Interreg

Cofinancé par l'Union Européenne
Cofinanziato dall'Unione Europea

France – Italia ALCOTRA

BECCA

Projet BECCA n°20148
Programme ALCOTRA France-Italie 2021/2027

RETENUES COLLINAIRES ET D'ALTITUDE

Recommandations pour la conception, la réalisation, la surveillance, l'entretien et la réhabilitation

SBARRAMENTI COLLINARI E MONTANI

Linee guida per la progettazione, la realizzazione, il monitoraggio, la manutenzione e il recupero



Région Autonome Vallée d'Aoste
Regione Autonoma Valle d'Aosta

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

INRAE

1859 Politecnico di Torino

UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC

REGIONE PIEMONTE

REPUBBLICA ITALIANA

Pour citer cet ouvrage :

Peyras L., Stoltz G., Barbero M., Barpi F., Ganora D., coord. 2026. Retenues collinaires et d'altitude. Recommandations pour la conception, la réalisation, la surveillance, l'entretien et la réhabilitation. Projet BECCA, programme Interreg VI-A ALCOTRA France-Italie 2021/2027 – n° 20148. DOI : 10.5281/zenodo.23218346

Retenues collinaires et d'altitude

Recommandations pour la conception, la réalisation, la surveillance, l'entretien et la réhabilitation

Sous la coordination de :
Laurent Peyras, Guillaume Stoltz (INRAE, France),
Monica Barbero, Fabrizio Barpi, Daniele Ganora (École polytechnique de Turin, Italie)



Crédit photo © Rudy Guillot

Projet BECCA – Bassins soutenables pour l'écologie et sûrs, conçus pour l'adaptation au changement climatique
Programme Interreg VI-A ALCOTRA France-Italie 2021/2027 – n° 20148

Livrable WP 3.1

Novembre 2026

Auteurs

La coordination générale du guide a été réalisée par :

- Laurent Peyras et Guillaume Stoltz : INRAE, France ;
- Monica Barbero, Fabrizio Barpi et Daniele Ganora : École polytechnique de Turin, Italie.

L'équipe projet qui a contribué à la rédaction du guide a été composée des membres suivants :

- Laurent Peyras, Guillaume Stoltz, Samuel Westrelin, Maëlys Rey, Gabriel François, Guillaume Veylon, Corinne Curt, Pierre Berteloot, Virginie Diouloufet, Hamza Tahir : INRAE UMR RECOVER, Aix-en-Provence, France ;
- Monica Barbero, Fabrizio Barpi, Elia Buono, Pierluigi Claps, Valerio De Biagi, Daniele Ganora, Alberto Godio, Maddalena Marchelli, Daniele Martinelli, Daniele Peila, Davide Poggi, Carmine Todaro, Gianmarco Vallero : École polytechnique de Turin, Italie ;
- Florent Arthaud, Benjamin Gerfand : université Savoie Mont Blanc (USMB), Chambéry, France ;
- André Evette, Stéphanie Gaucherand : INRAE LESSEM, Grenoble, France ;
- Giulia Bodrato, Salvatore La Monica, Davide Patrocco : région du Piémont, Turin, Italie ;
- Paolo Ropele, Franco Colle : Région Autonome Vallée d'Aoste, Italie ;
- Dominique Laigle : INRAE IGE, Grenoble, France.

Sommaire

Auteurs 5

Table des tableaux 11

Table des figures 11

Chapitre 1. Introduction 13

Chapitre 2. Analyse des risques affectant les bassins dans les zones collinaires et montagneuses de la France et de l'Italie 17

Risques hydrologiques, y compris les risques d'inondation torrentielle 18

Introduction – Périodes de retour de référence 18

Caractérisation du bassin-versant 19

Méthodes pour caractériser les crues de projet 19

Risques géologiques et géotechniques 21

Chutes de pierres ou de blocs 21

Éboulements 22

Glissements de terrain 22

Glissement de couche superficielle 23

Mouvements gravitaires profonds des versants 23

Instabilités souterraines 23

Présence de glacier rocheux 24

Risque sismique 24

Risques spécifiques aux zones de montagne 24

L'aléa avalanche 24

Laves torrentielles ou écoulements fortement chargés 25

Effets de la glace et de la neige 26

Basses températures pendant les phases de construction 26

Rayonnement ultraviolet 26

Étude de l'onde de rupture 26

Principes généraux pour l'étude de l'onde de rupture 26

Aperçu théorique du calcul de l'onde de rupture sans transport solide intense 27

Modèles numériques : 1D, 2D et modèles avancés 28

Modèles hydrauliques de rupture au droit du barrage 29

Phénomènes torrentiels pouvant être générés par l'onde de rupture 29

Chapitre 3. Conception et réalisation de retenues nouvelles, de petite et moyenne taille, en remblai et étanchées par géomembrane 33

Typologie des retenues collinaires et d'altitude dans la zone transfrontalière France-Italie 34

Caractérisation géologique et géotechnique 35

Analyse des données historiques 35

Études géologiques 35

Étude géostructurale 37

Investigations géophysiques 37

Investigations géotechniques 38

Essais *in situ* 39

Essais en laboratoire 40

Synthèse géologique et géotechnique – Modèles géologique et géotechnique 44

Justification des petites et moyennes retenues en remblai 45

Les situations de projet 45

Calcul des actions et des sollicitations 48

Valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques 50

États-limites et justifications correspondantes 51

Conception et réalisation des ouvrages géotechniques 53

Préparation du terrain de fondation 53

Conception des remblais 54

Dispositifs de drainage 57

Phasage et contenu des études de conception des ouvrages géotechniques 58

Conception et réalisation d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane 60

Paramètres principaux de conception et d'exploitation des DEG 60

Composition, conception et réalisation d'un DEG 63

Installation et inspection du DEG 69

Conception des ouvrages associés 71

L'évacuateur de crues 71

Ouvrages de vidange et de prise d'eau, conduites sous remblai 74

Protection contre les chutes de pierres, les glissements de terrain et les avalanches 77

Dispositifs d'auscultation 81

Intégration environnementale des retenues 82

Principes généraux pour le choix du site 83

Principes généraux pour une nouvelle retenue 83

Conception des talus en aval, de la crête et des déblais 84

Conception des talus en amont incluant des zones refuges écologiques 85

Les ingénieries pour la conception des retenues intégrées dans leur environnement 88

Chapitre 4. Opération d'entretien sur des bassins de petite et moyenne taille 89

Le rôle du propriétaire et les différents acteurs de l'entretien et de la maintenance des retenues 90

Surveillance du barrage 90

La surveillance visuelle 91

La visite technique approfondie (France) 92

Auscultation 93

Entretien et maintenance du dispositif d'étanchéité par géomembrane 94

Entretien et maintenance des structures hydrauliques 95

Évacuateur de crues 95

Vidange et prise d'eau 95

Entretien du dispositif de drainage et d'auscultation 96

Entretien de la végétation 96

Références 99

Table des tableaux

Tableau 1. Perméabilité des sols ... 43
Tableau 2. Accélérations à considérer ... 49
Tableau 3. Valeurs de vie nominale et coefficients d'usage ... 50
Tableau 4. Valeurs indicatives des pentes maximales des talus d'un barrage en terre et en matériaux grossiers sur fondation non compressible ... 54
Tableau 5. Les grandes étapes de conception durant les deux phases du projet ... 59
Tableau 6. Comparaison des géomembranes exposées aux géomembranes recouvertes ... 70
Tableau 7. Principes de conception standard du dispositif d'auscultation ... 81
Tableau 8. Principes de l'auscultation des barrages d'altitude selon leur classe géométrique ... 82
Tableau 9. Mesures de végétalisation de l'ouvrage ... 85

Table des figures

Figure 1. Exemple d'une courbe de fréquence des crues ... 18
Figure 2. Retenue d'eau en déblai-remblai ... 54
Figure 3. Enrochement sur la partie supérieure du talus en amont pour des raisons paysagères ... 55
Figure 4. Coupe de détail associant la hauteur du remblai et la revanche (R) (PHE : niveau des plus hautes eaux en crue ; RN : retenue normale) ... 56
Figure 5. Drainage avec géomembrane recouverte et remblai semi-perméable ... 57
Figure 6. Composition d'un DEG selon la norme NF P 84-500 ... 64
Figure 7. Évacuateur de crues obstrué par une congère (photo prise au mois de juin) (crédit : © INRAE) ... 73
Figure 8. Coupes types d'évacuateurs de crues rustiques ... 75
Figure 9. Raccordement entre conduite et DEG (Peyras et Mériaux, 2009) ... 77
Figure 10. Ouvrage d'entonnement ... 77
Figure 11. Plan général d'une retenue d'eau avec une zone refuge ... 84
Figure 12. Coupe générale d'un talus avec une zone refuge ... 86
Figure 13. Coupe d'une zone refuge étroite avec confinement ... 87
Figure 14. Coupe d'une zone de refuge large avec bêche en béton ... 88

CHAPITRE 1

Introduction



En 2022, tous les indicateurs climatiques montrent des conditions plus sèches que la moyenne dans une grande partie de l'Europe. Les effets combinés de faibles précipitations et de températures élevées ont conduit à une sécheresse généralisée et de longue durée, affectant notre environnement et de nombreux secteurs économiques de la société. Les plus grands déficits pluviométriques ont été enregistrés dans l'arc alpin (source : Copernicus), avec des conséquences importantes sur la population et sur l'économie des zones de montagne. Les conditions critiques observées en 2022 confirment le changement climatique constaté ces dernières décennies et ses graves impacts sur les territoires alpins : des sécheresses estivales sévères, préjudiciables à l'agriculture de montagne, à l'approvisionnement en eau potable, à la prévention des incendies et à la production hydroélectrique ; et, avec l'augmentation des températures, un enneigement hivernal insuffisant, pénalisant les stations de sports d'hiver.

