E - Lambert et al., 2014 ; F - Heymann, 2012 ; G - Joffrin et al., 2016.)

2.2.2. Approches de dimensionnement

Différentes approches ont été proposées et utilisées pour vérifier la capacité des merlons à résister à l'impact. Elles diffèrent par leur complexité et leur aptitude à prendre en compte le caractère dynamique de la sollicitation. Certaines sont détaillées dans la littérature scientifique et technique, d'autres ont été observées sur des cas concrets construits depuis les années 50. Les approches retenues peuvent être classées suivant la typologie indicative suivante (adaptée de Lambert et Bourrier, 2013).

2.2.2.1. Typologie de dimensionnement

Type 1

Ce type concerne des ouvrages pour lesquels il n'y a pas eu de vérification par le calcul de la stabilité sous impact. Le merlon a été défini par sa géométrie, principalement par sa hauteur et en tenant compte de mesures prescriptives simples, relatives à la mise en œuvre des matériaux et à la stabilité du remblai. Compte tenu de cette géométrie, et du fait de sa masse, le merlon est réputé capable de résister à l'impact, à dire d'expert.

Type 2

Le dimensionnement consiste à vérifier que la pénétration du bloc reste inférieure à une fraction de la largeur du merlon. La pénétration peut être obtenue à partir d'une expression analytique issue de la littérature. Un rapport de trois entre la pénétration et la largeur au droit de l'impact est considéré suffisant pour assurer la stabilité du merlon post-impact. Un rapport de 5 assure que les déformations à l'aval sont très limitées (Wyllie, 2014). Un rapport de 2 entre la pénétration et la largeur en crête est recommandé pour assurer que la masse au-dessus du point d'impact confère au merlon une résistance suffisante à l'impact (Wyllie, 2014). Ce dernier point rejoint l'idée que l'impact doit demeurer à une distance suffisante de la crête du merlon (cf. commentaire sur la revanche en 3.1.1).

Type 3

Le dimensionnement est mené en statique, en considérant un équivalent pseudo-statique à l'action dynamique résultant de l'impact. La force correspondante est estimée d'après une expression analytique issue de la littérature. Une surface d'application de cette force est définie. La stabilité du merlon soumis à ce chargement pseudo-statique, combiné aux actions de gravité, est vérifiée en utilisant les méthodes et outils classiques de géotechnique.

Type 4

Le dimensionnement s'appuie sur l'évaluation de la capacité du merlon à dissiper l'énergie d'impact, par différents mécanismes. Dans ce but, un volume de merlon mobilisé lors de l'impact est défini. Le premier mécanisme dissipateur d'énergie considéré est le frottement mobilisé lors du déplacement en bloc rigide de ce volume. L'énergie dissipée lors du compactage du matériau contenu dans ce volume peut également être prise en compte. Le merlon est dimensionné de telle sorte que le déplacement requis pour dissiper toute l'énergie du bloc soit acceptable, au regard du risque d'effondrement post-impact d'une partie du merlon. Certaines approches considèrent comme donnée d'entrée l'énergie cinétique du bloc et d'autres la force d'impact, obtenue par une expression analytique.

Type 5

Le merlon est dimensionné par des simulations numériques en dynamique, par des méthodes aux différences finies, aux éléments finis ou discrets (MDF, MEF ou MED).

Cette typologie distingue les approches selon leur principe de base. Elle ne constitue pas une classification stricte dans la mesure où certaines approches peuvent être interprétées comme relevant de deux types d'approche différents.

2.2.2.2. Commentaires sur ces approches

Le type 1 renvoie principalement aux ouvrages anciens, construits en l'absence de méthode de dimensionnement spécifique à ces ouvrages et avant la généralisation du recours aux outils de simulation trajectographique. A part quelques exemples d'ouvrages de dimensions importantes, le type 1 concerne une grande partie des merlons érigés jusque dans le milieu des années 90, notamment ceux destinés à intercepter des blocs ayant une énergie cinétique modérée (typiquement inférieure à 2000 kJ).

Les approches de type 2 à 4 supposent généralement de déterminer la pénétration du bloc ou, alternativement, la force d'impact à partir de la vitesse du bloc et de sa masse, ou de données qui leur sont assimilables. Les expressions analytiques fournies par la littérature peuvent être utilisées à cette fin (voir Lambert et Kister, 2017 pour une présentation de ces différentes expressions). Cependant, une grande dispersion des résultats a été observée, avec un rapport de 4 entre les valeurs de force d'impact estimées par ces différentes méthodes pour un même cas d'étude (Kister et Fontana, 2011). Ceci résulte de la très grande diversité des conditions dans lesquelles ces expressions ont été obtenues, se distinguant très nettement du cas de l'impact d'un bloc rocheux sur un merlon.

Les approches de type 5 sont confrontées aux difficultés liées à la disponibilité de modèles de comportement appropriés pour les matériaux, à la calibration des paramètres, pour une sollicitation dynamique, et à la validation des modèles par comparaison avec des essais grandeur réelle. Également, se pose la question de la capacité de la méthode et de l'outil employés à correctement modéliser les grandes déformations et les grands déplacements résultant de l'impact par les blocs.

Dans ce contexte, la comparaison des résultats numériques avec des données issues d'expérimentations en grandeur réelle constitue un élément de validation probant. On notera toutefois que l'utilisation d'un modèle numérique pour dimensionner un ouvrage est sujette à caution lorsque l'énergie est significativement plus grande que celle considérée pour la validation du modèle.

2.2.3. Normes et recommandations existantes

Le dimensionnement des merlons pour assurer leur bon comportement sous impact est abordé par les normes italiennes et autrichiennes (UNI, 2012 ; ONR, 2013).

La norme italienne précise que l'énergie du bloc à considérer est calculée d'après le percentile à 95 % de la distribution des vitesses du bloc, multiplié par deux coefficients de sécurité (ayant chacun pour valeurs 1,02 ou 1,1), et fonctions de la résolution du modèle numérique de terrain utilisé pour la simulation des trajectoires et de la façon dont sont déterminés les paramètres du modèle. La masse du bloc est celle issue de l'étude géologique, multipliée par un coefficient dépendant de la précision de la méthode utilisée pour quantifier cette masse (1,02 à 1,1). L'énergie finalement retenue pour le dimensionnement du merlon peut considérer un facteur de sécurité fonction des enjeux protégés (1 à 1,2). En dernier lieu, cette norme suggère de comparer la pénétration du bloc à la largeur du merlon, sans plus d'indication sur la méthode à considérer (approche type 2).

La norme autrichienne s'appuie sur une approche de type 3. La force équivalente est déterminée d'après l'énergie cinétique du bloc, en estimant la pénétration du bloc et la durée de l'impact. L'impact est considéré comme une action accidentelle, au sens de l'Eurocode, et le dimensionnement concerne uniquement l'état limite ultime. Le volume du bloc est calculé d'après la distribution de volume des blocs au départ et dépend de la fréquence des événements : des percentiles de 95 à 98 % sont considérés pour des événements rares à très fréquents. La vitesse d'impact retenue est le percentile à 99 % et permet de calculer l'énergie d'impact considérée pour le dimensionnement en tenant compte d'un coefficient de sécurité défini en fonction de classes de conséquences (1 à 1,15). Le dimensionnement s'appuie sur une énergie d'impact relative (adimensionnelle), faisant intervenir des paramètres relatifs aux blocs et d'autres relatifs au volume de merlon mobilisé. Cette énergie permet, par le biais d'un abaque issu d'expérimentations à échelle réduite, de déterminer la profondeur de pénétration du bloc en fonction du type de merlon (renforcé ou non, avec enrochement ou non). La force d'impact en est déduite. Elle est ensuite combinée aux forces de gravité pour vérifier la stabilité du merlon.

Mis à part ces documents normatifs, la seule méthode complète présentée dans la littérature technique est celle proposée par Wyllie (2014), relevant d'une approche de type 2.

2.2.4. Exemples de dimensionnement

La littérature technique propose quelques descriptions de merlons pare-blocs, dont certaines abordent le dimensionnement vis-à-vis de l'impact. Les trois exemples ci-dessous illustrent des cas d'application des méthodes mentionnées ci-avant pour des ouvrages construits.

- Merlon renforcé par géotextile avec talus amont et aval raidis par gabions en Colombie britannique, Canada (Simons et al., 2009). Dimensionnement par approche de type 2. Le merlon protège une route en pied de versant contre des blocs de 5m³ arrivant à une vitesse $v=30$ m/s. L'ouvrage présente une largeur en crête de 5,5 m, une hauteur maximale de 8 m et des talus inclinés de 80° par rapport à l'horizontale. La largeur minimale requise pour l'ouvrage a été définie en multipliant par 2 la pénétration maximale du bloc, estimée à 1,5 m. Ouvrage renforcé avec gabion en parement. En protection d'une route en pied de versant
- Merlon renforcé par géotextile avec talus amont et aval raidis à Val d'Isère, France (Lorentz et al., 2010). Dimensionnement par approche de type 5. L'ouvrage protège un bâtiment au pied d'un versant fortement incliné, contre des blocs de 10 m³ ayant une énergie cinétique de 10 MJ et passant à 4m de hauteur. L'ouvrage présente une hauteur de 6,5 m, une largeur en crête de 5 m et des talus amont et aval inclinés à 75° par rapport à l'horizontale. Son dimensionnement a été conduit par modélisation numérique aux éléments discrets. Ces simulations ont également fourni les efforts maximaux transmis à la fondation* lors de l'impact, nécessaires au dimensionnement de celle-ci, conduit par une approche pseudo-statique.
- Merlon renforcé par géogrille avec talus amont et aval raidis, dont celui à l'amont constitué de pneus, à La Grave (05) (Jarrin et Meignan, 2010). Dimensionnement par approche de type 5 d'un merlon devant protéger une route contre des blocs jusqu'à 15m³ et ayant une énergie cinétique de 11 MJ. L'ouvrage présente une largeur en crête de 6,5 m, une hauteur de 8 m et des talus amont et aval raidis à 70°. Il a été dimensionné avec le logiciel Flac3D, en considérant notamment pour critère le niveau d'endommagement, en complément du déplacement maximum du talus à l'aval (inférieur à 0,3 m).

2.2.5. Critère d'efficacité

Sur la base des expérimentations grandeur réelle réalisées à ce jour et listées au Tableau 2, un critère d'efficacité empirique a été proposé (Lambert et Kister, 2018). Son domaine de validité est lié aux conditions expérimentales considérées et est principalement défini par une énergie cinétique inférieure à 4500 kJ, un impact à mi-hauteur du merlon et une hauteur d'ouvrage de 3 à 4 m. L'évaluation des merlons que permet ce critère s'appuie sur une comparaison entre les dimensions du merlon et l'énergie cinétique du bloc attendu. Selon ce critère, un merlon renforcé est loin de la ruine si l'énergie cinétique du bloc est inférieure à 250 fois l'aire de sa coupe suivant la verticale. Le seuil d'énergie cinétique est réduit de moitié dans le cas d'un merlon non renforcé. Au-delà du seuil, la stabilité du merlon peut être questionnée. Ce critère expéditif attire l'attention sur un éventuel sous-dimensionnement au regard des connaissances actuelles mais n'est pas proposé comme un outil de dimensionnement *stricto-sensu*.

2.2.6. Commentaires généraux

Les outils et méthodes visant au dimensionnement des dispositifs de protection par merlon n'ont cessé de progresser depuis les premières réalisations. L'apparition des outils de simulation trajectographiques, dans les années 80, et la généralisation de leur utilisation contribue à une meilleure caractérisation de l'action dynamique sur le merlon. Les méthodes visant à prendre en compte cette action dynamique sont apparues à partir de la fin des années 90 et ont été progressivement améliorées. Toutefois, ces méthodes s'avèrent lacunaires et sont difficilement généralisables aux différents types d'ouvrages et gammes d'énergie cinétique. Les méthodes reprenant les approches analytiques (type 2 à 4) telle que la norme italienne ou la méthode proposée par Willye (2014) héritent des limites de ces approches. La norme autrichienne souffre de quelques biais méthodologiques et scientifiques, dont le recours à des essais à échelle réduite sous gravité (Lambert et Kister, 2017). Les outils de modélisation numérique requièrent de fortes compétences et leur fiabilité est liée aux points ci-avant évoqués.

Chapitre 3 - Conception des dispositifs de protection par merlon

Préambule

En première partie de ce chapitre figurent des points qui peuvent être communs aux différents types de parades pare-blocs. C'est le cas notamment des besoins du MOA. Ce chapitre décline les principes génériques dès lors que le choix de recourir à un dispositif de protection par merlon a été fait. Le choix par rapport à d'autres types de parades n'est pas abordé, mais peut s'appuyer sur les éléments développés ci-après (et en particulier au § 4.3).

Afin d'aboutir à une conception répondant en tous points aux besoins du maître d'ouvrage (MOA) et aux contraintes d'opération, la phase de conception doit faire l'objet d'une structuration et d'une organisation adaptés aux spécificités des opérations.