Les acteurs territoriaux travaillent pour identifier des solutions d'adaptation au changement climatique à la fois efficaces et durables. Parmi les mesures privilégiées figure la création de petites et moyennes retenues destinées à stocker de l'eau, afin d'adapter les territoires de montagne aux nouveaux aléas climatiques, de maintenir les activités économiques et d'assurer un niveau de sécurité adéquat aux populations résidentes. Toutefois, les autorités de contrôle françaises et italiennes constatent que ces ouvrages, dans la région transfrontalière, peuvent engendrer des risques sur les populations en cas de défaillance, ainsi que des impacts significatifs sur l'environnement et les milieux naturels.

Le projet européen BECCA (Bassins soutenables pour l'écologie et sûrs, conçus pour l'adaptation au changement climatique), financé par le programme européen Interreg VI-A ALCOTRA France-Italie, vise à donner les outils pour concevoir des retenues sûres et pour réhabiliter les retenues existantes grâce à des techniques fondées sur la nature. Ce projet se concentre sur la zone transfrontalière France-Italie correspondant à l'arc alpin, mais les résultats sont largement transposables à d'autres territoires de montagne ou de piémont.

Dans le cadre du projet BECCA, piloté par la Région Autonome Vallée d'Aoste, ce guide constitue l'un de ses livrables principaux. Il s'agit d'un guide de recommandations techniques pour la conception, la construction, la réhabilitation et la gestion des petites et moyennes retenues. Ces recommandations proposent des solutions simples et économiques, conçues pour résister aux risques naturels et garantir un niveau de sécurité adéquat pour les populations situées en aval ; une attention particulière est accordée aux enjeux environnementaux dès la phase de conception, afin de réduire les impacts écologiques. Le présent guide formule en outre des techniques opérationnelles pour la naturalisation et la vitalisation des retenues, fondées sur des solutions inspirées de la nature.

Sur le plan technique, le guide BECCA détaille la conception des retenues d'altitude et collinaires en montagne et en zone de piémont dans le territoire alpin franco-italien, même si la plupart des principes énoncés s'appliquent plus largement aux autres massifs montagneux, voire en plaine. Il constitue un cadre technique pour la conception, la réalisation et la réhabilitation de ces ouvrages, en intégrant des solutions fondées sur la nature, tout en conciliant sûreté, protection contre les aléas naturels, durabilité, respect de l'environnement et intégration paysagère soignée.

Il a été préparé par une équipe projet transfrontalière et pluridisciplinaire, composée des meilleurs spécialistes français et italiens, issus d'INRAE, de l'École polytechnique de Turin, de la région du Piémont, de l'université Savoie Mont Blanc et de la région autonome de la Vallée d'Aoste.

Le guide est décliné en deux versions linguistiques – italienne et française – afin d'en faciliter son appropriation par les professionnels concernés. Le contenu en est quasi identique ; les différences tiennent aux spécificités réglementaires et aux recommandations techniques propres à chaque pays. En outre, la version italienne intègre un chapitre 5 consacré à la réhabilitation des barrages anciens, chapitre absent de la version française, ce thème étant moins prégnant en France.

CHAPITRE 2

Analyse des risques affectant les bassins dans les zones collinaires et montagneuses de la France et de l'Italie



Risques hydrologiques, y compris les risques d'inondation torrentielle

Introduction – Périodes de retour de référence

Les dangers d'origine hydrologique et hydraulique peuvent être considérés sous deux angles différents :

1. les risques liés aux crues ;
2. les risques liés aux inondations en aval du barrage, non générées par des crues naturelles, mais par la rupture du barrage lui-même.

Un autre phénomène pouvant affecter certains types d'ouvrages est la variation soudaine du débit sortant dans le lit du cours d'eau en aval du barrage, due à des manœuvres rapides sur les organes de prise d'eau et de régulation des installations dérivées du réservoir.

L'évaluation des crues entrant dans le réservoir est d'une importance essentielle pour la conception des évacuateurs de crues, qui permettent d'évacuer le débit entrant sans provoquer d'élévation du niveau du réservoir susceptible d'endommager ou de submerger les ouvrages. Ce mécanisme est particulièrement important pour les barrages en terre, qui s'érodent facilement lorsqu'ils sont submergés, entraînant la rupture de la structure.

Les débits de référence – crue exceptionnelle et crue extrême – à utiliser pour les justifications hydrauliques des ouvrages sont associés à des événements hydrologiques caractérisés par de très faibles probabilités d'occurrence. Dans les évaluations simples souvent utilisées pour les petites retenues, on considère uniquement la valeur maximale du débit (débit de pointe) de l'événement de référence, tandis que le volume de la crue ou la forme de l'hydrogramme complet ne sont pas pris en compte. Lorsque le bassin-versant est petit et que le volume

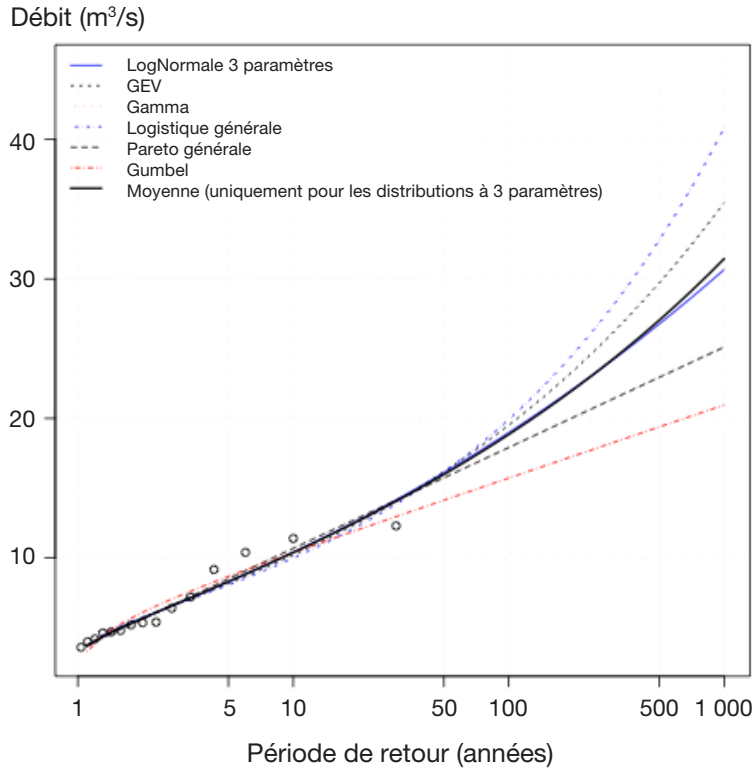


***Figure 1**. Exemple d'une courbe de fréquence des crues*

d'eau générée par la crue est du même ordre de grandeur que le volume de la retenue, il est recommandé de prendre en compte également le volume de la crue qui sera laminé par la retenue. Dans la suite, la plupart des méthodes et les considérations présentées peuvent être étendues à des évaluations intégrant le volume de la crue.

L'occurrence d'un événement hydrologique est exprimée en termes de période de retour, c'est-à-dire l'inverse de la probabilité annuelle de dépassement. Pour obtenir les débits de référence, il est nécessaire de définir la courbe de fréquence des crues, dont la figure 1 montre un exemple.

Les probabilités de référence à prendre en compte pour définir l'aléa hydrologique sont fixées dans les règlements nationaux et dans les recommandations professionnelles. En France, l'arrêté du 6 août 2018 fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages (ATB) définit les crues de référence. Pour les projets de petites retenues en remblai, deux crues de référence sont à considérer :

- la crue exceptionnelle associée à la période de retour de 1 000 ans ;
- la crue extrême associée à la période de retour de 10 000 ans.

Caractérisation du bassin-versant

La première étape de l'analyse hydrologique consiste à caractériser le bassin-versant qui est intercepté par la retenue (directement par le réservoir ou par des ouvrages de prise d'eau). Il est possible, en particulier en milieu de montagne, qu'il y ait plusieurs bassins-versants contributeurs. Cette caractérisation consiste à identifier la partie du territoire qui, d'un point de vue topographique, se déverse dans la retenue. Cela peut être réalisé à l'aide d'algorithmes SIG sur la base d'un modèle numérique de terrain (MNT). Pour ce type d'opération, une résolution décamétrique du MNT est suffisante, même si des MNT à plus haute résolution sont couramment disponibles de nos jours. Cette opération se déroule généralement en deux étapes :

- la génération de la carte des directions d'écoulement à partir du MNT et la définition du réseau hydrographique. Ce dernier a la même résolution que le MNT de départ et peut ne pas correspondre parfaitement au réseau de l'écoulement réel. Il appartient à l'utilisateur de vérifier la correspondance topologique entre le réseau virtuel et le réseau réel ;
- la délimitation du bassin-versant proprement dit à partir de la carte des directions d'écoulement générée précédemment et des coordonnées de la section de fermeture du bassin identifiées sur le réseau hydrographique virtuel.

Méthodes pour caractériser les crues de projet

Il existe de nombreuses démarches et méthodes hydrologiques pour estimer les débits de crues de référence (crue exceptionnelle et crue extrême) du projet. Le choix d'une démarche va dépendre de la précision souhaitée dans l'évaluation en lien avec les données disponibles. En général, les évaluations hydrologiques sont entachées d'incertitudes élevées. Il est donc nécessaire, en particulier lorsqu'il faut se référer à des périodes de retour élevées, d'appliquer plusieurs méthodes et de fonder l'estimation finale sur une comparaison et une évaluation critique des résultats obtenus.

Les approches hydrologiques peuvent être classées en deux grandes catégories de modèles :

- les méthodes basées sur l'analyse statistique des valeurs de débit. En général, pour les projets qui intéressent le présent guide, on ne dispose pas d'observation directe sur le site concerné. Dans le cas où des données sont disponibles, on pourra les utiliser, mais elles ne

seront pas suffisantes car les périodes de retour de conception de ces ouvrages sont élevées. On a donc recours à des approches de type régional, dans lesquelles les observations de débit utiles à l'estimation de la courbe de fréquence des crues ont été déduites à partir de stations de mesure d'autres bassins ;

• les méthodes basées sur la transformation des pluies en débits à l'aide d'un modèle pluie-débit qui représente, de manière plus ou moins simplifiée, la dynamique du bassin. Ces méthodes nécessitent la définition des événements pluviométriques de référence qui, par hypothèse, ont le même temps de retour que l'événement de crue considéré.

Pour des estimations rapides, les méthodes régionales peuvent être utilisées. Elles s'appliquent aux bassins-versants de taille moyenne (de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres carrés) et présentent l'avantage de permettre une estimation à partir d'informations de base sur le bassin-versant (position géographique, superficie, altitude moyenne, etc.) ou d'informations pouvant être obtenues par de simples opérations SIG (pente moyenne, catégories d'utilisation des sols, précipitations annuelles moyennes, etc.). Ces méthodes régionales s'appuient sur des études statistiques régionales et permettent de fixer un ordre de grandeur, généralement pour des périodes de retour d'événements assez faibles (typiquement de 10 ans ou de 100 ans).

En outre, pour des estimations rapides et lorsque les méthodes d'analyse régionale ne sont pas pertinentes, la méthode rationnelle peut être appropriée. Elle fait intervenir la superficie du bassin-versant, l'intensité des précipitations, le temps de concentration du bassin-versant et le coefficient de ruissellement. La méthode rationnelle suppose que le coefficient de ruissellement est constant, que l'intensité des précipitations est constante pendant toute la durée de l'événement et que les précipitations sont uniformément réparties sur le bassin-versant.

La démarche complète la plus adaptée aux bassins-versants non jaugés, ce qui est le cas général des sites traités dans ce guide, consiste à recourir à des méthodes basées sur la transformation des pluies en débits. Il existe de nombreux modèles pluie-débit, avec différents degrés de complexité et le choix de la méthodologie spécifique du modèle dépend de la complexité de l'étude de cas. En France, la méthode du Gradex est très utilisée par l'ingénierie. Pour ces méthodes basées sur la transformation des pluies en débits, on veillera à respecter certaines recommandations :

• les données pluviométriques doivent être aussi récentes que possible ;

• dans la mesure du possible, le modèle pluie-débit doit être validé sur des bassins-versants aussi semblables que possible que celui étudié, pour lesquels on dispose d'observations, afin de vérifier que le choix des paramètres est approprié (les paramètres les plus pertinents sont généralement la perméabilité des sols et les temps de réponse des bassins). Toutefois, pour les bassins-versants de petite taille, il n'est souvent pas possible de disposer de mesures hydrométriques, même sur d'autres sites ;

• compte tenu de la grande incertitude associée aux estimations hydrologiques, il est conseillé, dans la mesure du possible, d'utiliser plusieurs méthodes et d'en comparer les résultats.

Enfin, il existe des méthodes hydrologiques basées sur des simulations stochastiques des pluies, associées à un modèle pluie-débit. Ces méthodes présentent l'avantage de permettre la simulation de multiples scénarios hydrologiques associés à une même probabilité. En France, il existe une base nationale en accès libre développée par INRAE – la base SHYREG Pluies et Débits – qui permet de connaître sur tout le territoire français des quantiles de pluies et de débits. La base SHYREG est recommandée pour l'évaluation des débits de référence pour les projets de petites retenues sur le territoire français.

En définitive, il existe une grande variété de démarches et de méthodes hydrologiques plus ou moins complètes, qui doivent être examinées par le chargé d'étude en fonction du projet et des données disponibles. S'il n'est pas possible de recommander une démarche unique, une étude hydrologique doit au minimum contenir :

- une description morphologique du bassin-versant concerné ;
- l'identification des données hydrométriques disponibles et la délimitation des bassins instrumentés présents dans la zone d'étude et incluant le bassin-versant étudié ;
- l'identification des données pluviométriques disponibles dans la zone d'étude, qu'elles proviennent de stations ou de modèles de régionalisation existants ;
- l'identification des modèles régionaux disponibles pour la zone d'étude et la vérification de leur applicabilité au cas spécifique ;
- l'application de plusieurs méthodes à l'étude de cas, en privilégiant les méthodes basées sur la transformation des pluies en débits, et en utilisant en France systématiquement les bases SHYREG Pluies et Débits, et l'analyse critique des résultats.

Risques géologiques et géotechniques

Les aléas géologiques et géotechniques regroupent les aléas provenant du sol et du sous-sol. Intrinsèquement, les aléas géologiques sont d'origine naturelle, même s'ils peuvent être déclenchés ou amplifiés par la réalisation du projet. On distingue les mouvements gravitaires au sens large et les instabilités souterraines.

Les risques d'origine géologiques et géotechniques les plus importants à prendre en compte pour l'implantation, la conception et la justification des retenues d'altitude ou collinaires affectent les fondations superficielles et profondes de la retenue et de la zone environnante d'implantation de la retenue. Certains aléas géologiques peuvent se déclencher et se développer même loin de la retenue, tout en interagissant indirectement avec celle-ci. Il s'agit généralement d'instabilités des versants ou de fondations de différentes natures.

Ce chapitre présente rapidement les principaux aléas géologiques et géotechniques qui peuvent concerner les retenues d'altitude ou collinaires.

Chutes de pierres ou de blocs

Elles peuvent désigner l'instabilité d'un ou de plusieurs blocs rocheux (éboulements de blocs isolés et éboulements généralisés, respectivement). Lors de l'éboulement, les blocs peuvent atteindre des vitesses de l'ordre de 25 à 35 m/s, avec des énergies d'impact pouvant varier de quelques dizaines à des dizaines de milliers de kilojoules, ce qui peut avoir des effets potentiellement destructeurs. Les blocs en mouvement peuvent atteindre des positions très éloignées de la zone de détachement. Il existe des méthodes de calcul des trajectoires, tant bidimensionnelles que tridimensionnelles, qui, compte tenu du caractère aléatoire du phénomène et du degré élevé d'incertitude épistémique concernant les paramètres en jeu, s'appuient sur des approches stochastiques. Grâce à l'analyse des trajectoires, il est possible de déterminer si, et avec quelle probabilité, la dynamique du phénomène peut interagir avec la retenue, ses ouvrages annexes ou ses voies d'accès. Le déclenchement de l'éboulement dépend de la structure et de l'état de fracturation de la masse rocheuse concernée par le phénomène. L'ampleur du phénomène est définie par l'énergie cinétique du bloc en mouvement, et, par conséquent, l'estimation des volumes susceptibles de s'effondrer revêt

une importance particulière. Elle peut être effectuée sur la base des résultats de levés géomécaniques, de l'état de fissuration de la paroi et des débris au pied de celle-ci. Toutefois, la récurrence temporelle du phénomène reste, en l'état actuel des connaissances, difficile à estimer, car la corrélation entre les causes, par exemple les événements sismiques ou météorologiques (pluie, neige, glace, etc.), et le déclenchement du phénomène n'est pas facilement identifiable compte tenu de l'étendue généralement importante des zones de détachement potentiel et du caractère fortement aléatoire du phénomène.