La phase de conception est généralement structurée ainsi :

1. Définition des besoins, de l'organisation de l'opération, avec éventuellement recherche de financements et mobilisation des compétences d'un assistant à la maîtrise d'ouvrage expérimenté dans ce type d'opération.
2. Etablissement d'un programme de maîtrise d'œuvre synthétisant les besoins principaux du MOA et une organisation des éléments de mission de maîtrise d'œuvre permettant la maturation progressive de l'opération et les possibilités d'adaptation aux incertitudes relatives à la structuration de l'opération.
3. Choix du maître d'œuvre (MOE) et de l'équipe de conception, complète, cohérente et expérimentée.
4. Conception des campagnes de reconnaissances et de collecte d'informations de toutes natures.
5. Réalisation des reconnaissances.
6. Réalisation des différentes phases de conception successives.

Les besoins du maître d'ouvrage (MOA) et les contraintes d'opération sont développés par la suite, de façon séparées, tout en soulignant que certains points peuvent relever à la fois des besoins et des contraintes.

3.1. Besoins du maître d'ouvrage

Les besoins du MOA sont établis sur la base de critères d'efficacité socio-économique et d'acceptabilité sociétale.

Le MOA doit définir les besoins de protection et les exigences fixant les objectifs à atteindre pour une opération. Ces besoins doivent prendre en compte les phases de conception, d'exécution et d'exploitation de l'ouvrage.

Les items de définition des besoins, peuvent être :

- phénomènes considérés ;
- protection des enjeux ;
- calendrier d'opération ;
- durée de service* ;
- emprise* disponible ;
- exploitation, incluant maintenance et réparation ;
- insertion paysagère et environnementale.

Ces besoins guideront la définition de la stratégie de protection et la conception des parades.

Les besoins pourront être établis soit par le MOA compétent, soit avec un assistant du MOA ou un MOE.

Les besoins sont établis soit préalablement à l'intervention du MOE soit au cours des phases de conception en concertation avec celui-ci.

3.1.1. Phénomènes considérés

Le MOA doit définir les phénomènes d'éboulements rocheux considérés, soit un seul type de phénomène, soit plusieurs phénomènes éventuellement combinés. Ce sont les scénarios de référence, qui peuvent être définis par un volume, un point de départ, etc.

Des phénomènes connexes peuvent être pris en compte, qu'ils soient naturels (avalanches, crues torrentielles, chutes d'arbres, etc.) ou anthropiques (débardages, etc.).

3.1.2. Protection des enjeux

Le MOA doit définir les besoins en termes de protection des enjeux existants ou futurs (caractéristiques, localisations, etc.).

Le niveau de protection à atteindre peut être exprimé en termes de risque ou d'aléa au niveau des enjeux.

Les conditions dans lesquelles le niveau de protection est projeté, doivent être définies de façon détaillée. Par exemple : acceptation du fonctionnement en configurations combinées ou dégradées (comblement partiel de la fosse, combinaison de phénomènes naturels, etc.).

La définition des besoins de protection doit considérer la protection :

- lors des événements ;
- postérieurement aux événements (en termes de capacités résiduelles) ;
- et lors des phases de remise en état.

L'endommagement acceptable du merlon lors d'une sollicitation, ou de plusieurs sollicitations simultanées ou successives, doit être considéré et pris en compte lors de la définition des besoins de protection des enjeux, en tenant compte des personnels intervenant lors des opérations de maintenance.

Il est primordial de définir le niveau de protection attendu au regard des scénarios de référence et en tenant compte des enjeux notamment.

Dans le cas où le besoin de protection n'est pas compatible avec le calendrier de l'opération relative au dispositif de protection par merlon, il peut être nécessaire d'envisager des dispositions de réduction temporaire et partielle du risque. Ces dispositions ne sont pas traitées dans ce document.

3.1.3. Durée de service

Le MOA doit définir la durée de service du dispositif, définie comme étant la durée pendant laquelle le dispositif, régulièrement maintenu, assure le niveau de protection attendu pour les scénarios de référence. Des durées d'utilisation de 25, 50 ou 100 ans sont généralement considérées, mais des durées plus courtes peuvent aussi être retenues pour des protections temporaires. La durée de service doit être le fruit d'une discussion avec l'équipe de conception.

3.1.4. Besoins d'exploitation

Le MOA doit définir les conditions d'exploitation de l'ouvrage.

L'exploitation d'un dispositif de protection par merlon comporte :

- la maintenance de l'ouvrage, soit l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie de l'ouvrage, destinées à maintenir ou à rétablir le niveau de protection ;
- la gestion des enjeux sur la durée de service de l'ouvrage.

La gestion des enjeux consiste à se doter des moyens éventuellement nécessaires à l'optimisation de la maintenance et du fonctionnement des enjeux avoisinants.

La gestion des enjeux doit être considérée dans deux configurations différentes :

- courante ;
- chantier, soit lors de la construction, soit lors de la maintenance (cf. § 4.2.3).

La gestion courante peut éventuellement intégrer :

- l'information des avoisinants concernant les mesures de prévention (fonctionnement courant et lors d'événement), notamment en ce qui concerne les enjeux humains permanents, les concessionnaires et les chantiers avoisinants ;
- les mesures de prévention (information d'un événement imminent, évacuation partielle et provisoire, gestion d'accès spécifique, de prévention d'actes de malveillance, etc.).

3.1.5. Besoins écologique, paysager et environnemental

Les merlons étant des ouvrages massifs pouvant former des écrans importants, les choix de conception peuvent avoir une forte incidence sur les résultats environnementaux, paysagers et écologiques de l'opération.

Le MOA doit définir les besoins d'insertion paysagère et environnementale ainsi que les dispositions écologiques de l'opération, complémentaires aux dispositions réglementaires et légales (cf. § 4.2.1). L'expression de ces besoins doit considérer les phases de chantier et d'exploitation, voire de fin de vie (cas des dispositifs ayant une durée de service courte).

Ces besoins complémentaires peuvent couvrir les items suivants :

- besoins environnementaux et paysagers (avec bilan à 3 ans) ;
- besoins écologiques (empreinte carbone, nature et origine des matériaux, localisation des ressources matériaux et humaines, etc.) ;
- création ou maintien de sentiers ;

Les principaux items concernés peuvent être :

- géométrie de l'ouvrage (intégration paysagère, etc.) ;
- aspects des talus aval et amont du merlon et du talus de raccordement à l'amont de la fosse (perception visuelle et intégration dans le paysage notamment) ;
- transparence hydraulique et/ou écologique ;
- espèces protégées ou rares (imposant des mesures de protection ou de compensation), création de corridors écologiques, etc..



Figure 4 : Merlon à parement minéral
(Source : S. Lambert, INRAE)



Figure 5 : Merlon végétalisé
(Source : S. Gominet, IRMA)

3.2. Contraintes d'opération

Les contraintes d'opération sont les facteurs complémentaires aux besoins du MOA susceptibles d'influer sur la conception, la réalisation et l'exploitation d'un dispositif de protection par merlon.

3.2.1. Réglementation

Les contraintes réglementaires et administratives à prendre en compte sont au moins les suivantes.

Les contraintes urbanistiques et foncières :

- document d'urbanisme et réglementation associée (Plan d'Occupation des Sols ou Plan Local d'Urbanisme) ;
- foncier, avec identification des propriétaires des parcelles concernées par l'opération et des servitudes éventuelles.

Les contraintes environnementales et paysagères concernent l'impact potentiel de l'opération sur l'environnement :

- la préservation d'espaces protégés, d'habitats, d'espèces protégées, végétales ou animales pouvant imposer des dispositions particulières telles que des adaptations de l'ouvrage, des dispositions spécifiques lors de la réalisation de travaux et/ou de mesures compensatoires ;
- la proximité de périmètres de protection de captage d'eau potable pouvant avoir des conséquences sur les matériaux utilisés et le chantier ;
- la modification des écoulements d'eau superficiels et souterrains (effet barrage du merlon, ré-infiltration, concentration, etc.), pouvant nécessiter l'établissement d'un Dossier Loi sur l'Eau (déclaration ou autorisation en fonction de la surface du bassin versant intercepté) ;
- le déboisement (dossier de défrichement, etc.) ;
- la qualité paysagère des lieux, pouvant nécessiter des adaptations géométriques et d'aspects du dispositif de protection par merlon ;
- la remise en état des lieux après les travaux, pouvant nécessiter des dispositions spécifiques (plantations, etc.) influant sur toutes les phases de l'opération.

Les contraintes liées à la présence de réseaux et ouvrages par l'information préalable auprès des concessionnaires et la prise en compte de l'incidence du projet sur ces réseaux.

Il convient de consulter les documents de la DREAL (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement), DDT (Direction Départementale des Territoires), ARS (Agence Régionale de Santé) et si besoin, se reporter au Code de l'Environnement (procédure d'études d'impact, procédure au titre de la Loi sur l'Eau, etc.).

Ces contraintes réglementaires, foncières et environnementales peuvent avoir des incidences fortes (plusieurs mois à plusieurs années) sur le calendrier de l'opération.

3.2.2. Phénomènes naturels

Les dispositifs de protection par merlon pare-blocs peuvent être exposés à d'autres phénomènes naturels que ceux ayant initié l'opération et qu'il y a lieu de considérer lors des phases de conception, de réalisation et d'exploitation :

- **Avalanche :**
 - le dispositif modifie la propagation de l'avalanche en l'arrêtant, la ralentissant, ou la déviant. Il y a lieu de vérifier que la construction d'un dispositif par merlon pare-blocs n'a pas d'incidence négative en termes de propagation d'avalanche, et en particulier sur le zonage de l'aléa,
 - le merlon peut être sollicité, endommagé ou détruit par une avalanche,
 - la fosse peut être comblée par l'avalanche, se traduisant par une réduction significative de l'efficacité d'interception et de stockage du dispositif ;
- **Venue d'eau :**
 - les venues d'eau superficielles ou souterraines doivent être gérées par diverses solutions de type transparence hydraulique ou captation et évacuation,
 - les écoulements torrentiels peuvent nécessiter un ouvrage traversant compatible avec la fonction de protection du dispositif ;
- **Incendie :**
 - les incendies, d'origine naturelle ou non, peuvent modifier les caractéristiques des matériaux constitutifs des merlons, notamment s'ils sont apparents, par l'accroissement de température induit ou par combustion (géotextile, pneu, etc.).
 - dans certains cas, les matériaux en ignition peuvent favoriser la propagation du feu à l'ensemble de l'ouvrage. Il convient de vérifier que le risque d'inflammation et de propagation du feu sont limités, et que les conséquences sur la stabilité du merlon sont maîtrisées. Également, le risque de pollution lié à la présence des résidus de combustion de ces matériaux doit être considéré (Hennebert et al., 2014) ;
- **Séisme :**
 - les séismes sont à prendre en compte pour le dimensionnement relatif à la stabilité hors impact, selon la réglementation et les normes en vigueur ;
- **Coulées de boue et glissement en masse :**
 - ces évènements peuvent notamment conduire au comblement, partiel à total, de la fosse.

3.2.3. Contraintes d'exploitation chantier

Les contraintes d'exploitation concernant les phases chantiers, en considérant la zone d'influence afférente et la présence des avoisinants, doivent être prises en compte pour au moins les items suivants :

- circulations sur les voies de communication et accès aux riverains,
- bruit et poussière,
- vibrations,
- accès aux parties d'ouvrage.

3.2.4. Maintenance

Globalement, les merlons pare-blocs sont peu sensibles au vieillissement et nécessitent peu de maintenance, notamment lorsqu'ils sont peu sollicités par des éboulements ou que l'environnement et le contexte ont été bien pris en compte. Néanmoins, les maintenances ordinaires et extraordinaires doivent être intégrées à la conception, pour ce qui concerne l'ouvrage et ses abords, notamment en termes de modalités de réalisation.

La conception doit au moins prendre en compte, pour la maintenance programmée :

- les dispositions pour la surveillance permanente relative à l'intégrité globale de l'ouvrage ;
- les dispositions pour les visites et inspections techniques périodiques, pouvant nécessiter des équipements et méthodes adaptés ;
- les dispositions pour les entretiens prévisibles et programmés, nécessitant une conception structurelle, des équipements et méthodes adaptés (moyens de curage de la fosse, moyens de débroussaillages y compris des talus, moyens de remplacement préventif de parties d'ouvrage, etc.) ;
- les dispositions pour la surveillance permanente relative aux systèmes de gestion des eaux.

La conception doit au moins prendre en compte, pour la maintenance suite à endommagement du fait d'un événement prévisible, quelle qu'en soit sa nature :

- la possibilité de réparation d'une partie d'ouvrage sans démontage excessif (réparabilité, modularité, etc.) ;
- les conditions matérielles d'accès et de levage en mode dégradé ;
- les conditions de sécurité des intervenants en mode dégradé.

3.3. Principes généraux de conception

3.3.1. Principes de fonctionnement

Les dispositifs de protection par merlons pare-blocs sont des obstacles placés sur la trajectoire des blocs rocheux, destinés à arrêter ou dévier ceux-ci, avant atteinte des enjeux. Les volumes rocheux ainsi immobilisés, s'accumulant progressivement ou par le fait d'un même événement, sont stockés par le dispositif, et peuvent être ensuite extraits et évacués en tant que de besoin.