Les effets néfastes potentiels des effondrements sur les ouvrages sont les suivants :

- endommagement structurel du barrage, avec des répercussions sur sa stabilité globale ;
- endommagement local du barrage et des éléments d'étanchéité ;
- endommagement ou destruction des ouvrages annexes ;
- obstruction ou endommagement des voies d'accès ;
- remplissage de la cuvette de la retenue avec réduction de sa capacité volumétrique (effet secondaire compte tenu du volume réduit des blocs instables) et possibilité de déclenchement d'une vague de crue.

La surveillance du phénomène n'est généralement pas possible en cas d'effondrements généralisés, en raison du nombre important de volumes potentiellement instables. Dans ces situations, il est préférable de changer de site pour l'implantation du projet.

Il est en revanche possible de surveiller les déplacements d'éléments rocheux individuels, bien définis en termes de géométrie et de position, mais la détermination des seuils du déclenchement des éboulements est complexe. L'atténuation du risque fait généralement appel à des ouvrages de protection, c'est-à-dire des interventions visant à réduire le risque que les blocs se détachant des parois atteignent le bassin (filets pare-pierres, remblais pare-pierres, etc.) (voir section « Protection contre les chutes de pierres, les glissements de terrain et les avalanches », p. 77). En cas d'effondrement de blocs isolés, il est possible de mettre en place des ouvrages de prévention capables d'empêcher leur détachement (interventions sur la paroi). Pour les projets de retenue nouvelle, cet aléa doit être évalué avec soin avant de retenir ou pas le site.

Éboulements

Ces phénomènes sont semblables, par leur origine, à ceux déjà décrits dans le cas des chutes de pierres ou de blocs, mais concernent globalement des volumes plus importants. Les éboulements impliquent des blocs rocheux de grande taille, qui interagissent entre eux pendant leur descente vers la vallée. Les considérations générales sont identiques à celles formulées pour les effondrements rocheux, mais le volume des matériaux en jeu est de nature à déclencher une vague de submersion. Dans ces situations, il est également préférable de changer de site pour l'implantation du projet.

Glissements de terrain

Des masses de terre ou de roche fortement fracturées peuvent se déstabiliser et glisser le long de surfaces de faiblesse telles que des failles ou des contacts entre des couches présentant des caractéristiques mécaniques ou hydrauliques différentes.

Le mouvement peut être lent ou rapide selon les caractéristiques mécaniques des sols et la morphologie du versant. Les glissements sont souvent déclenchés par des précipitations soutenues, par des événements sismiques ou par le déclenchement de glissements lors des travaux de construction.

Les glissements de terrain peuvent endommager l'ouvrage de retenue s'il touche les remblais, causer des dommages sur les ouvrages annexes, obstruer ou endommager les voies d'accès, remplir la retenue en réduisant son volume, déclencher une vague de crue et entraîner une turbidité de l'eau avec une augmentation de la fraction fine en suspension. Le retour d'expérience montre des abandons de projet en cours de chantier et il y a lieu à évaluer avec soin cet aléa.

La surveillance du glissement de terrain est généralement possible grâce à des techniques de surveillance des déplacements superficiels (mesures topographiques) ou profonds (inclinomètres) et du niveau de la nappe phréatique (piézomètres). Il est parfois possible de définir des valeurs seuils de déplacement et de les corréler avec l'intensité des précipitations.

Lorsqu'elle est possible, l'atténuation des risques peut parfois s'effectuer par des mesures de drainage et de stabilisation au moyen d'interventions structurelles (purges de volume de sol, butée de pied, murs de soutènement, par exemple).

Dans les zones où ces types de glissements de terrain sont présents, il convient d'éviter la construction de barrages.

Glissement de couche superficielle

Il s'agit de l'instabilité des couches superficielles du sol, généralement d'une épaisseur limitée. Parfois, ces glissements évoluent ou peuvent être à l'origine de laves torrentielles. Le mouvement peut être lent ou rapide selon les caractéristiques mécaniques des sols et la géométrie de la pente. Le déclenchement de ces phénomènes dépend de la géométrie de la pente et, souvent, d'épisodes pluvieux soutenus. Les effets de ce type de glissement sur les structures sont semblables à ceux des glissements de terrain, mais moins importants en raison du volume moindre de sol déplacé. Dans les sites où ce type de glissements de terrain est présent, il convient d'étudier avec soin les impacts potentiels sur le projet et, le cas échéant, éviter ce site. Lorsque le glissement est de faible amplitude et pour atténuer ses effets, on peut avoir recours à des interventions de stabilisation locale, notamment à l'aide de techniques d'ingénierie naturaliste.

Mouvements gravitaires profonds des versants

Il s'agit de glissements de terrain de grande ampleur qui impliquent une partie importante du versant et de grands volumes de matériaux. Ils peuvent présenter des surfaces de glissement multiples et profondes, difficiles à repérer. Les phénomènes géologiques associés à ces grands glissements sont souvent complexes à caractériser et à expliciter. Ce sont des phénomènes lents, voire très lents. Ils provoquent généralement d'autres types de glissements de terrain en surface (effondrements, glissements, etc.). Dans les zones où ces types de glissements de terrain sont présents, il convient d'éviter la construction de barrages.

Instabilités souterraines

Il s'agit d'instabilités liées généralement à la présence de karsts ou de poches de gypse qui peuvent entraîner des effondrements (rupture de grottes karstiques ou dissolution de gypse). Les phénomènes de suffusion (érosion souterraine affectant un matériau meuble hétérogène) peuvent également avoir un impact sur ces instabilités. Les fuites potentielles depuis la retenue augmentent cet aléa.

Les instabilités souterraines liées aux karsts peuvent être repérées par des affleurements de calcaires massifs, des formes de dolines et la présence de lapiaz. La présence de gypse

peut être identifiée par la présence de cargneules pouvant prendre la forme d'une roche vacuolaire jaunâtre formant des reliefs ruiniformes. Dans le cas des phénomènes de suffusion, la présence d'instabilités souterraines peut prendre différentes formes telles que des entonnoirs d'ablation ou des folletières qui vont donner naissance en aval à des émergences localisées avec des eaux chargées. Pour les repérer, il faut prêter attention aux indices de tassement ou aux fontis visibles sur les terrains de couvertures.

Présence de glacier rocheux

La présence d'un glacier rocheux sur un site envisagé pour la construction d'une retenue d'altitude conduit à écarter ce site. En effet, la réalisation d'une retenue au-dessus d'un glacier conduirait à réchauffer la glace et à induire une surcharge importante, provoquant l'accélération de la fonte des glaces et des mouvements de fluage. Cela conduira à des affaissements et des glissements considérables conduisant à la ruine du barrage à terme.

La présence de glacier rocheux doit être recherchée avec soin principalement dans les sites en haute altitude (> 2 000 m) et sur les versants nord. Les moyens de détection consistent en une analyse géologique du site, l'étude des cartes, et surtout des sondages par forages carottés profonds et avec une densité suffisante, accompagnés d'investigations géophysiques.

Risque sismique

L'évaluation des risques sismiques pour les barrages constitue une étape importante de la conception. Les réglementations européennes et nationales imposent des procédures d'analyse sismique rigoureuses, avec des niveaux de protection supérieurs à ceux des ouvrages de génie civil classiques.

En Europe, la conception parasismique des barrages est régie par l'Eurocode 8 (EN 1998), et plus précisément par sa partie 1 (EN 1998-1) relative aux principes généraux et sa partie 5 (EN 1998-5) concernant les fondations, les ouvrages de soutènement et les travaux géotechniques. Pour les grands barrages, les directives spécifiques de la Commission internationale des grands barrages (CIGB) et les réglementations nationales d'application s'appliquent également.

En France, l'arrêté technique du 6 août 2018 fixe la sollicitation sismique de référence à prendre en considération en fonction de la classe de l'ouvrage, de sa localisation géographique et des conditions géologiques de site. Cet arrêté est complété par le guide de recommandations du ministère de l'Environnement, « Risque sismique et sécurité des ouvrages hydrauliques » d'octobre 2014, qui indique les méthodes pour caractériser les aléas et justifier les ouvrages.

Risques spécifiques aux zones de montagne

Lorsque l'ouvrage de retenue est construit en zone de montagne, le choix de son emplacement et sa conception doivent tenir compte de certains aléas spécifiques à la montagne.

L'aléa avalanche

La neige accumulée au sol subit, en fonction des variations de température et des pressions exercées, des métamorphismes rapides qui en altèrent les caractéristiques physiques et mécaniques. Entre les différentes couches de neige, il peut se former des couches fragiles,

susceptibles de provoquer une instabilité du manteau neigeux par glissement. Selon la dynamique d'écoulement, deux classes d'avalanches peuvent se produire : les avalanches coulantes, c'est-à-dire en contact avec la surface, ou les avalanches sous forme d'aérosol, généralement constituées de neige sèche. L'aérosol est composé de neige en suspension dans l'air (masse volumique de quelques kg/m^3), se déplaçant à grande vitesse sur de forts dénivelés et qui tend à conserver une direction identique. L'avalanche dense (coulante), quant à elle, sera constituée de neige de plusieurs centaines de kg/m^3 et sera très tributaire du relief.

L'impact des avalanches peut générer des effets directs, endommageant les composants de l'ouvrage de retenue, ou indirects tels que l'élévation du niveau du réservoir ou la formation d'une vague dans le bassin. La trajectoire et l'impact d'une avalanche peuvent être estimés par les enquêtes de terrains. En France, les cartes de localisation des phénomènes d'avalanches (CLPA) permettent la reconnaissance des sites avalancheux. Enfin, des modélisations du mouvement de l'avalanche peuvent également être produites.

Le guide *Retenues d'altitude* publié en 2009 (Peyras et Mériaux, 2009) sert de référence en France pour la caractérisation de l'aléa avalanche et pour les critères de décision sur l'acceptabilité d'un site sur lequel un projet de retenue est envisagé vis-à-vis de cet aléa. Nous renvoyons le lecteur à ces critères qui restent d'actualité.

Pour atténuer le risque d'avalanche si l'aléa est faible et peu fréquent, on peut avoir recours à des structures à installer afin de contrôler le flux de dépôt de la neige (déflecteurs, brise-vent, etc.), ou à des ouvrages de protection à installer dans la zone de trajectoire de l'avalanche (dérivateurs, cales de freinage, barrières d'interception, etc.) afin d'en réduire la vitesse et la distance d'arrêt ou d'en dévier la trajectoire.

Laves torrentielles ou écoulements fortement chargés

Ces phénomènes sont provoqués par l'érosion, c'est-à-dire la perte de stabilité de dépôts sédimentaires sous l'action de l'écoulement d'eau. Le mélange eau-sédiments qui en résulte peut, selon les conditions, présenter une concentration en matériau solide très élevée. Pour les laves torrentielles, cette concentration solide dépasse 50 % en volume et la vitesse de propagation de ce phénomène est rapide, voire extrêmement rapide (0,5 à 20 m/s). Les matériaux concernés vont de l'argile à des blocs pouvant atteindre plusieurs mètres de diamètre, avec une présence possible de matière organique. Du fait de leur grande mobilité, ces phénomènes peuvent parcourir de grandes distances, mobiliser des volumes très importants (quelques milliers à centaines de milliers de m^3) et générer des impacts particulièrement destructeurs. Les phénomènes torrentiels moins concentrés, de type charriage, se traduisent principalement par des dépôts localisés de sédiment, à l'origine de débordements, ou par des érosions qui peuvent déstabiliser les fondations des constructions et provoquer leur ruine. Le déclenchement de ces phénomènes dépend de la configuration du bassin-versant et, dans la majorité des cas, ils sont liés à des précipitations intenses.

Les effets néfastes potentiels de l'impact des crues et des laves torrentielles sur les ouvrages sont les suivants : endommagement de l'ouvrage de retenue avec des répercussions sur sa stabilité globale, endommagement local de l'ouvrage de retenue et des ouvrages d'étanchéité ; endommagement ou destruction des ouvrages annexes ; obstruction ou endommagement des voies d'accès, envahissement du bassin de retenue avec réduction de son volume, possibilité de déclenchement d'une vague de submersion, turbidité de l'eau avec augmentation de la fraction fine des sédiments en suspension. Il n'est généralement pas possible de surveiller directement le déclenchement du phénomène, mais, étant donné que celui-ci est souvent lié aux précipitations, il est possible de surveiller ce facteur, de définir les conditions propices

au déclenchement et, par conséquent, d'identifier des seuils d'alerte. L'atténuation du risque peut parfois se faire à l'aide d'ouvrages de protection, comme des seuils de correction torrentiels ou des plages de dépôt.

Effets de la glace et de la neige

La prise en glace de l'eau de la retenue et la couche de neige déposée sur l'ouvrage de retenue peuvent générer de fortes sollicitations, induites par leur mouvement lent et leur forte capacité d'entraînement, dues à l'interaction avec le matériau constituant le remblai. Ce processus peut en outre détériorer la géomembrane d'étanchéité.

Les plaques de glace qui pourraient se former à la surface du bassin peuvent, en se déplaçant, heurter le remblai et générer des contraintes supplémentaires.

Basses températures pendant les phases de construction

Les basses températures peuvent avoir une incidence significative sur les phases de construction d'un barrage en terre, notamment lors des opérations d'excavation, de transport et de compactage des matériaux. Lorsque le sol est gelé ou partiellement gelé, il devient difficile de le compacter correctement, ce qui risque d'entraîner la formation de couches moins homogènes et d'une densité insuffisante. De plus, le gel peut provoquer la formation de glace dans les pores du sol, ce qui, lors du dégel, entraîne des variations de volume et une perte de stabilité dans les couches déjà mises en place. C'est pourquoi, lors de la construction de barrages en terre, il est nécessaire de suspendre ou de limiter certains travaux pendant les périodes de froid.

Il en est de même pour les opérations de coulage de béton sur les ouvrages annexes (évacuateur de crues, local technique, regards, etc.) qui doivent être réalisées en été.

Rayonnement ultraviolet

Le rayonnement ultraviolet (UV) est généralement plus intense en milieu de montagne. De plus, la neige et la glace peuvent réfléchir une partie du rayonnement solaire, augmentant encore davantage l'exposition globale aux rayons UV. Ce phénomène contribue à la dégradation des géomembranes utilisées pour l'étanchéité d'un barrage en terre, en particulier lorsqu'il s'agit de géomembranes avec polymères ou bitumineuses. Une exposition prolongée au rayonnement solaire provoque des phénomènes de vieillissement tels que la perte d'élasticité, la perte de résistance mécanique, le durcissement et la formation de microfissures. Avec le temps, ces processus peuvent réduire la capacité de la géomembrane à garantir l'étanchéité et à induire des mouvements du dispositif d'étanchéité. C'est pourquoi, lors de la conception et de l'entretien des barrages en altitude, il est important de prévoir des solutions de protection adéquates telles que le recouvrement des géomembranes par un rip-rap qui limite l'exposition directe à ces rayons.

Étude de l'onde de rupture

Principes généraux pour l'étude de l'onde de rupture

L'étude de l'onde de rupture a trois objectifs :

- caractériser l'écoulement dans la vallée à l'aval, selon la hauteur atteinte, la vitesse, le temps d'arrivée, et le reporter sur une carte ;

• décrire la nature des enjeux (infrastructures ou bâtiments potentiellement atteints, zones fréquentées par le public) et préciser les zones où il y a des risques pour la vie humaine ;

• conclure sur l'opportunité de la mise en place d'une procédure de sauvegarde et, s'il y a lieu, fournir les éléments nécessaires à une mise en place effective de cette procédure.

La rupture totale ou partielle d'un barrage entraîne une libération rapide du volume d'eau de la retenue et une vague de submersion. Du point de vue hydraulique, la vague provoquée par la rupture d'un barrage se caractérise par des temps d'arrivée, des valeurs de vitesse d'écoulement et des valeurs de hauteur d'eau. Les écoulements liés à l'onde de rupture présentent une forte non-stationnarité avec des variations rapides dans le temps.

Par ailleurs, tout écoulement résultant de la rupture d'un barrage est susceptible de se charger en matériau solide, et cela est particulièrement sensible en zone de montagne ou de piémont. Les phénomènes torrentiels qu'il faut redouter sont de deux natures : les phénomènes de charriage et les laves torrentielles.

Aperçu théorique du calcul de l'onde de rupture sans transport solide intense

Solutions analytiques

Les solutions analytiques pour le calcul de l'onde de rupture d'un barrage constituent des références importantes pour la compréhension des processus physiques.

La solution classique de Ritter (Ritter, 1892) décrit la rupture instantanée avec lit sec en aval, canal plat et très large et frottement négligeable : elle fournit un cadre utile comme référence de base et comme limite supérieure de la rapidité de propagation.

Des contributions ultérieures ont intégré l'effet de la rugosité (Dressler, 1952 ; Whitham, 1955). En général, ces solutions sont applicables à des scénarios très idéaux (géométries simples, paramètres constants, rupture instantanée) et représentent donc rarement des configurations réelles, mais elles restent utiles comme guide qualitatif pour interpréter l'influence de la rugosité et des conditions en aval sur la dynamique de l'onde.