Un dispositif de protection par merlon est conçu et dimensionné en considérant un ou plusieurs projectiles*, dont les caractéristiques dépendent des scénarios de référence et de leur propagation sur le versant. Pour remplir sa fonction, le dispositif doit présenter :

- une hauteur de merlon suffisante au regard de la hauteur de passage et de la taille du/des projectile(s) ;
- une géométrie de fosse et une pente de talus amont du merlon permettant d'intercepter les projectiles ;
- une conception permettant la dissipation de l'énergie des projectiles ;
- une géométrie conférant au dispositif un volume de stockage* supérieur ou égal au volume éboulé attendu, lors d'un événement ou d'une succession d'événements.

En termes structurels, le merlon est dimensionné de telle sorte qu'aucun élément de l'ouvrage ni élément provenant des projectiles n'atteigne les enjeux, lors de l'impact ou suite à celui-ci. Ceci implique notamment qu'une très grande partie de l'énergie transmise par le projectile à l'ouvrage y soit dissipée. Cette dissipation résulte du réarrangement des matériaux constitutifs du merlon, de la déformation de l'ouvrage et éventuellement de ruptures localisées. La partie d'ouvrage sollicitée lors de l'impact se développe depuis la surface impactée, dans la direction de l'impact et avec diffusion transversale.

La forme et l'extension de cette partie sont fonction de l'énergie cinétique du projectile, de la constitution de l'ouvrage et des caractéristiques mécaniques de ses matériaux constitutifs. Pour une technologie donnée, plus le volume sollicité est important, plus l'énergie qu'il peut dissiper est importante.

Par ailleurs, la fosse peut contribuer à améliorer l'efficacité de l'ouvrage en réduisant l'énergie cinétique du projectile avant qu'il n'atteigne le merlon, par une géométrie adaptée (ex. : largeur accrue) et / ou des caractéristiques mécaniques appropriées (matériau meuble).

3.3.2. Typologie

Les dispositifs de protection par merlon présentent une très grande diversité de formes, de dimensions, ainsi que de nature et agencement des matériaux constitutifs, comme illustré Figure 6.



Figure 6 : Illustration de la diversité des dispositifs de protection par merlon (Sources : Lambert et Bourrier, 2013)

3.3.2.1. Forme du merlon (cf. Figure 7)

Le profil de type A est le plus fréquent. Il se caractérise par un talus amont plus ou moins raidi et un talus aval* suivant la pente de stabilité du matériau de remblai.

Le profil de merlon de type B se caractérise par une partie inférieure du talus amont plus raide (au moins jusqu'à mi-hauteur). Ce cas correspond notamment au cas d'un parement amont en enrochement, surmonté d'une couche de remblai. Les impacts concernent essentiellement la partie basse du talus amont. Ce profil est adapté aux situations où les trajectoires des projectiles sont majoritairement rasantes, avec des blocs de gros volumes roulants à l'approche du merlon. Une attention particulière doit être portée à la vérification du non-franchissement du merlon par les projectiles.

Les ouvrages à talus amont et aval raidis, de type C, présentent généralement l'avantage d'une moindre emprise au sol mais sont plus complexes à réaliser et d'un coût plus important à la construction.

Le recours au profil D peut résulter d'une optimisation entre volume de déblai/remblai, et de stabilité sous poids propre. Ce profil suggère que la hauteur du merlon est considérée depuis le pied de la risberme et non depuis le pied du talus amont.

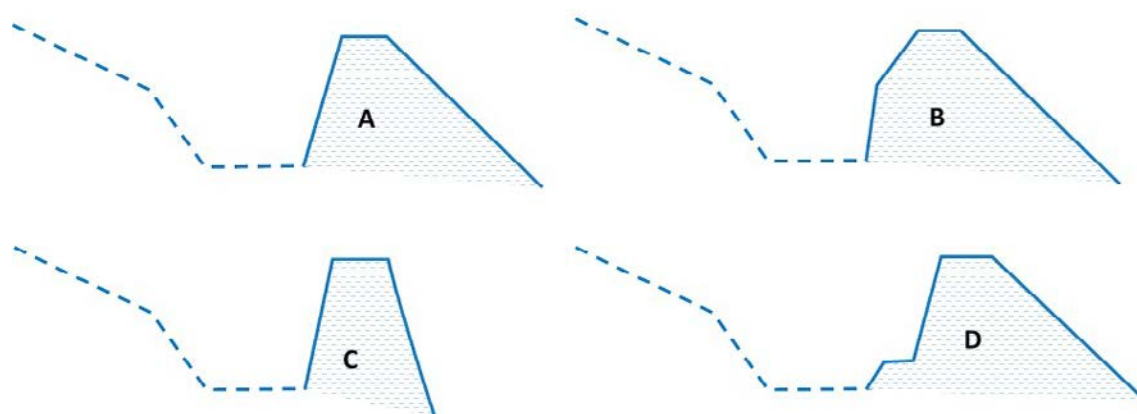


Figure 7 : Profils types des merlons (Source : Stéphane LAMBERT - INRAE)

3.3.2.2. Forme de la fosse et du talus de raccordement* (cf. Figure 8) :

La type de fosse α est de loin le plus fréquent. Il permet de stocker de grands volumes, résultant d'un seul évènement ou d'une succession d'évènements. Les caractéristiques dimensionnelles de la fosse peuvent également être déterminées dans le but de réduire l'énergie cinétique et la hauteur de passage des projectiles avant atteinte du merlon. Dans le même objectif, il est également possible de préférer des matériaux meubles pour le fond de fosse.

Le recours aux profils de fosse de type (β) et (γ) est beaucoup plus rare. Il est généralement motivé par des considérations relatives à la stabilité du talus de raccordement* et du versant à l'amont du dispositif (cas 4, sur la Figure 6). La fosse est uniquement constituée d'un talus de raccordement (pas de partie subhorizontale) pour le profil β . Il n'y a pas de fosse pour le profil γ , donc pas de reprofilage du terrain naturel (ni talus de raccordement, ni partie subhorizontale). Les profils (β) et (γ) impliquent l'apport de matériaux constitutifs pour la construction du merlon. Un autre inconvénient de ces profils est une complexification des opérations de maintenance, liée à la difficulté d'accès aux fins d'évacuation des matériaux éboulés.

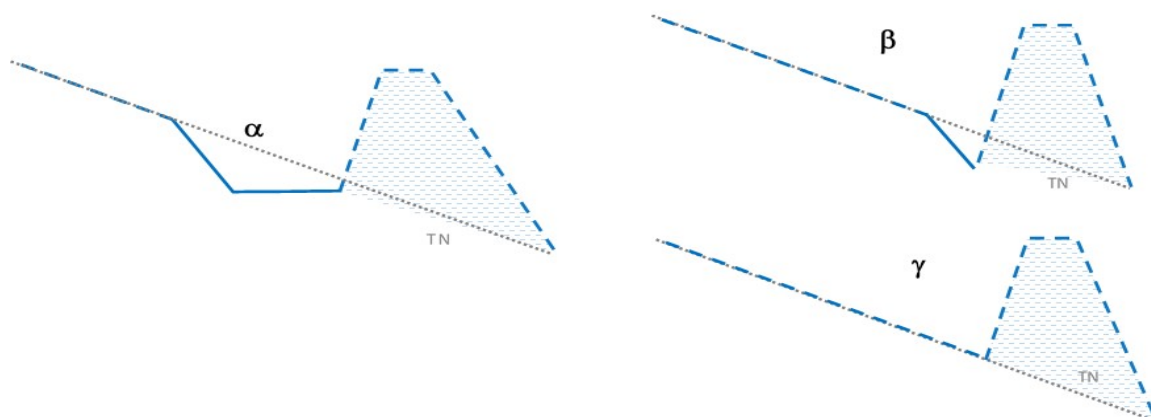


Figure 8 : Profils types de fosse (Source : Stéphane LAMBERT - INRAE)

3.3.2.3. Matériau(x) constitutif(s)

Les matériaux constitutifs du corps de merlon, hors renforts, sont soit naturels soit manufacturés. Ils peuvent être du remblai classique ou remblai technique* pouvant être issus des déblais du site, des enrochements, des gabions ou du béton.

L'utilisation des matériaux du site, avec recours à des méthodes de déblais/remblais, peut avoir pour objectif la limitation des mouvements de terre. Cela nécessite que les matériaux du site aient été qualifiés, en termes de granulométrie, argilosité, teneur en eau, de manière à vérifier la possibilité de réemploi et de préciser les conditions de mise en œuvre. Le stockage provisoire et les éventuelles opérations de criblage et de concassage peuvent créer des nuisances, des surcoûts supplémentaires et des contraintes réglementaires additionnelles.

Les éléments de renfort peuvent être de type inclusions souples ou de type rigide. Ces éléments peuvent être des géotextiles ou produits apparentés (géogrille), des pneus recyclés (poids lourds principalement), des structures métalliques, des éléments en bois, des ancrages, etc.

Les matériaux constitutifs des parements peuvent être des enrochements, remblai classique ou remblai technique, des gabions, des dallages en béton, des pneus ou du bois.

Les merlons peuvent également être constitués de modules*, fabriqués à partir d'une combinaison de matériaux constitutifs du corps du merlon, d'éléments de renfort et de matériaux constitutifs du parement. Une conception modulaire démontable permet une réduction des coûts de construction et une meilleure réparabilité des ouvrages.

Le recours à des enrochements en tant que parement(s) permet en général une mise en œuvre simple mais nécessite un opérateur expérimenté et suppose la présence de carrières à proximité pour limiter les coûts d'approvisionnement (Figure 9). Les enrochements doivent être suffisamment résistants au regard des efforts statiques, compacts et non gélifs (suivant NF EN 13383-1).

Le recours à des géotextiles ou produits apparentés permet d'augmenter l'inclinaison de talus amont et, le cas échéant, celle du talus aval, d'augmenter la hauteur du merlon et de le renforcer vis-à-vis de la sollicitation dynamique d'impact (Figure 10). Du fait de l'orientation subhorizontale de la sollicitation d'impact sur l'ouvrage, les géotextiles peuvent, selon leur type, constituer une surface de glissement préférentiel. Leur durabilité doit être évaluée en tenant compte de l'endommagement de la nappe de renforcement*, et de son exposition aux agents atmosphériques et chimiques, ainsi qu'au risque d'incendie. La granulométrie des matériaux de remblai utilisés doit être rendue compatible avec la nappe de renforcement.



Figure 9 : Merlons avec parement en enrochement. Sur la partie inférieure du talus amont et sur toute la hauteur du talus
(Sources : photo de gauche, ONF-RTM - photo de droite, S. Lambert)



Figure 10 : Merlon à parement raidi renforcé par grillage (gauche) et par géogrille (droite)
(Sources : photo de gauche, ONF-RTM - photo de droite, Géolithe)



Figure 11 : Merlons constitués de pneus usagés déflanqués. Liaisonnement entre pneus (gauche) et mise en œuvre au parement, combiné avec un remblai renforcé par géotextile (droite)
(Sources : photo de gauche, Géolithe - photo de droite, Alpes Ingé)

Les pneus peuvent être utilisés en parement et, également, dans le corps de merlon (procédés Pneusol et Pneutex). Ils permettent de réaliser un parement déformable avec un coût de réalisation modéré (Figure 11). Cette technique bénéficie d'un important retour d'expérience, pour sa mise en œuvre comme pour sa durabilité, avec de très nombreux merlons construits en France dont certains datent du début des années 90. L'utilisation peut être perçue positivement, car recyclant des déchets. Les points de vigilance sont la pollution des eaux à proximité de zones de captage ou de site sensible, ainsi que le risque incendie (cf. article Hennebert et al., 2014).

Le matériau bois peut être utilisé en parement ou en renforcement. Son utilisation est en revanche conditionnée par la durabilité du matériau utilisé et le risque incendie.

Les gabions permettent d'ériger des talus amont et aval verticaux, et facilitent la réparation du fait de leur modularité (Figure 12). Ils peuvent être préfabriqués, ce qui peut permettre de limiter le temps de construction de l'ouvrage. Ils peuvent également être montés in-situ, ce qui peut permettre d'utiliser des matériaux de remplissage issus du site. La durabilité des gabions est liée à la protection contre la corrosion de l'acier et aux conditions d'exposition. Du fait de l'emploi de grillage et de leur caractère modulaire, de tels merlons peuvent être réparés par pose d'une rustine en parement ou par remplacement des gabions éventrés, selon le niveau d'endommagement (Lambert et al., 2014).



Figure 12. Merlons en gabions à gauche et à parement minéral à droite
(Sources : photo de gauche, S. Lambert - photo de droite, Terre Armée)

Le recours à des parements techniques* en béton armé ou à des blocs en béton armé permet la construction de merlons à talus verticaux. L'utilisation d'armatures continues au sein du parement ou entre les blocs accroît la capacité du merlon. Le recours aux blocs en béton armé préfabriqués confère au merlon un caractère modulaire, permettant de limiter le temps de construction et augmentant la réparabilité.

3.3.3. Choix de principe de solution

Du fait de la très grande variété de solutions de dispositif de protection par merlon, en termes de profils de merlon et de fosse et de matériaux, le choix de la solution optimale, par le MOA, doit être guidé par une analyse multicritère proposée par l'équipe de conception.