Formules empiriques pour le débit de pointe au droit du barrage

Il existe dans la littérature de nombreuses formules empiriques pour déterminer le débit de pointe de l'onde de rupture au droit du barrage, Q_p. Elles sont principalement utilisées pour des estimations rapides ou pour attribuer un ordre de grandeur aux paramètres de brèche. Un résumé des relations classiques (avec unité SI) est présenté ci-dessous :

Kirkpatrick (1977)	$Q_p = 2{,}681 H_w^{2{,}302} + 52$
USBR (1982)	$Q_p = 1{,}19 H_w^{1{,}85}$
Evans (1986)	$Q_p = 0{,}72 V_w^{0{,}53}$
MacDonald et Langridge-Monopolis (1984)	$Q_p = 1{,}154 \left(H_w V_w\right)^{0{,}412}$
Froehlich (1995)	$Q_p = 1{,}154 \left(H_w V_w\right)^{0{,}412}$

Où H_w est la hauteur de l'eau au-dessus de l'altitude de fond brisée au moment de l'effondrement (m) et V_w est le volume d'eau « efficace » associé à l'effondrement (m^3), avec des définitions qui peuvent varier entre les auteurs et les ensembles de données.

Ces relations proviennent de jeux de données hétérogènes (matériaux, mécanismes d'effondrement, conditions hydrologiques) et présentent des incertitudes élevées. L'intervalle de validité (dimensions barrage-réservoir) peut être limité et le débit de pointe ne décrit pas à lui seul la dangerosité de la rupture du barrage, celle-ci dépendant également de la durée de la vidange de la retenue, du volume libéré et de son évolution dans le temps. Dans une démarche complète, il est donc recommandé de déterminer un hydrogramme de rupture à l'aide de modèles de brèche, qui pourra ensuite être exploité dans un modèle numérique.

Modèles numériques : 1D, 2D et modèles avancés

Les solutions analytiques (Ritter, Dressler, etc.) et les formules empiriques pour déterminer le débit de pointe au droit du barrage sont utiles pour la compréhension et le contrôle rapide, mais elles ne sont pas suffisantes lorsque :

- la vallée est irrégulière et complexe (plaine d'inondation, zones urbaines, infrastructures, variations de pente et de largeur) ;
- la rugosité est fortement variable (végétation, bâtiments, cultures) ;
- il faut produire des cartes d'inondation (hauteur d'eau et vitesse dans le temps) et pas seulement des grandeurs ponctuelles ;
- il est nécessaire d'évaluer plusieurs scénarios et de procéder à des analyses de sensibilité.

Pour ces raisons, l'approche classique pour les études d'onde de rupture est la suivante :

1. définir le ou les scénarios de rupture et générer un hydrogramme de rupture au droit du barrage (modèle hydraulique de rupture au droit du barrage) ;
2. propager en aval l'hydrogramme de rupture avec un modèle hydrodynamique ;
3. produire des cartes d'inondation, et éventuellement de vulnérabilité, de dommages et de risques.

Modèles 1D (Saint-Venant 1D)

Les modèles 1D (utilisés par exemple dans le code HEC-RAS 1D développé par l'US Army Corps of Engineers) résolvent les équations de propagation le long de l'axe principal du cours d'eau en utilisant des sections transversales. Ils sont rapides et robustes, mais l'hypothèse 1D devient limitante lorsque :

- l'onde de rupture se propage dans de grandes plaines ;
- l'écoulement est complexe (présence de bifurcations ou de zones urbanisées) ;
- la direction du mouvement n'est pas parallèle à l'axe de la rivière.

En pratique, ils sont souvent appropriés pour des vallées étroites, où la composante latérale est secondaire.

Modèles 2D (SWE 2D)

Les modèles 2D (utilisés par exemple dans le code HEC-RAS 2D développé par l'US Army Corps of Engineers) constituent une solution efficace pour une utilisation en ingénierie et présentent les caractéristiques suivantes :

- un coût de calcul relativement faible ;
- une sortie spatiale complète (cartes des hauteurs et vitesses dans le temps) ;
- une bonne capacité à représenter des expansions latérales et des chemins complexes.

Ils permettent également de produire des cartes d'inondation sur des zones étendues, utilisables ensuite pour les procédures de sauvegarde et par la protection civile.

Modèles 3D (RANS/LES, multiphases, SPH, DES/DNS)

La rupture d'un barrage est intrinsèquement un phénomène 3D, surtout à proximité du barrage (impacts sur les structures, jets, forts gradients verticaux, etc.). Pour ces raisons, on peut utiliser dans des cas particuliers les modèles suivants :

- les modèles 3D RANS ou LES ;
- les modèles multiphases (eau-air, souvent avec méthode du volume de fluide – VOF) ;
- les méthodes lagrangiennes de type SPH ;
- les modèles DES/DNS (plus rarement, pour des cas académiques).

Ces modèles permettent de reproduire finement les écoulements locaux, mais ils ont un coût de calcul élevé, nécessitent des données d'entrée et des calibrages complexes, et sont souvent peu adaptés à la modélisation numérique sur de grandes étendues.

Pour les applications standards d'ingénierie hydraulique et de protection civile, les modèles 1D/2D représentent la démarche de base, et les modèles 3D se justifient surtout pour des analyses locales (zone à proximité du barrage, impacts sur des infrastructures critiques).

Modèles hydrauliques de rupture au droit du barrage

Classiquement, dans les pratiques de l'ingénierie, on distingue les ruptures instantanées de barrage, qui concernent les ruptures des barrages en béton, et les ruptures progressives, qui concernent les barrages en remblai, par érosion interne ou par surverse. Pour fournir aux modèles numériques des conditions aux limites réalistes, il est nécessaire de modéliser l'écoulement au droit de la brèche et l'évolution du niveau dans le réservoir. Les modélisations nécessitent le choix de la géométrie finale (ou évolutive) de la brèche, du temps de sa formation, des coefficients de rugosité et le mécanisme de rupture (érosion interne ou surverse).

Pour les barrages en terre qui font l'objet de ce guide, la brèche est dépendante du temps, $b(z,t)$: elle s'élargit et s'approfondit par érosion, avec des taux d'érosion contrôlés par l'hydraulique locale, l'érodabilité du matériau, d'éventuelles protections, la présence ou pas de zonages dans le remblai et le mécanisme de rupture (érosion interne ou surverse). Ainsi, l'hydraulique d'écoulement doit être couplée à un modèle d'évolution géométrique. La classification des modèles d'ouverture de la brèche distingue :

- les modèles paramétriques : l'ouverture de la brèche est modélisée depuis une géométrie initiale jusqu'à une géométrie finale, et sur un temps d'ouverture ;
- les modèles semi-physiques ou physiquement basés : ils simulent explicitement l'érosion de la brèche et donc son évolution, en utilisant les lois de l'hydraulique et d'érosion : par exemple, BREACH (Fread), DAMBRK (NWS), HR BREACH (HR Wallingford) et WinDAM (USDA-NRCS).

Phénomènes torrentiels pouvant être générés par l'onde de rupture

Tout écoulement résultant de la rupture d'un barrage est susceptible de se charger en sédiments par érosion, avec une intensité dépendant fortement de la pente du terrain. Cela concerne donc particulièrement les retenues de montagne ou de piémont examinées

dans ce guide. Par ailleurs, les matériaux solides peuvent également provenir de l'érosion du barrage. Les phénomènes torrentiels qu'il faut redouter appartiennent à deux catégories principales : 1) les phénomènes de charriage et 2) les laves torrentielles, avec toutefois des phénomènes intermédiaires mis en évidence par les travaux du WP5.3 « Méthodologie pour évaluer l'intensité du transport de sédiments par l'onde de rupture d'un barrage et les risques associés » du projet BECCA.

Un écoulement avec charriage garde un caractère clairement biphasique (eau et matériau solide sont présents en deux phases bien distinctes). Sa concentration solide dépend directement de la pente, mais dépasse rarement 20 à 30 % en volume. Le volume total de l'écoulement généré par rupture d'une retenue pourra être augmenté dans ces mêmes proportions en référence au volume d'eau stocké. Les dégâts générés par ces écoulements résultent principalement : 1) d'engravements qui réduisent la capacité hydraulique et sont à l'origine de débordements et divagations du cours d'eau et 2) d'incisions longitudinales ou d'érosions de berges qui peuvent saper les fondations d'infrastructures telles que des ponts ou d'ouvrages de protection tels que des digues, provoquant leur ruine. Pour les études de risque, ces phénomènes peuvent être abordés notamment grâce à des modèles de propagation hydraulique tels que ceux présentés à la section « Modèles numériques : 1D, 2D et modèles avancés » (p. 28), complétés par un calcul du transport solide et de l'ajustement du fond du cours d'eau (voir l'exemple présenté dans le WP4.2 « Étude du transport de sédiments dans les retenues » du projet BECCA).

Une lave torrentielle, malgré une concentration élevée (50 à 80 en volume), est un phénomène de propagation rapide d'un mélange d'eau et de matériau solide, d'aspect monophasique contenant souvent des blocs. Du fait de la très forte concentration du phénomène, la libération d'un volume d'eau par rupture d'une retenue peut donner naissance à une lave torrentielle d'un volume jusqu'à quatre à cinq fois plus important (un tel rapport de volume a notamment été observé lors de la catastrophe de Tête Rousse en juillet 1892). Du fait de sa concentration, de sa vitesse et de la présence de très gros blocs à son front, une lave torrentielle présente un très fort pouvoir destructeur par impact. Pour les études de risque, les laves torrentielles doivent être abordées avec les outils et méthodes spécifiques de ce phénomène.

Compte tenu de la diversité des conséquences et notamment du pouvoir extrêmement destructeur des laves torrentielles, il est essentiel, pour un site donné, d'évaluer correctement la nature des phénomènes qui peuvent l'affecter en cas de rupture. Cela conditionne notamment l'emploi de méthodes et d'outils de modélisation pertinents pour conduire l'évaluation des risques induits à l'aval de la retenue. Le livrable du WP5.3 du projet BECCA traite spécifiquement d'une démarche d'évaluation de la nature des phénomènes torrentiels pouvant être générés par une rupture de barrage.

D'un point de vue pratique, le transport solide par charriage peut être présent même à faible pente et doit donc être examiné dans la plupart des études d'onde de rupture des retenues d'altitude ou de piémont.

La formation de laves torrentielles requiert des conditions particulières et plus délicates à analyser. Le livrable du WP5.3 du projet BECCA conclut que les conditions nécessaires, mais pas forcément suffisantes, à la formation d'une lave torrentielle en cas de rupture de retenue sont :

- des pentes suffisamment fortes (supérieures à 30 %) dans la zone de déclenchement ;
- un volume d'eau suffisamment important (supérieur à quelques milliers de mètres cubes) ;

- une grande quantité de matériau érodable sur le parcours de l'écoulement.

Si l'hypothèse d'une occurrence possible de lave torrentielle est retenue, il est nécessaire, pour une analyse exhaustive du risque, de traiter les deux scénarios suivants :

- la propagation d'une onde de submersion avec transport solide par charriage ;
- la formation et la propagation d'une lave torrentielle.

En toute hypothèse, les études de risque incluant des phénomènes torrentiels requièrent des compétences spécifiques et doivent être menées par une ingénierie spécialisée disposant d'une expérience significative de ces phénomènes complexes.

CHAPITRE 3

Conception et réalisation de retenues nouvelles, de petite et moyenne taille, en remblai et étanchées par géomembrane



Ce chapitre examine les recommandations techniques pour la conception et la réalisation des retenues collinaires et d'altitude, situées en zone transfrontalière France-Italie. Il s'agit d'ouvrages de petite et moyenne taille, implantés à moyenne et haute altitude. Leur alimentation en eau se fait le plus souvent par pompage ou par dérivation des cours d'eau (rivières ou ruisseaux).

Typologie des retenues collinaires et d'altitude dans la zone transfrontalière France-Italie

Les principaux types de barrages sont les barrages en remblai, les barrages-poids en béton et les barrages-voûtes. Pour les retenues collinaires ou d'altitude, le choix du barrage en remblai s'impose pour les raisons principales suivantes :

• contrairement aux barrages classiques, les retenues d'altitude et en zone de piémont ne se limitent généralement pas à barrer un talweg, car, du fait des fortes pentes, le volume stocké serait insuffisant. De ce fait, les sites choisis se situent souvent au droit de replats naturels et la cuvette résulte à la fois d'un creusement et de la surélévation d'une grande partie de son pourtour. Un ouvrage en remblai s'impose alors ;

• il est difficile de produire ou d'acheminer du béton en moyenne ou haute altitude, sur des sites souvent difficiles d'accès. Par ailleurs, l'intégration environnementale des barrages en béton est médiocre et conduit à exclure cette technique pour les barrages neufs ;

• en zones de piémont ou de montagne, les fondations se prêtent rarement à la construction de barrages-poids rigides ou, encore moins, de barrages-voûtes.

Ainsi, les retenues traitées dans ce chapitre sont réalisées en remblai, selon la technique du « déblai-remblai », qui consiste à creuser une partie du bassin en dessous du niveau naturel du terrain, puis à réutiliser le matériau excavé pour construire le corps du remblai. En utilisant les matériaux disponibles sur site et en évitant leur transport, cette solution permet de garantir des coûts raisonnables, de limiter l'impact environnemental et de faciliter leur intégration paysagère dans le milieu naturel environnant.

Par ailleurs, la conception des retenues de moyenne et haute altitude doit prévoir le plus souvent une étanchéité généralisée du remblai et de la cuvette par un dispositif d'étanchéité par géomembrane. Les raisons du choix d'une étanchéité artificielle par géomembrane sont les suivantes :

• la topographie et la géologie des sites d'implantation de ces retenues imposent souvent une étanchéité généralisée de la cuvette et du remblai pour le contrôle des fuites en fondation ;

• le plus souvent, les matériaux disponibles sur site ne sont pas suffisamment étanches, du fait d'une fraction insuffisante de fines dans leur composition ;

• lorsque les matériaux disponibles pourraient être *a priori* suffisamment étanches, leur granulométrie est souvent très hétérogène ; il est alors difficile de réaliser avec eux l'étanchéité de l'ensemble de la cuvette et celle du remblai sans risquer des zones perméables ;

• la teneur en eau des matériaux disponibles est souvent très hétérogène, rendant la réalisation et le contrôle du compactage délicats ;

• les fondations peuvent aussi être formées de roches partiellement solubles et/ou érodables, imposant une étanchéité généralisée de la cuvette ;

• pour les retenues en altitude, les phénomènes de gel du remblai, provoquant sa fissuration sous l'effet du gonflement engendré par le gel, sont potentiellement importants et les petits ouvrages en remblai y sont particulièrement sensibles du fait d'un corps de remblai d'épaisseur limitée.

Tous ces facteurs souvent rencontrés en zone de montagne et de piémont expliquent que les retenues collinaires et d'altitude sont généralement conçues avec une étanchéité artificielle, posée sur le remblai et sur l'ensemble de la cuvette. La solution technique décrite dans ce guide est donc celle du dispositif d'étanchéité par géomembrane. Par ailleurs, la géomembrane du dispositif d'étanchéité est systématiquement recouverte par une couche de protection, afin de mieux protéger le masque et de faciliter son intégration environnementale.

Caractérisation géologique et géotechnique

Les études géologiques et géotechniques et la caractérisation des matériaux sont des étapes essentielles pour la conception et la construction des barrages en remblai, car elles fournissent des données sur le comportement des fondations sur lesquelles le barrage est implanté et sur les matériaux constituant le barrage. À partir des analyses préliminaires, des études de terrain et des essais en laboratoire, il est ainsi possible de créer le modèle géotechnique qui servira de base à la conception du système de rétention hydraulique.

Cette partie constitue une synthèse des recommandations pour les investigations géologiques et géotechniques courantes à réaliser dans le cadre d'un projet de petites et moyennes retenues. Elles doivent être adaptées à chaque projet et en fonction du site étudié.

Il est important de souligner qu'une bonne planification des investigations permet de réduire l'incertitude géotechnique, d'optimiser la conception et de limiter les risques, aussi bien durant la construction que tout au long de la vie du barrage.

Analyse des données historiques

La collecte et l'analyse des données historiques sont une étape essentielle dans les phases initiales du projet. La collecte des données historiques doit prendre en compte les données suivantes.

- Les données géologiques relatives à :
  - la lithologie et les caractéristiques stratigraphiques ;
  - la structure et la tectonique ;
  - la morphologie et la stabilité des pentes ;
  - la sismicité et les conditions sismotectoniques.
- Les données géotechniques concernant :
  - la perméabilité des sols et des roches ;
  - la résistance mécanique et la déformabilité des strates ;
  - les conditions hydrogéologiques et le niveau de la nappe phréatique ;
  - la susceptibilité des matériaux à l'amélioration et au renforcement.

Ces informations constituent la base des analyses ultérieures et doivent être complétées par des données collectées sur le site, par le biais d'études géologiques et géotechniques décrites dans les sections suivantes.

Études géologiques

Les études géologiques sont essentielles pour garantir une conception précise des barrages et une sécurité appropriée pendant la construction et l'exploitation. Une analyse de l'histoire géologique, une cartographie détaillée et l'utilisation de techniques avancées telles que

la télédétection permettent de réduire les risques et d'optimiser les interventions d'ingénierie. Une connaissance adéquate du sous-sol est essentielle pour prévenir les problèmes structurels et assurer la durabilité de la structure dans le temps.