Les principaux éléments de comparaison entre les différentes alternatives sont :

- capacité du dispositif en termes d'énergie de bloc à intercepter : Une dizaine de kilojoules à plusieurs dizaines de mégajoules ;
- capacité du merlon à intercepter la trajectoire des blocs : Hauteur de passage de 1 mètre à plus de 10 mètres ;
- capacité du dispositif à stocker les matériaux éboulés : 1 à plusieurs milliers de mètres cubes ;
- emprise au sol du dispositif* ;
- tolérance sur les déplacements du merlon lors de l'impact : Centimétriques à pluri métriques, en fonction de la proximité des enjeux, etc. ;
- fonctionnalité multi phénomènes (Eboulement, avalanche, crue torrentielle, glissement de terrain superficiel, chute d'arbre, etc.) ;
- adaptabilité à des configurations diverses (Proximité immédiate des enjeux à protéger, compatible avec réseaux souterrains ou aériens, ouvrages hydrauliques et de continuité écologique, etc.) ;
- Interaction avec structures avoisinantes (mur de soutènement, tunnel, etc.) ;
- temps d'exposition à l'aléa éboulement pendant la phase de construction des enjeux à protéger et des équipes de construction
- intégration paysagère et environnementale, empreinte écologique ;
- coût sur la durée de service de l'ouvrage ;
- réparabilité (Très simple et aisée pour les modules monolithiques à très complexe pour les ouvrages avec renforcements continus avec matériaux non confinés) ;
- entretien (très facile si possibilité d'accès avec engin mécanique depuis la voie à protéger à complexe pour les merlons sur versant nécessitant l'hélicoptage).

3.3.3.1. Analyse multicritère

Afin de proposer une analyse multicritère efficace pour guider le choix du MOA, il est nécessaire d'éliminer préalablement (critère discriminant) toutes les options et solutions ne permettant pas d'atteindre les objectifs techniques tels qu'ils résultent de la combinaison des besoins du MOA avec les contraintes d'opération.

Il est ensuite nécessaire de porter une attention particulière à la sélection des critères d'analyse spécifiques à l'opération et à leur pondération.

La valorisation simple des critères est réalisée spécifiquement au contexte de l'opération.

La valorisation de chaque solution peut être la somme des valeurs simples pondérées.

Cette méthode ne doit être perçue que comme une aide à la décision critique, permettant de bien prendre en compte l'importance relative des différents critères et des solutions et options.

3.3.3.2. Critères d'analyse

Les critères peuvent être distingués en deux catégories :

- les critères essentiels permettent d'évaluer les fonctions principales de protection ;
- les critères complémentaires permettent d'évaluer toutes les fonctions complémentaires nécessaires aux spécificités de l'opération ;

Les critères essentiels concernent, au moins :

- la géométrie de l'enveloppe du projet au regard de la configuration du site et de la stabilité du versant ;
- les phénomènes d'éboulement rocheux vis-à-vis desquels l'opération doit assurer la protection (scénarios de référence) ;
- les autres phénomènes naturels incidents ;
- l'ordre de grandeur des capacités d'interception au regard du niveau de protection attendu ;
- les budgets investissement et fonctionnement.

Les critères complémentaires peuvent concerner, par exemple :

- les besoins et contraintes en termes d'environnement, de paysage et d'écologie ;
- les principes constitutifs au regard des besoins de durabilité et maintenance.

3.4. Conception et dimensionnement du dispositif

3.4.1. Principes

Le principe de conception et de dimensionnement des dispositifs de protection par merlon est présenté selon un logigramme (Figure 13), détaillant les tâches à accomplir et les interactions entre celles-ci.

La conception est décomposée en 6 tâches, numérotées de I à VI par ordre chronologique. Le dimensionnement est décomposé en 3 tâches, numérotées de VII à IX. Ces 9 tâches sont détaillées par la suite.

Chacune des 3 tâches de dimensionnement peut conduire à des modifications de la conception générale, avec une possible influence sur les autres dimensionnements. De ce fait la démarche de conception et de dimensionnement peut être itérative et se déroule durant les différents éléments de mission du MOE (faisabilité, avant-projet, projet).

Les données initiales de la conception et du dimensionnement sont :

- les besoins initiaux du MOA ① (cf. § 4.1) ;
- les données issues des reconnaissances géologiques (zone de départ) ① (cf. § 4.1.1 et 4.4.2.2) ;
- la topographie ② ;
- les contraintes d'opération (foncières, paysagères, environnementales, autres phénomènes) ③ (cf. § 4.2) ;
- les données issues des reconnaissances géotechniques (zone d'implantation de l'ouvrage) ④ (cf. § 4.4.2.2) ;
- les résultats des simulations trajectographiques sur terrain naturel ⑤ (cf. § 4.4.2.3).

A partir de ces données initiales, les six tâches successives de conception sont menées, permettant d'aboutir à des résultats intermédiaires préalables aux tâches de dimensionnement.

Par comparaison avec les autres parades passives, les merlons se distinguent la plupart du temps par une importante modification du profil du terrain, laquelle se traduit par une modification des trajectoires des blocs rocheux à l'approche du lieu d'implantation prévu pour le merlon. En conséquence, les résultats des simulations trajectographiques sur terrain nu sont considérés au début de conception, pour définir les projectiles de pré-dimensionnement*, avant de considérer ceux sur terrain reprofilé dès lors qu'un profil a été défini pour le dispositif, pour définir les projectiles de dimensionnement*.

La **première tâche de conception (I)** consiste en des échanges avec le MOA et permet d'aboutir aux résultats intermédiaires suivants :

- confirmation, modification ou compléments des besoins du MOA ⑥ ;
- définition du ou des projectiles de pré-dimensionnement* ⑦.

Dès lors que la solution par dispositif de protection par merlon a été préférée à d'autres types de parade, la **seconde tâche de conception (II)** consiste en une première conception géométrique tridimensionnelle de l'ouvrage, réalisée à partir de l'analyse multicritère des données initiales et des résultats intermédiaires précédemment obtenus. Elle permet d'aboutir au résultat intermédiaire suivant :

- définition de la géométrie du dispositif de protection par merlon (emplacement, forme, etc.) ⑧.

La **troisième tâche de conception (III)** consiste à réaliser des simulations trajectographiques en considérant le terrain reprofilé (intégration du dispositif de protection par merlon), réalisée à partir des données initiales et des résultats intermédiaires précédemment obtenus. Elle permet d'aboutir au résultat intermédiaire suivant :

- définition du ou des cas de sollicitation* (c'est à dire du/des projectile(s) de dimensionnement qui détermine(nt) la/les sollicitation(s) sur l'ouvrage) ⑨.

La **quatrième tâche de conception (IV)** consiste en une première conception de la constitution du dispositif de protection par merlon, réalisée à partir des données initiales et des résultats intermédiaires précédemment obtenus. Elle permet d'aboutir au résultat intermédiaire suivant :

- définition des données structurelles (constituants, renforcements) ⑩.

La **cinquième tâche de conception (V)** consiste à concevoir et définir les équipements annexes (limitation d'accès, moyens d'accès, dispositifs de surveillance, etc.) qui constituent le résultat intermédiaire ⑪.

La **sixième tâche de conception (VI)** consiste à définir les conditions de réalisation des travaux, qui constituent le résultat intermédiaire ⑫.

Une fois ces résultats intermédiaires obtenus, les dimensionnements trajectographique, structurel et fonctionnel peuvent être réalisés.

Le **dimensionnement trajectographique (VII)** consiste en :

- une validation de la hauteur du merlon, considérant le terrain reprofilé ;
- une validation de la longueur de l'ouvrage, vis-à-vis de la dispersion latérale des trajectoires.

Le **dimensionnement structurel (VIII)** consiste en une vérification des points suivants :

- stabilité générale ;
- stabilité interne ;
- stabilité externe ;
- stabilité mixte ;
- résistance à l'impact (sous les cas de sollicitation définis).

Le **dimensionnement fonctionnel (IX)** consiste en un dimensionnement du dispositif sur les aspects fonctionnels hors trajectographie et résistance aux impacts : fonctionnement hydraulique, exploitation, maintenance, etc.

Si un des dimensionnements (trajectographique, structurel ou fonctionnel) n'est pas satisfaisant, certaines tâches de conception doivent être menées à nouveau afin de modifier certains résultats intermédiaires. Tous les dimensionnements doivent ensuite être repris avec le nouveau jeu de données constitué des données initiales et des nouveaux résultats intermédiaires.

Le dimensionnement du merlon est valide lorsque le jeu de données permet d'aboutir simultanément à des dimensionnements, trajectographique, structurel et fonctionnel satisfaisants.

Les recommandations ci-dessous sont établies dans une souci d'exhaustivité et de souplesse. Elles décrivent les différentes tâches du processus, avec possibilité d'itérations. Selon la situation, la réalisation de certaines tâches peut être extrêmement simplifiée. C'est notamment le cas des travaux en urgence, mais pas exclusivement.

Remarque : Dans cette présentation des différentes tâches, le dimensionnement trajectographique est considéré comme ne relevant pas du dimensionnement fonctionnel. L'avantage de cette présentation est de permettre une différenciation plus claire entre les tâches de dimensionnement. Cette différence d'usage de termes, par rapport à certaines pratiques, n'a pas de conséquence sur le déroulement des différentes phases de conception et de dimensionnement.

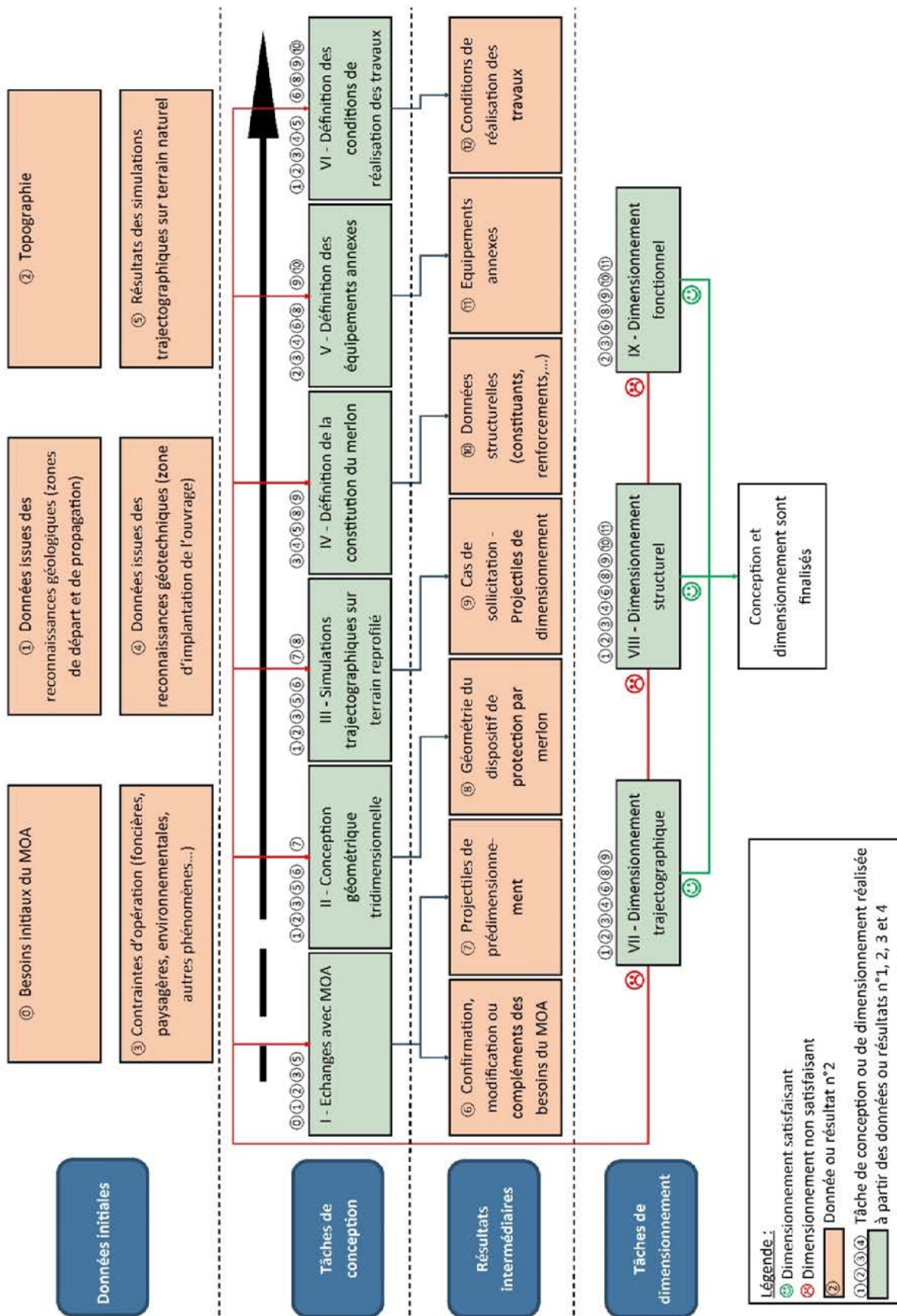


Figure 13 : Logigramme de conception et dimensionnement

3.4.2. Données initiales

3.4.2.1. Besoins initiaux du Maître d'Ouvrage / Contraintes d'opérations

Les besoins initiaux du MOA, définis au § 4.1, et les contraintes d'opération, définies au § 4.2, constituent des données d'entrée primordiales pour la conception et le dimensionnement du dispositif.

3.4.2.2. Données géologiques, géomécaniques, hydrogéologiques et topographiques

Les données relatives au site et nécessaires au dimensionnement du merlon sont :

A. Les données issues des reconnaissances géologiques au niveau de la zone de départ :

- volumes au départ ;
- forme des blocs et élanement ;
- masse volumique ;
- position des zones de départ.

La possibilité de fragmentation du volume après son départ peut également être considérée. La prise en compte de la fragmentation du bloc en vue de définir le projectile de pré-dimensionnement (forme, masse, vitesse, etc.) peut être envisagée de différentes manières (propagation du bloc fragmenté, prise en compte de la fragmentation au cours de sa propagation, etc.).

B. Les données issues des reconnaissances de terrain (géologiques, géomorphologiques, etc.) au niveau de la zone de propagation, en vue des simulations trajectographiques :

- topographie ;
- nature et caractéristiques des sols ;
- nature et caractéristiques du couvert végétal (en particulier présence de forêt si prise en compte dans les simulations trajectographiques).

C. Les données issues de reconnaissances géotechniques et topographiques au niveau de la zone d'implantation du dispositif de protection par merlon :

- géométrie et nature des horizons (profondeur du rocher, hétérogénéité, contexte structural, etc.) ;
- caractéristiques mécaniques (portance, paramètres de cisaillement, propagation des vibrations, etc.) ;
- présence de cavités souterraines ;
- présence d'eau dans les terrains (nappe ou circulations) et en surface ;
- zone d'influence géotechnique (ZIG) ;
- topographie.

3.4.2.3. Simulations trajectographiques sur terrain naturel

Les données A et B ci-dessus permettent la réalisation de simulations trajectographiques adaptées, réalisées sur terrain naturel, aboutissant à des premiers résultats en termes d'énergie cinétique, de hauteur de passage, de dispersion latérale et éventuellement de volumes résiduels après fragmentation.

Il appartient au concepteur de vérifier que les outils de simulation, en 2D ou en 3D, et les résultats qui en sont issus permettent de répondre aux différentes recommandations ci-après. La mission d'expertise doit aboutir à un dimensionnement partagé avec le MOA.

Remarques sur le recours aux outils de simulation des trajectoires :

1. Ces recommandations sont données en l'absence de document consensuel sur l'utilisation des outils de simulation des trajectoires et l'exploitation de leurs résultats aux fins de dimensionnement des ouvrages. Une action sur ce sujet est prévue dans le cadre de C2ROP2.
2. Ces recommandations supposent que les simulations permettent de décrire toutes les trajectoires possibles, que les outils mobilisés soient en 2D ou en 3D. Le recours aux modèles en 2 dimensions est possible pour tout ou partie de la conception et du dimensionnement. Le choix de l'outil et de la méthode relève de la responsabilité de l'équipe de conception.

3. Les paramètres décrivant la cinétique des projectiles de pré-dimensionnement ou de dimensionnement sont issus des simulations trajectographiques sur terrain naturel ou reprofilé, respectivement. Si des outils probabilistes sont utilisés pour ces simulations, des valeurs caractéristiques de ces paramètres doivent être définies à partir de descripteurs statistiques fiables des distributions considérées. A titre informatif, les quantiles à 95 % ou 98 % sont fréquemment utilisés pour caractériser l'énergie cinétique de translation (ou la vitesse) et la hauteur d'impact (cf. § 3.1). Ces quantiles peuvent être diminués ou augmentés en fonction des niveaux de protection visés par le MOA. La pertinence statistique du quantile utilisé doit être vérifiée par l'équipe de conception: le descripteur doit montrer une faible dépendance au nombre de simulations. Ceci est d'autant plus important si le descripteur retenu est la valeur maximale.

3.4.3. Tâches de conception et résultats intermédiaires

3.4.3.1. Echanges avec le Maître d'Ouvrage (I)

Les échanges entre le MOA et le MOE permettent, sur la base de l'analyse des données initiales, de confirmer, modifier ou compléter les besoins initialement exprimés par le MOA, notamment pour ce qui concerne les volumes et position de départ des phénomènes considérés (scénario de référence).

Ces échanges permettent également de définir le projectile de pré-dimensionnement en s'appuyant sur les résultats de simulation des trajectoires sur terrain naturel. Ceci suppose une concertation avec le MOA pour la détermination des valeurs caractéristiques des paramètres cinétiques relatifs au projectile (cf. remarque 3, au § 3.4.2.3).

Plusieurs projectiles de pré-dimensionnement peuvent être considérés indépendamment les uns des autres, ou simultanément, ou successivement. Cette définition peut porter sur les volumes au départ, les projectiles à intercepter, etc.

Ces échanges permettent également de définir des critères concernant la déformation acceptable du merlon et ses réparations après impacts. Ces critères peuvent être déclinés pour des événements courants ou exceptionnels. Ils permettent au MOE de définir, en concertation avec le MOA, les niveaux d'endommagement acceptables (cf. § 4.4.2.1).

3.4.3.2. Conception géométrique tridimensionnelle (II)

La conception géométrique tridimensionnelle a pour finalité de proposer une géométrie et une implantation de l'ouvrage permettant au dispositif d'assurer le niveau de protection attendu, en tenant compte notamment de la topographie, des avoisinants, des contraintes et particularités du site, de la gestion des eaux de surface et souterraines. Elle repose ainsi sur une analyse multicritère (cf. § 4.3.3).

La géométrie du dispositif concerne notamment le type de profil de merlon et de fosse, la hauteur du merlon, la longueur du dispositif, l'emprise au sol du dispositif, la largeur de fosse, etc.

Pour cette phase de conception géométrique, la hauteur retenue pour le merlon est la somme de la valeur caractéristique de la hauteur de passage du centre de gravité du projectile de pré-dimensionnement et de la hauteur de la revanche, laquelle est à minima égale au rayon de la sphère équivalente au projectile de pré-dimensionnement. Cette revanche devra être vérifiée lors des phases de dimensionnement ultérieures. Son rôle est double :

- rôle géométrique vis-à-vis de l'interception du projectile ;
- rôle mécanique vis-à-vis de la résistance du merlon sous impact.

La hauteur du merlon est définie par section d'ouvrage, considérée homogène.

La conception géométrique du dispositif fait l'objet d'une analyse paramétrique et peut être conduite en recherchant une optimisation des mouvements des matériaux constitutifs.

La conception géométrique intègre les dispositions de gestion des eaux, qui doivent :

- soit viser à empêcher que le merlon ne se comporte comme un barrage aux écoulements naturels ;
- soit considérer la charge hydraulique temporaire liée à une accumulation d'eau dans la fosse.

Une combinaison de ces 2 configurations est envisageable. La transparence hydraulique du dispositif est une solution recommandée dans la plupart des cas.

Pour assurer la transparence hydraulique du dispositif, par captage et orientation des eaux, plusieurs solutions peuvent être envisagées :

- pente longitudinale de la fosse ;
- réseau de drainage de la fosse : tapis drainant (concassés ou matériaux d'apport), drains PEHD protégés par des géotextiles, cunettes ou fossés, etc. (ex. Figure 14) ;
- ouvrage hydraulique traversant le merlon.

L'ouvrage doit être conçu de manière à pouvoir être régulièrement visité, contrôlé et entretenu.

Pour assurer le débroussaillage, le curage ou les réparations potentielles, les conditions d'accès à l'ouvrage doivent être précisées en phase conception :

- piste utilisable par engins mécaniques ;
- absence de piste et accès par moyen de levage, pelle araignée ;
- accès avec ligne de vie et moyens de progression ;
- etc.

La conception géométrique doit tenir compte des attentes en termes d'insertion paysagère (visibilité de l'ouvrage, ...), d'intégration environnementale (passage de faune, etc.) et d'écologie.



Figure 14 : Tranchée drainante en pied du talus de raccordement (gauche) et géosynthétique drainant en fond de fosse, côté talus de raccordement (droite). Communes de Freney d'Oisans (38) et Veyrier-du-Lac (74) (Sources : ONF-RTM)

3.4.3.3. Simulations trajectographiques sur terrain reprofilé (III)

Les simulations trajectographiques en considérant le terrain reprofilé sont réalisées en prenant en considérant les mêmes caractéristiques que celles des projectiles de pré-dimensionnement (volume, forme), avec les mêmes conditions de départ.

Elles permettent d'obtenir des données cinétiques tenant compte des modifications projetées du profil du terrain (prise en compte du dispositif de protection par merlon). Ces données cinétiques peuvent fortement différer de celles du projectile de pré-dimensionnement, obtenues précédemment en considérant le terrain naturel, notamment en cas de modification importante de la topographie ou de la nature des terrains de surface.

Les caractéristiques géométriques du (ou des) projectile(s) de pré-dimensionnement (volume, forme) et les nouvelles données cinétiques sur terrain reprofilé définissent le(s) projectile(s) de dimensionnement, considérés pour le dimensionnement trajectographique.

Les simulations sur terrain reprofilé participent également à la définition du ou des cas de sollicitation considéré(s) pour le dimensionnement structurel du merlon. Les cas de sollicitation peuvent également considérer l'éventualité du remplissage partiel de la fosse.

Les paramètres cinétiques à prendre en compte dans la définition des cas de sollicitation sont, par ordre d'importance décroissante :

1. L'énergie cinétique de translation/la vitesse du bloc.
2. La hauteur d'impact.
3. L'angle d'incidence.
4. La vitesse de rotation.

Les valeurs caractéristiques attribuées à ces paramètres sont déterminées à partir des simulations trajectographiques sur terrain reprofilé, en tenant compte des remarques 2 et 3 du § 3.4.2.3.

Plusieurs cas de sollicitations peuvent être retenus, après concertation avec le MOA, pour dimensionner le merlon, en considérant différents scénarios. Par exemple, les différences entre les scénarios peuvent concerner :

- différents projectiles de pré-dimensionnement, pouvant correspondre à des volumes et points de départ différents, à des couples (énergie cinétique, hauteur de passage) différents ;
- remplissage de fosse, par suite d'éboulements antérieurs ou d'une avalanche de neige modifiant la hauteur d'impact ;
- période de retour des scénarios de référence, ayant une influence sur l'endommagement acceptable au regard de sa probabilité.

3.4.3.4. Définition de la constitution du merlon (IV)

En tenant compte des données initiales et résultats intermédiaires (notamment énergie cinétique des cas de sollicitations, hauteur de passage des cas de sollicitations, emprise disponible), la constitution du merlon est définie :

- matériaux constitutifs du corps du merlon ;
- matériaux constitutifs des éléments de renforts du corps de merlon ;
- matériaux constitutifs des talus et éléments de parement ;
- matériaux constitutifs des ouvrages hydrauliques.

La définition de la constitution du merlon doit tenir compte des attentes en termes d'insertion paysagère (aspect des matériaux utilisés, plantations, etc.), d'intégration environnementale (préservation des espèces, etc.), d'écologie (empreinte carbone des matériaux utilisés, etc.) et du souhait de valorisation des matériaux du site. Cette valorisation est subordonnée à une étude géotechnique d'opportunité de valorisation, constituant une étape essentielle de la conception.

3.4.3.5. Définition des équipements annexes (V)

Le dispositif de protection par merlon nécessite parfois des équipements annexes destinés à la sécurisation du public, à la sécurisation des intervenants de l'exploitant et à la surveillance de l'ouvrage.

Ces équipements peuvent être :

- limitation d'accès du public aux zones à risque de l'ouvrage. Par exemple avec clôtures, portillons et portails fermant l'accès en crête de merlon ;
- moyens d'accès sécurisés à toutes les parties d'ouvrages, dans le cadre de son exploitation. Par exemple par pistes pour accès avec engins dans la fosse du merlon, accès pédestre au sommet du merlon et du talus de raccordement par lignes de vie et éventuellement échelles ou escaliers ;
- surveillance continue et permanente de l'ouvrage, vis-à-vis d'intrusion du public, de l'évolution de l'ouvrage (déplacement, déformation, sollicitation dynamique, etc.) et éventuellement de la connaissance de l'évolution des zones de départ des phénomènes susceptibles d'atteindre le dispositif de protection. Par exemple, un dispositif instrumental permettant de réaliser les mesures à distance avec des capteurs informant l'exploitant des évolutions de l'ouvrage et déclenchant des alertes et alarmes.

3.4.3.6. Conditions de réalisation des travaux (VI)

Les conditions de réalisation des travaux doivent être prises en compte dans les études de conception.

Les items pouvant être intégrés sont, au moins :

1. Protection des riverains vis-à-vis du chantier.
2. Sécurité courante du chantier.
3. Protection du chantier vis-à-vis des phénomènes provenant du versant en amont.
4. Accès aux zones de travaux.
5. Zones de stockage et traitement des matériaux.
6. Dispositions d'insertion paysagère, de préservation environnementale et de dispositions écologiques relatives à la réalisation des travaux.

Le point 1 peut être pris en compte par le réglage de la circulation et par protections provisoires linéaires.

Le point 2 peut être pris en compte par les mesures courantes de sécurité de chantier, adaptées aux conditions spécifiques.

Les points 3 à 5 peuvent être pris en compte par les technologies de modules préfabriqués mis en place par des engins télécommandés permettant de limiter le temps d'exposition sur chantier et la sécurisation progressive du chantier par le merlon en cours de montage.

Le point 3 peut être pris en compte par un système de surveillance du versant avec sécurisation chantier.

3.4.4. Tâches de dimensionnement

Le dimensionnement aborde 3 volets distincts :

- trajectographie ;
- structure ;
- fonctionnel.

Ces trois volets sont traités simultanément dans un processus itératif, les résultats d'un volet pouvant alimenter les autres.

Les dimensionnements doivent être réalisés sur des tronçons d'ouvrages homogènes en termes de géométrie, de cas de sollicitation, de contexte géotechnique, etc.

Les résultats des dimensionnements doivent tenir compte des besoins du MOA et des contraintes d'opération préalablement identifiées.

Le dimensionnement du merlon et des équipements annexes doit tenir compte des attentes en termes d'insertion paysagère, d'intégration environnementale et d'écologie.

Remarque : Ce document ne donne pas de recommandation quant aux coefficients de sécurité partiels à utiliser sur chacun des trois volets du dimensionnement, ni sur les combinaisons d'action. Les coefficients traduisent les incertitudes sur les paramètres d'entrée et sur les méthodes utilisées. A la date de rédaction, il n'existe pas de consensus sur les modalités de mise en œuvre de ce principe au cas des ouvrages de protection passive contre les chutes de blocs ni sur les valeurs de coefficients à appliquer aux données caractérisant les projectiles. Un travail sur ces thèmes est prévu dans le cadre de C2ROP 2.

3.4.4.1. Dimensionnement trajectographique (VII)

Le dimensionnement trajectographique vise à vérifier que, compte tenu des résultats des simulations sur terrain reprofilé :

- la longueur de l'ouvrage est suffisante pour arrêter les projectiles de dimensionnement dans les différents cas de sollicitation définis, vis-à-vis de la dispersion latérale ;
- la hauteur du merlon est suffisante pour intercepter les trajectoires des projectiles de dimensionnement dans les différents cas de sollicitation définis.

La valeur caractéristique de la hauteur passage du projectile de dimensionnement, pour le cas de sollicitation considéré, est comparée à la hauteur du merlon diminuée de la revanche, suivant les indications données en § 4.4.3.3.

Si plusieurs cas de sollicitations sont définis, la hauteur à retenir pour la section considérée est la valeur maximale entre les différents cas.

En fonction de l'influence des modifications du profil sur la trajectoire des projectiles, la phase de dimensionnement trajectographique peut amener à diminuer ou à augmenter la hauteur de l'ouvrage définie en phase II (§ 4.4.3.3).

Remarque : Dans le cas d'utilisation de simulations trajectographiques pour la quantification de l'aléa à l'aval du dispositif, une vigilance particulière doit être portée aux limites des outils de simulation (*cf.* § 3.1.3).

3.4.4.2. Dimensionnement structurel et stabilité (VIII)

Ce paragraphe traite des principes relatifs à la vérification de la stabilité des ouvrages sous les différentes sollicitations envisagées (poids propre, impact, séisme, etc.) en considérant éventuellement le remplissage partiel de la fosse ou des conditions hydrogéologiques et hydrauliques exceptionnelles.

Les parties d'ouvrages intéressées sont tous les terrassements et éventuellement les renforcements internes des remblais ainsi que les structures spécifiques éventuelles.

3.4.4.2.1. Endommagement acceptable

Le dimensionnement du merlon requiert la définition préalable d'un endommagement acceptable pour les cas de sollicitation retenus.

Deux niveaux peuvent être définis pour chaque ouvrage, en cohérence avec les contraintes de site, la technologie de merlon employée, la réparabilité du merlon, sa durée de service souhaitée, la période de retour des scénarios de référence et le niveau de protection attendu :

- endommagement acceptable courant, défini par le MOA, en concertation avec le MOE :
 - projectile de dimensionnement arrêté par le dispositif,
 - pas de risque sur les enjeux à l'aval, qui pourraient résulter de l'endommagement du merlon (effondrement, projections, déformation excessive du merlon, etc.),
 - ce niveau d'endommagement doit permettre de limiter les réparations post-impacts selon les besoins du MOA ;
- endommagement acceptable ultime :
 - projectile de dimensionnement arrêté par le dispositif ;
 - pas de risque sur les enjeux à l'aval, qui pourraient résulter de l'endommagement du merlon (effondrement, projections, déformation excessive du merlon, etc.) ;

Les réparations post-impacts sont importantes, notamment en termes de délais et de coûts de réparation.

Pour un cas de sollicitation défini, le MOA peut considérer un niveau d'endommagement acceptable courant ou un niveau d'endommagement acceptable ultime, en fonction du niveau de protection défini pour ce cas de sollicitation.

Le rapport entre les deux niveaux d'endommagement peut être très variable en fonction des choix du MOA, des particularités du site et des technologies employées pour le dispositif de protection.

3.4.4.2.2. Stabilité hors impact

Les méthodes de dimensionnement sont les méthodes couramment utilisées en géotechnique.

Devront être vérifiés, de façon calculatoire ou experte, les points suivants :

1. Stabilité générale (merlon sur pente).
2. Stabilité générale du talus de raccordement de la fosse.
3. Stabilité externe du merlon.
4. Stabilité externe du parement amont du merlon, si présent.
5. Stabilité interne du talus amont du merlon (avec ou sans parement).
6. Stabilité externe du parement aval du merlon, si présent.
7. Stabilité interne du talus aval du merlon (avec ou sans parement).
8. Stabilité mixte des parties d'ouvrage renforcées.

Ces vérifications doivent être réalisées selon plusieurs configurations éventuellement combinées, considérant à minima :

- poids propre ;
- Séisme (le cas échéant) ;
- Configuration hydrogéologique défavorable.

Elles doivent éventuellement prendre en compte les sollicitations issues des phénomènes autres que les éboulements rocheux pouvant affecter la stabilité du merlon, selon les choix du MOA.

Ces vérifications doivent être réalisées selon les normes en vigueur, notamment NF EN 1997-1 (Eurocode 7 : calcul géotechnique), NF P94-261 (justification des fondations superficielles), NF P94-270 (justification des ouvrages de soutènement en remblais renforcés et sols cloués), NF P94-281 (justification des ouvrages de soutènement de type mur) et NF EN 1998 (Eurocode 8 : résistance aux séismes). Il s'agit essentiellement de vérifications aux ELU.

3.4.4.2.3. Stabilité sous impact

Le dimensionnement vis-à-vis de la stabilité sous impact renvoie à l'action dynamique résultant de l'interception du bloc rocheux (cf. § 3.2).

Les données d'entrée à prendre en compte pour ce dimensionnement incluent généralement :

- volume du bloc ;
- vitesse d'impact (vitesse de translation) ;
- hauteur d'impact ;
- angle d'incidence ;
- vitesse de rotation ;
- remplissage partiel de la fosse par d'autres phénomènes.

Pour les données relatives à la cinétique du projectile de dimensionnement, on retiendra les valeurs caractéristiques de leurs distributions (cf. remarque 3, au § 3.4.2.3).

Pour ce dimensionnement, le concepteur peut avoir recours à une ou plusieurs des approches disponibles (cf. § 3.2):

- méthodes analytiques de types 2 à 4 ;
- modélisation numérique aux éléments finis ;
- modélisation numérique aux différences finies ;
- modélisation numérique aux éléments discrets.

L'approche de Type 1 n'est pas recommandée, sauf dans le cas où, pour des énergies modérées (< 2000 kJ), la comparaison avec des situations similaires atteste du surdimensionnement de l'ouvrage projeté.

Les méthodes analytiques présentent l'avantage d'une relative facilité d'utilisation. Il est déconseillé de les utiliser seules compte tenu de la dispersion des résultats, conséquence de la prise en compte simplifiée des mécanismes mobilisés lors de l'impact (cf. § 3.2.2). Il peut toutefois être envisagé d'utiliser plusieurs approches pour retenir les résultats les plus défavorables.

L'utilisation de modèles numériques nécessite notamment de connaître de nombreuses caractéristiques mécaniques des matériaux (paramètres élastiques, paramètres plastiques), de préférence en dynamique. Le recours à ces modèles nécessite une compétence poussée en modélisation.

Pour les méthodes numériques, différents points de vigilance sont à considérer par le modélisateur :

- adéquation du maillage avec le volume du projectile de dimensionnement, la forme du merlon et des composants, pour les méthodes continues,
- adéquation des caractéristiques dimensionnelles et mécaniques des éléments avec le volume du projectile de dimensionnement, les matériaux constitutifs du merlon, la forme du merlon et des composants, ... pour les méthodes discrètes ;
- adéquation du pas de temps avec les caractéristiques mécaniques des matériaux pour toutes les méthodes ;
- adéquation du pas de temps avec le maillage pour les méthodes continues ;
- calage des paramètres de réponse dynamique des matériaux constitutifs du modèle ;
- l'amortissement numérique.

En cas d'utilisation de modélisations numérique aux éléments finis, une attention particulière doit être portée à la modélisation correcte des grandes déformations.

L'utilisation de modélisations numériques aux éléments discrets peut nécessiter des temps et moyens de calcul importants.

Il est vivement recommandé de valider tout modèle numérique, par comparaison avec des données expérimentales, préalablement à son utilisation pour des configurations réelles ne différant pas trop des conditions expérimentales.

Il est recommandé de recourir au critère d'efficacité pour évaluer le dimensionnement d'un ouvrage dès lors que la situation est dans le domaine de validité de ce critère (cf. § 3.2.5).

Quelle que soit l'approche retenue, le dimensionnement doit aboutir à la vérification que les déplacements (issus ou non de déformations) du merlon au cours de l'impact se stabilisent, et sont compatibles avec le niveau d'endommagement acceptable (courant ou ultime) pour le cas de sollicitation considéré.

Les niveaux d'endommagement acceptable courant et ultime peuvent se rapprocher des notions d'ELS et d'ELU considérés par les Eurocodes, sans y correspondre rigoureusement, les méthodes de calcul étant très différentes.

Plusieurs points doivent faire l'objet d'une attention particulière :

- endommagement du talus aval, dominant souvent directement les enjeux, notamment dans le cas d'un parement aval raidi ;
- endommagement de la revanche, nécessitant notamment de s'assurer qu'après déformation, le projectile de dimensionnement ne franchit pas le merlon.

Ces endommagements doivent être évalués au regard de l'amplitude des déplacements, mais également au regard du gradient de déplacement sur la longueur et la hauteur d'ouvrage sollicitées.

Dans certains cas, les calculs de stabilité présentés au § 4.4.4.2.2 doivent être complétés en prenant en compte les contraintes en sous-face du merlon liées aux impacts. C'est tout particulièrement le cas lorsque le terrain de fondation est de qualité médiocre ou qu'il y a interaction avec une structure avoisinante (dont sous-jacente, telle qu'un tunnel). Il pourra être considéré que cette situation relève d'une combinaison accidentelle.

Remarque : Une action dédiée au dimensionnement des merlons vis-à-vis de la sollicitation dynamique d'impact est prévue dans le cadre de C2ROP 2, avec pour objectif de proposer une approche mobilisant, selon les situations, des méthodes empiriques, analytiques ou numériques.

3.4.4.3. Dimensionnement fonctionnel

3.4.4.3.1. Dimensionnement hydraulique

Excepté lorsqu'il est également conçu dans ce but, le merlon ne doit pas faire obstacle aux écoulements d'eau liquide quelle que soit leur origine (ruissellement, torrents, sous-terrain). La position, le nombre et les caractéristiques des ouvrages assurant la transparence hydraulique (ou autre modalité de gestion hydraulique) du dispositif doivent alors être dimensionnés en fonction des données hydrologiques du site (précipitations attendues pour la période de retour considérée, ruissellement attendu, surface du bassin versant), en cohérence avec le Dossier Loi sur l'Eau éventuel.

En cas de risque d'accumulation d'eau dans la fosse, les calculs de stabilité doivent également considérer ce scénario.

3.4.4.3.2. Dimensionnement des équipements annexes

Les équipements annexes seront dimensionnés spécifiquement :

- limitation d'accès du public, suivant des critères géométriques fonctionnels ;
- moyens d'accès sécurisés, suivant les règles et normes spécifiques relatives aux équipements choisis ;
- surveillance instrumentale, suivant : les typologies et quantités de capteurs, les disponibilités d'accès à l'énergie et aux réseaux de communication.

3.5. Préparation de l'opération de construction

En complément des phases de conception et de dimensionnement des ouvrages et travaux, il est nécessaire de considérer tous les volets de l'opération de construction en vérifiant la complétude et la cohérence globale des dispositions.

Les items qui doivent être considérés sont au moins les suivants :

- phasage constructif des ouvrages ;
- accès aux zones de travaux ;
- organisation du chantier et notamment les installations de chantier, les zones de stockage et traitement des matériaux et matériels, etc. ;
- sécurisation des tiers ;
- sécurisation du chantier ;
- paysage, environnement et écologie ;
- phasage et calendrier global ;
- estimation quantitative ;
- estimation financière ;
- allotissement.

Chapitre 4 - Construction

Préambule

Ce chapitre aborde des points génériques aux différents parades pare-blocs, pour mémoire, et précise les spécificités relatives aux dispositifs de protection par merlon. Ces points relèvent pour l'essentiel d'une mission de Moe.

Afin d'aboutir à une construction répondant en tous points aux besoins du MOA et aux spécifications de la conception, la phase de construction doit faire l'objet d'une structuration et d'une organisation adaptée aux spécificités de l'opération.

Généralement la structuration de la phase construction peut être la suivante :

1. Etablissement d'un Dossier de Consultation des Entreprises (DCE) synthétisant l'ensemble des spécifications et informations.
2. Choix de l'équipe d'opérateurs de construction, complète, cohérente et expérimentée.
3. Complément de reconnaissances, informations et études d'exécution.
4. Réalisation des travaux de construction de l'ouvrage et des contrôles afférents.
5. Réception et transfert de propriété de l'ouvrage.

4.1. Dossier de Consultation des Entreprises et opérateur de construction

4.1.1. Dossier de Consultation des Entreprises

Les pièces constituant le DCE doivent synthétiser l'ensemble des spécifications et informations résultantes des phases de conception (notamment les incertitudes persistantes) et prévoir spécifiquement toutes les dispositions prévisibles concernant :

- l'organisation qualité, sécurité et environnement ;
- la complétude des données d'entrée ;
- l'ingénierie d'exécution ;
- les dispositions d'exploitation du chantier ;
- la sécurisation des personnels du chantier vis-à-vis des risques induits par le chantier et les risques induits par l'environnement du chantier et notamment les circulations avoisinantes et les versants sus-jacents ;
- la sécurisation des tiers et des infrastructures avoisinantes vis-à-vis des risques induits par le chantier ;
- les spécifications paysagères, environnementales et écologiques ;
- les spécifications techniques des fournitures de matériaux et systèmes particuliers ;
- les spécifications techniques de réalisation et de contrôle des travaux ;
- les spécifications de réception des ouvrages.

4.1.2. Opérateurs de construction

Le choix de l'équipe d'opérateurs de construction est crucial dans l'atteinte des objectifs du MOA.

Cette équipe complète et expérimentée doit veiller à exprimer complètement les besoins du MOA ainsi qu'à informer les candidats de toutes les contraintes dans le DCE pour proposer une organisation optimum des moyens humains et matériels, avec des contraintes de toutes natures, dont le délai.

Cette organisation doit être agile pour s'adapter efficacement aux configurations réellement rencontrées et doit être impliquée dans une relation permanente, continue et pointue avec l'équipe de maîtrise d'œuvre.

L'équipe d'opérateurs de construction peut être composée de :

- l'entrepreneur principal (terrassier ou entreprise de génie civil, suivant la typologie de merlon) ;
- le bureau d'étude géotechnique et éventuellement structure (compétences en dimensionnement d'ouvrages soumis à des sollicitations dynamiques) ;
- le géomètre topographe ;
- le contrôle extérieur (étude et essais) ;
- les fournisseurs de solutions technologiques spécifiques de constituants du merlon.

Elle est éventuellement complétée de :

- les entrepreneurs complémentaires (travaux de protection et confortement, éventuellement en accès difficile) ;
- les fournisseurs et opérateurs de solutions spécifiques de surveillance instrumentale du merlon et de son environnement.

4.2. Reconnaissances et informations préalables

Les reconnaissances et informations préalables ont pour objet de lever les incertitudes de toutes natures (ou de prévoir les moyens de les réduire), afin d'éviter leurs incidences sur l'opération.

Les items qui peuvent être traités, sont :

- reconnaissances *in situ* préalables ;
 - levé topographique postérieur au débroussaillage et à l'abattage d'arbres,
 - reconnaissances complémentaires aux informations du DCE,
 - > géologie,
 - > géotechnique,
 - > hydrogéologie,
 - > hydraulique,
 - études de convenance de vibration sur avoisinants,
- informations préalables,
 - caractéristiques et conformités des fournitures,
 - moyens matériels disponibles,
 - moyens humains disponibles,

L'ensemble des informations résultantes, combinées aux informations du DCE constituent la base des études et méthodes d'exécution.

4.3. Etudes et suivi d'exécution, visa

Les études et suivi d'exécution ont pour objet de définir les détails des ouvrages et des travaux qui vont être réalisés, dans les conditions réelles d'exécution (méthode, fourniture, matériel, compétence, organisation, etc.) et en intégrant la surveillance de la qualité (y compris levé des incertitudes).

Elles doivent garantir les performances et fonctionnalités de toutes natures de l'ouvrage, telles qu'elles ont été définies au DCE, augmentées des propositions de l'opérateur des travaux.

Les items qui peuvent être traités incluent :

- procédures qualités, procédures paysage et environnement, procédures écologiques
- procédures hygiène et sécurité, du chantier et des tiers, intégrant la gestion des risques provenant du versant amont,
- note d'hypothèses
- méthodes de calculs
- choix de fournitures et procédés d'exécution
- dimensionnement d'exécution
- plans de détails d'exécution
- plans de contrôles internes, externes et extérieurs

La construction des merlons en terre doit satisfaire les préconisations de la GTR. Concernant les travaux géotechniques spéciaux, les réglementations normatives spécifiques s'appliquent. On peut citer ici la norme NF EN 14475 pour les remblais renforcés.

Les travaux doivent faire l'objet d'un suivi d'exécution permanent intégrant les adaptations contradictoires et le renseignement continu des études et documents d'exécution.

Les points d'attention spécifiques courants, incluent :

- sécurisation provisoire des tiers ;
- sécurisation provisoire du chantier ;
- géométrie 3D ;
- gestion des eaux, provisoire et définitive ;
- organisation et contrôles des terrassements, optimisation des déblais/remblais quantitativement et qualitativement
- adaptations géologiques, hydrogéologiques hydrauliques et géotechniques
- etc.

Le VISA doit porter sur l'ensemble des propositions et documents produits par l'entreprise.

Le VISA du MOE permettra de :

- vérifier la complétude, l'exactitude et la cohérence des documents d'exécution, dans un premier temps ;
- valider les adaptations d'exécution, sur la durée du chantier et la période de garantie.

4.4. Contrôles

Il est rappelé l'importance du contrôle et des essais afin de garantir à chaque étape de la construction du merlon, la validité des hypothèses géotechniques et la conformité de la construction aux méthodes prescrites et spécifiées dans le cadre du DCE et des documents d'exécution.

Les merlons en général et en particulier les merlons à parements raidis implantés dans des sites à fortes pentes sont des ouvrages sensibles très fortement sollicités, nécessitant une grande attention de mise en œuvre et des contrôles réguliers.

4.4.1. Contrôles chantier

Il est du devoir du MOA d'exiger un contrôle qualité de la mise en œuvre, via son MOE, et de faire réaliser les éléments de mission géotechnique type G3 (étude d'exécution) et G4 (suivi d'exécution).

L'objectif est de s'assurer d'une réalisation de qualité pour garantir la performance et la pérennité de l'ouvrage par, au moins :

- qualité et contrôle géométrique ;
- qualité et régularité des parements vus ;
- validation du fond de fouille (point d'arrêt de chantier) ;
- caractérisation des géo-matériaux (norme NF P11-300) et y compris si besoin la réalisation d'essais Proctor (norme NF P94-093) ;
- respect d'un montage par couche homogène (point d'arrêt de chantier) ;
- qualité et contrôle des compactages selon les exigences du SETRA (point d'arrêt de chantier), (GTR – Réalisation des remblais et des couches de forme – Fascicule 1) ;
- méthode observationnelle de surveillance de l'ouvrage lors de sa construction ;
- contrôles des dispositions et ouvrages hydrauliques et de drainage.

4.4.2. Contrôle réception

Les contrôles physiques et documentaires préalables à la réception et durant la période de garantie de l'ouvrage devront permettre de vérifier la parfaite et totale atteinte des objectifs du DCE et des documents d'exécution et au moins les contrôles suivants.

Contrôles physiques :

- géométrie ;
- aspects des parements vus ;
- complétude et finition des ouvrages ;
- continuation de la méthode observationnelle durant la période de garantie ;
- contrôles des interventions de maintenance prévisibles, incluses dans la période de garantie (végétalisation, etc.) ;

Contrôles documentaires :

- dossier d'Ouvrage Exécuté ;
- études et documents d'exécution ;
- documents de suivi qualité ;
- synthèse des adaptations lors de la construction de l'ouvrage ;
- dossier de maintenance ;
- dossier d'intervention ultérieure de l'ouvrage.

Chapitre 5 - Exploitation

5.1. La gestion des enjeux

Les dispositifs de protections par merlon sont destinés à intercepter des événements pouvant être très importants à proximité immédiate des enjeux. Les merlons et les événements potentiels sont susceptibles de générer des risques liés aux accès intempestifs du public à l'ouvrage ou une anxiété des riverains et usagers.

La gestion des enjeux consiste à anticiper et définir, en complément du dossier d'ouvrage et des modalités de maintenance, les modalités et dispositions nécessaires au fonctionnement des enjeux avoisinants, lors des phases de travaux et la durée de service du dispositif, incluant les différentes étapes de maintenance

Les différents types de populations avoisinantes ou intervenantes sur l'ouvrage peuvent être :

- l'exploitant de l'ouvrage de protection et ses assistants ;
- les concessionnaires de réseaux ou gestionnaires d'espaces naturels ;
- l'exploitant ou gestionnaire des enjeux à protéger ;
- les riverains et usagers.

La gestion des enjeux avoisinants peut être :

1. L'information des habitants avoisinants et des gestionnaires d'infrastructures concernant les risques et mesures de prévention (DICRIM, procédures conjointes à plusieurs exploitants, etc.).
2. La limitation d'accès aux avoisinants (habitants, gestionnaires d'infrastructures et réseaux) lors des simulations de crise et lors de crises opérationnelles.

La gestion de la sécurité des intervenants peut être :

3. La réalisation d'un document unique de sécurité pour l'ouvrage.
4. La réalisation d'une analyse des risques et des moyens de prévention, en concertation avec chaque intervenant.

Concernant le point 2, il est à noter que les choix opérés lors des phases de conception concernant le niveau de protection et la typologie de merlon peuvent être des éléments déterminants de la continuité de service de l'ouvrage de protection et donc des infrastructures avoisinantes.

5.2. La maintenance

La maintenance a pour objet de maintenir satisfaisantes les performances du dispositif, en gérant les différents facteurs susceptibles de le faire évoluer défavorablement. Ces facteurs peuvent être :

- facteurs extérieurs :
 - embroussaillage,
 - éboulements successifs comblant la fosse,
 - ravinement,
 - impacts répétés,
 - incendie ;
- facteurs propres au merlon :
 - Altération des éléments structuraux en parement,
 - Altération des éléments structuraux dans le corps du merlon.

Le programme de maintenance doit couvrir les modalités pour réaliser :

1. **La surveillance permanente** relative à l'intégrité globale de l'ouvrage.

Cette surveillance peut consister soit en des visites simples et fréquentes dont les résultats sont consignés, soit en des dispositifs instrumentaux de surveillance permanente et continue.

Les résultats des visites et surveillances sont intégrés dans le dossier d'ouvrage et peuvent déclencher des opérations d'inspection détaillée, d'entretien ou de réparation.

La fréquence des visites simples peut être hebdomadaire à mensuelle.

2. **Les visites techniques et inspections détaillées** périodiques de l'ouvrage et des zones de départ des phénomènes pris en compte (scénarios de référence).

Ces interventions nécessitent des compétences techniques relatives à la géologie, la géotechnique, les pathologies des ouvrages et matériaux et peuvent nécessiter des interventions en accès difficile.

Elles peuvent être réalisées par des interventions expertes physiques in situ, éventuellement complétées par des dispositifs instrumentaux de surveillance.

Elles doivent être réalisées par des techniciens et ingénieurs spécialisés et expérimentés dans la typologie d'ouvrage.

Les résultats des visites et inspections, sont intégrés dans le dossier d'ouvrage et peuvent déclencher des opérations d'entretien ou de réparation.

La fréquence des visites et inspections peut être semestrielle à pluriannuelle.

3. **Les entretiens prévisibles** et programmés, nécessitant des équipements et méthodes adaptés.

Par exemple : curage de la fosse, débroussaillages, remplacement préventif de parties d'ouvrages, parfois avec des accès difficiles.

La fréquence d'entretien peut être mensuelle à annuelle.

4. **La réparation** d'une partie d'ouvrage, dans un délai satisfaisant pour le MOA, dans des conditions non courantes, mais prévues.

Concernant les points 3 et 4, il est à noter que les choix opérés lors des phases de conception concernant la durabilité et la réparabilité du merlon (typologie et technologie du merlon, conditions d'accès en configuration dégradée) peuvent être des éléments déterminants de la complexité, du coût et de la durée des réparations. Les ouvrages modulaires démontables constituent la configuration la plus favorable aux réparations.

Il appartient au MOA de fixer la périodicité des visites prévues au titre de la surveillance permanente et des inspections détaillées. Leur périodicité peut notamment être définie en fonction de l'activité du site.

Glossaire spécifique

Cas de sollicitation : cas considéré pour le dimensionnement du merlon, défini par un scénario basé sur le projectile de dimensionnement, et d'éventuelles autres contraintes.

Crête : surface sommitale du merlon

Dispositif de protection par merlon : ensemble constitué du merlon, de la fosse et du talus de raccordement, visant à arrêter, dévier et stocker les éléments rocheux.

Durée de service : durée minimale, en années, pendant laquelle l'ouvrage assure le niveau de performance attendu, sous réserve de réalisation des opérations de maintenance, qui incluent les réparations faisant suite aux sollicitations des scénarios de référence.

Nota : le terme « durée de service » diffère de celui de « durée d'utilisation de projet » au sens des Eurocodes (« durée pendant laquelle l'ouvrage assure le niveau de performance attendu, malgré la détérioration due à son environnement et considérant le niveau de maintenance escompté c'est-à-dire sans qu'il soit nécessaire d'effectuer des réparations majeures » (NF EN 1990, 2003), du fait que des réparations importantes sont normalement prévisibles au cours de la durée de vie de l'ouvrage.

Emprise (au sol) du dispositif : surface occupée par le dispositif

Suivant l'axe transversal à l'ouvrage, depuis le point de jonction entre le talus de raccordement et le terrain naturel à l'amont du dispositif jusqu'à la jonction entre le talus aval du merlon et le terrain naturel (cf. Figure 1) ;

Suivant l'axe longitudinal, considérant l'emprise du merlon ainsi que la piste d'accès et talus de raccordement le cas échéant.

Fondation : la fondation d'un merlon est l'infrastructure nécessaire pour permettre son édification et sa stabilité.

Fosse : surface subhorizontale longeant le merlon, se situant à l'amont du pied du merlon.

Hauteur de passage : distance mesurée suivant la verticale entre la position du centre de gravité de la sphère équivalente au bloc rocheux et le sol à son aplomb.

Hauteur d'impact : Distance, mesurée suivant la verticale, entre la position du centre de gravité de la sphère équivalente au projectile, au moment de l'impact sur le merlon, et le pied du talus amont du merlon. Hauteur considérée pour la conception ou le dimensionnement.

Hauteur du merlon : distance mesurée suivant la verticale entre le pied du talus amont du merlon et sa crête.

Merlon : ouvrage massif en élévation, visant à arrêter ou dévier les blocs rocheux.

Module : sous ensemble préfabriqué, dupliqué de façon à constituer tout ou partie du merlon.

Parement : revêtement d'un merlon.

Parement technique : structure superficielle participant à la stabilité de l'ouvrage.

Projectile : impactant considéré en vue de la conception et du dimensionnement du merlon. Il est défini par sa masse et sa forme, résultant des observations géologiques ainsi que par sa vitesse de propagation et sa hauteur de passage, résultant des simulations des trajectoires. Plusieurs projectiles peuvent être considérés indépendamment les uns des autres ou simultanément.

Projectile de pré-dimensionnement : projectile défini sur la base de résultats de simulations numériques des trajectoires considérant le terrain naturel.

Projectile de dimensionnement : projectile défini sur la base de résultats de simulations numériques des trajectoires avec prise en compte du reprofilage du terrain naturel pour y intégrer le dispositif.

Remblai : matériau constitué de particules solides.

Remblai renforcé : remblai technique incorporant des renforcements.

Remblai technique : remblai conditionné, mis en place et compacté dans des conditions contrôlées.

Renforcement : inclusion placée dans un merlon permettant d'accroître ses caractéristiques techniques.

Revanche : partie du merlon au-dessus de la hauteur d'impact.

Talus amont : talus du merlon orienté face au versant et exposé à l'impact par le bloc rocheux.

Talus aval : talus du merlon opposé au talus amont, orienté du côté des enjeux à protéger.

Talus de raccordement : talus reprofilé situé entre la fosse et le versant naturel à l'amont du dispositif.

Volume de stockage : capacité de stockage statique à l'amont du merlon

Références bibliographiques

- Calvino, A., Dumont, P., Durville, J.-L., Dussauge, C., Effendiantz, L., Evrard, H., (2001), Parades contre les instabilités rocheuses, Guide technique, Collection environnement, Les risques naturels, LCPC, Paris, 143 pp,
- Durville, J.-L., Guillemain, P., Berthet-Rambaud, P., Subrin, D. (2010), Etat de l'art sur le dimensionnement des dispositifs de protection contre les chutes de blocks, Collection Études et recherches des LCPC - série Géotechnique et risques naturels, Paris, 84 pp,
- Hearn, G., Barrett, R.K., Henson, H.H., 1996. Testing and modelling of two rockfall barriers. Transportation research record 1504, 1-11
- Hennebert, P., Lambert, S., Fouillen, F., Charrasse, B. (2014). Assessing the environmental impact of shredded tires as embankment fill material. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 51 (5), p. 469-478, Doi : 10.1139/cgj-2013-0194.
- Heymann, A. (2012). Approche expérimentale du comportement mécanique des géo-ouvrages à technologie cellulaire. Application aux ouvrages pare-blocs. Doctoral thesis, University Joseph Fourier, Grenoble.
- Jarrin, J.P., Meignan, L., 2010. Modélisation géomécanique de merlons pare-blocs soumis à impact dynamique. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2010 - Grenoble 7-9 juillet 2010
- Joffrin, P., Bennani, Y., Rajot, J.-P., Freitag, N. (2016). Rea-Scale tests on a reinforced earth retaining bund impacted by a spherical projectile at energies up to 800kJ, p 5-7. RSS2016, Lyon, 15-17 November.
- Kister, B., Fontana, O., 2011. On the evaluation of rockfall parameters and the design of protection embankments – a case study. Proceedings of Interdisciplinary workshop on rockfall protection - Rocexs 2011, Innsbruck, Austria, 31-32.
- Kister, B., 2015. Development of basics for dimensioning rock fall protection embankments in experiment and theory (in German), research project FEDRO 2012/003, FEDRO report 1524.
- Lambert, S., Bourrier, F., (2013). Design of rockfall protection embankments: a review, Engineering geology, Vol, 154 (28), p, 77-88, Doi : 10, 1016/j, enggeo, 2012, 12,012
- Lambert, S., Bourrier, F., Toe, D. (2013). Improving three-dimensional rockfall trajectory simulation codes for assessing the efficiency of protective embankments. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 60, p. 26-36. Doi:10.1016/j.irmms.2012.12.09.
- Lambert, S., Heymann, A., Gotteland, P., Nicot, F. 2014. Real-scale investigation of the kinematic response of a rockfall protection embankment. Natural Hazards and Earth Systems Science. Vol. 14, p. 1269-1281, Doi : 10.5194/nhess-14-1269-2014.
- Lambert S., Kister B. 2017: Analysis of Existing Rockfall Embankments of Switzerland (AERES); Part A: State of Knowledge. Federal Office for the Environment, Bern, 55 p.
- Lambert, S., Kister, B. (2018). Efficiency assessment of existing rockfall protection embankments based on an impact strength criterion. Engineering Geology. DOI 10.1016/j.enggeo.2018.06.008
- Lorentz, J., Plassiard, J-P., Muquet, L., 2010. An innovative design process for rockfall embankments: application in the protection of a building at Val d'Isère. Proceedings of the 3rd Euro Mediterranean Symposium on Advances in Geomaterials and Structures - AGS 2010, Djerba, Tunisia, 277-282.
- Maegawa, K., Tajima, T., Yokota, T., Tohda, M., 2011. Slope-rockfall tests on wall embankments reinforced with geosynthetics. Proceedings of the 6th international structural engineering and construction conference, Zürich, Switzerland, 641-646.
- Peila, D., Oggeri, C., Castiglia, C., Recalcati, P., Rimoldi, P., 2002. Testing and modelling geogrid reinforced soil embankments to high energy rock impacts. Proceedings of the 7th International conference on geosynthetics, Nice, France, 133-136.
- Peila, D., Oggeri, C., Castiglia, C., 2007. Ground reinforced embankments for rockfall protection: design and evaluation of full-scale tests. Landslides 4 (3), 255-265.
- Plassiard, J.-P., Donzé, F.-V., 2009. Rockfall impact parameters on embankments: a discrete element method analysis. Structural engineering international 19 (3), 333-341.

- ONR (2013), ÖNORM 24810: Technischer Steinschlagschutz – Begriffe, Einwirkungen, Bemessung und konstruktive Durchbildung, Überwachung und Instandhaltung, ASI Austrian Standards Institute (Österreichisches Normungsinstitut), Ausgabe 15,01,2013,
- Simons, M., Pollak, S., Peirone, B., 2009. High-energy rock fall embankment constructed using a freestanding woven wire mesh reinforced soil structure. 60th Highway Geology Symposium, Buffalo, New York, pp. 290-301.
- UNI (2012), UNI 11211-4:2012: Opere di difesa dalla caduta massi - Parte 4: Progetto definitivo ed esecutivo (in Italian).
- Wyllie, D.C., 2014. Rock Fall Engineering. CRC Press. 270 p.
- Yoshida, H., 1999. Recent experimental studies on rockfall control in Japan. Proceedings of the Joint Japan-Swiss Scientific Seminar on Impact load by rock fall and design of protection structures, Kanazawa, Japan, 69-78.

© 2020 - Cerema

Le Cerema, l'expertise publique pour le développement et la cohésion des territoires.

Le Cerema est un établissement public qui apporte un appui scientifique et technique renforcé dans l'élaboration, la mise en oeuvre et l'évaluation des politiques publiques de l'aménagement et du développement durables. Centre de ressources et d'expertise, il a pour vocation de produire et de diffuser des connaissances et savoirs scientifiques et techniques ainsi que des solutions innovantes au coeur des projets territoriaux pour améliorer le cadre de vie des citoyens. Alliant à la fois expertise et transversalité, il met à disposition des méthodologies, outils et retours d'expérience auprès de tous les acteurs des territoires : collectivités territoriales, services de l'État et partenaires scientifiques, associations et particuliers, bureaux d'études et entreprises.

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (loi du 11 mars 1957). Cette reproduction par quelque procédé que se soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Coordination et suivi d'édition › Cerema Infrastructures de transport et matériaux, Département de la valorisation technique, Pôle édition multimédia.

Mise en page › Cerema

Illustration couverture › © ONF-RTM

Octobre 2020

ISBN : 978-2-37180-481-4

ISSN : 2276-0164

Gratuit

Éditions du Cerema

Cité des mobilités

25 avenue François Mitterrand

CS 92803

69674 Bron Cedex

Pour commander nos ouvrages › www.cerema.fr

Pour toute correspondance › Cerema - Bureau de vente - 2 rue Antoine Charial - CS 33927 - 69426 Lyon Cedex 03

ou par mail › bventes@cerema.fr

www.cerema.fr › Nos publications

La collection « Connaissances » du Cerema

Cette collection présente l'état des connaissances à un moment donné et délivre de l'information sur un sujet, sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Elle offre une mise à jour des savoirs et pratiques professionnelles incluant de nouvelles approches techniques ou méthodologiques. Elle s'adresse à des professionnels souhaitant maintenir et approfondir leurs connaissances sur des domaines techniques en évolution constante. Les éléments présentés peuvent être considérés comme des préconisations, sans avoir le statut de références validées.

Recommandations pour la conception, le suivi de réalisation et l'exploitation des dispositifs de protection par merlons pare-blocs

Alors que plusieurs centaines de dispositifs de protection par merlon ont été construits en France depuis le milieu du XX^e siècle, ce document propose les premières recommandations pour leur conception, leur dimensionnement, leur réalisation et leur exploitation.

Elles sont issues du retour d'expérience des membres du collectif de rédaction. Elles devront être améliorées pour ce qui concerne notamment l'utilisation des données issues des simulations trajectographiques, le détail du dimensionnement sous sollicitation dynamique (définition et quantification des actions, combinaisons d'actions, coefficients de sécurité, etc.), et les opérations de réparation et de réhabilitation. Un élargissement des retours d'expérience permettra de partager d'autres pistes de préconisations et recommandations.

Un complément et une évolution de ces recommandations sont prévus dans le cadre de C2ROP 2 pour aboutir à un guide technique.

Sur le même thème, les autres publications du Projet C2ROP

Axe Aléas

Glossaire du risque rocheux

Caractérisation de l'aléa éboulement rocheux : Etat de l'art

Axe Parades

Merlons pare-blocs : Recommandations pour la conception, le suivi de réalisation et la maintenance

Les Ouvrages Déflecteurs : Guide technique

Surveillance instrumentale pour la gestion du risque rocheux : Recommandations

Axe Risque

Prise en compte des risques rocheux par les Maîtres d'Ouvrage gestionnaires d'infrastructures : Recommandations

Cahier des charges type pour l'étude de l'aléa éboulement rocheux et la définition des travaux

Cahier des charges type pour les travaux de protection contre les éboulements rocheux

Mémento des ouvrages de protection contre les éboulements rocheux : Maintenance et Coûts

Aide à la formalisation de retours d'expérience à la suite d'un événement rocheux sur infrastructures de transport : Note méthodologique

Aménagement et cohésion des territoires - Ville et stratégies urbaines - Transition énergétique et climat - Environnement et ressources naturelles - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Infrastructures de transport - Habitat et bâtiment

Gratuit

ISSN : 2417-9701

ISBN : 978-2-37180-481-4



9 782371 804814

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement - www.cerema.fr

Infrastructures de transport et matériaux - 110 rue de Paris - 77171 Sourdun - Tél. +33 (0)1 60 52 31 31

Siège social : Cité des mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél. +33 (0)4 72 14 30 30