Observation visuelle

Elle consiste à effectuer une observation visuelle experte par un géologue qualifié. L'objectif principal est d'identifier les caractéristiques générales du site à travers l'observation directe du terrain, la consultation de cartes géologiques et topographiques, ainsi que des photos aériennes. Le géologue examine à une échelle fine (1/1 000 à 1/500) les phénomènes d'instabilité potentiels, qu'ils soient gravitaires ou souterrains, afin de mieux cerner les risques géologiques spécifiques au site. Il se concentre également sur la description précise des sols et des roches.

Le géologue nomme et décrit les différentes couches visibles de sols, en notant leur homogénéité, leur hétérogénéité, ainsi que leur argilosité, ce qui permet de déterminer les propriétés de ces sols (perméabilité, plasticité et sensibilité à l'eau). Il analyse aussi les roches en termes de lithologie, en décrivant les discontinuités comme les orientations, les espacements et autres anomalies structurales (extension, rugosité, ondulation, altération des épontes, failles et présence d'eau).

Ces observations permettent de dresser un premier état des lieux géologique du site et de commencer à identifier les zones à risque lors de la construction du barrage. Elles servent de base pour les investigations plus approfondies.

Cartographie géologique

La cartographie géologique est essentielle à toutes les phases du projet. Elle est disponible à différentes échelles et doit être choisie en fonction du niveau de détail requis. Elle permet d'identifier la nature des formations présentes dans le substrat, les structures géologiques (discontinuités, fractures, schistosité), hydrogéologiques et géomorphologiques (glissements actifs, suspendus, dormants, etc.).

Il est également indispensable d'identifier les éléments critiques tels que les failles, les zones de cisaillement, les diaclases et les couches faibles qui pourraient influencer la stabilité du barrage.

Levé topographique

Un levé topographique permet de géolocaliser avec précision les formations géologiques observées. En fonction des exigences du projet, deux types de levés peuvent être distingués :

- le levé simplifié : il permet d'obtenir une première évaluation morphologique du site et de tracer des sections indicatives dans l'axe du barrage, fournissant une première estimation du volume de la retenue ;
- le levé standard : il implique la réalisation de cartes détaillées avec des mesures prises par des techniciens spécialisés et le traitement des données à l'aide d'un logiciel spécifique.

Photogéologie

La photogéologie utilise des images aériennes et satellitaires pour compléter les informations obtenues à partir de cartes géologiques et de relevés directs. Cette technique permet d'analyser la détérioration des formations rocheuses due à l'altération, de constituer une aide pour l'étude hydrologique du bassin et d'évaluer la dynamique des sédiments transportés dans la rivière.

Étude géostructurale

L'étude géostructurale est indispensable à la caractérisation des masses rocheuses. Elle doit fournir :

- des données qualitatives et quantitatives relatives aux caractéristiques des discontinuités relevées, en référence aux recommandations de l'International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering (ISRM) ;
- des relevés des sources et, en général, des conditions hydrauliques de la masse rocheuse ;
- toute information permettant d'attribuer correctement une classe de qualité à la masse rocheuse, selon les classifications RMR, GSI et Q les plus courantes.

Investigations géophysiques

Ce type d'investigation est basé sur l'exécution d'essais géophysiques qui fournissent des informations sur :

- le degré d'homogénéité du sous-sol ;
- la position et l'épaisseur des couches de densités différentes, superficielles et profondes ;
- la profondeur du substrat rocheux ;
- la présence de failles et de discontinuités ;
- la présence de cavités naturelles ;
- les caractéristiques mécaniques des matériaux, telles que les modules élastiques dynamiques et la qualité de la roche.

Les techniques d'essai principalement utilisées sont les suivantes :

- la tomographie sismique par réfraction et réflexion, utilisée pour identifier la stratigraphie, les anomalies et les caractéristiques de déformabilité dans le champ élastique de la subsurface. Elle est basée sur la vitesse de propagation des ondes élastiques générées dans le sol. La sismique de réfraction permet de détecter des interfaces nettes, comme la surface du substratum rocheux. Elle est particulièrement utile pour observer des terrains compacts et détecter des failles ou des zones de décompression ;
- la prospection géoélectrique, utile pour détecter les variations lithologiques et les zones de possible saturation en eau, et basée sur la variation de la résistivité du sol, soumise à un champ électrique. La prospection électrique est principalement utilisée pour cartographier des formations géologiques simples (par exemple, le toit du substratum rocheux) ou pour localiser des nappes aquifères et écoulements souterrains, en mesurant la résistivité du sol ;
- les investigations par Georadar (GPR), pour l'exploration des couches superficielles du sous-sol par l'utilisation de la réflexion des ondes électromagnétiques ;
- la magnétométrie, pour détecter les structures lithologiques présentant des différences significatives de susceptibilité magnétique ;
- la microgravimétrie, pour détecter les hétérogénéités de densité sur des sites à risque de cavités (karsts, dissolution de gypse, etc.). En cas d'anomalies, des sondages destructifs sont nécessaires pour les caractériser.

Les investigations géophysiques sont réalisées en combinaison avec des forages, afin de reconstruire de manière précise et continue le profil stratigraphique de la zone analysée. Elles ont pour but d'explorer plus profondément le sous-sol, au-delà des capacités des puits.

Ces méthodes sont choisies et implantées par le géologue en fonction des objectifs spécifiques du site, comme la détection d'anomalies dans les couches profondes ou l'étude des interfaces entre différents matériaux.

Investigations géotechniques

Les investigations géotechniques, définies sur la base du modèle géologique et des caractéristiques de l'ouvrage à construire, permettent d'obtenir des informations quantitatives sur les caractéristiques physiques, mécaniques et hydrauliques des lithologies affectées par le barrage. Ces données permettent de construire le modèle géotechnique, qui est à la base de la conception de l'ouvrage.

Puits et tranchées exploratoires

Les puits et les tranchées exploratoires sont utilisés pour caractériser les sites des barrages en terre et, dans une moindre mesure, des barrages en béton.

Ces investigations, typiquement réalisées par des excavations à l'aide de pelles mécaniques, permettent d'évaluer les caractéristiques géologiques et géotechniques des sites de construction et de recueillir une grande quantité d'informations en peu de temps. Pendant l'excavation de la tranchée, il est possible de relever les sections stratigraphiques du sous-sol, en cartographiant les différents types de sols et de roches le long du développement de la tranchée elle-même. Il est également possible d'obtenir des indications sur le niveau des eaux souterraines et d'évaluer la perméabilité du sous-sol en effectuant des tests appropriés.

Le concepteur doit évaluer soigneusement la zone où les tranchées doivent être réalisées, en suivant des lignes d'excavation qui permettent d'étudier efficacement non seulement la zone correspondant à l'emplacement du réservoir, mais aussi la zone adjacente au réservoir. Les puits, espacés généralement de 15 à 20 mètres, permettent de reconnaître la cuvette et ses versants, et d'étudier la zone d'extraction des matériaux. En général, l'excavation implique une profondeur comprise entre trois et cinq mètres pour les terrains meubles, de manière à fournir des indications sur la stratigraphie de surface. Pour les terrains rocheux, l'investigation est limitée aux altérations superficielles.

Les résultats obtenus servent à dresser une coupe du site et à observer la structure des couches superficielles. Ces informations permettent de définir le programme de sondage si nécessaire.

Forages et échantillonnages

Les techniques de forage permettent de reconstituer la stratigraphie du site, d'obtenir des informations sur le degré de fracturation de la masse rocheuse (RQD, par exemple), d'identifier la présence éventuelle d'eaux souterraines, de prélever des échantillons de matériaux pour déterminer les caractéristiques mécaniques et structurelles des couches géologiques à travers des essais en laboratoire, de réaliser des essais sur site et d'installer d'éventuels systèmes de surveillance. Ces sondages peuvent être réalisés de manière destructive ou carottée.

Les sondages destructifs ou carottés présentent certains avantages par rapport au creusement de puits ou de tranchées exploratoires, car ils permettent d'atteindre des profondeurs plus importantes et de réaliser des tests de perméabilité plus fiables, même s'ils sont plus localisés et ponctuels. De plus, afin de caractériser précisément le site et de déterminer la stratigraphie, il est conseillé d'intégrer les informations obtenues par les forages pour l'interprétation des investigations géophysiques.

Les sondages carottés sont à privilégier, car beaucoup plus informatifs que les sondages destructifs : ils permettent d'analyser plus en profondeur les terrains traversés et sont associés à des observations lithologiques, structurales et hydrogéologiques détaillées. Ils permettent de définir des coupes géologiques de la fondation et de prélever des échantillons pour des essais de laboratoire.

Les sondages destructifs sont souvent utilisés pour des recherches de cavités, de zones compressibles, de roches sensibles à l'eau (gypse, cargneule, etc.) ou pour localiser le substratum. Ils peuvent permettre de mesurer la portance du sol et de réaliser des essais de perméabilité *in situ* (essais Lefranc ou Lugeon selon les normes NF EN ISO 22282-2 et NF ISO EN 22282-3).

Le positionnement et la profondeur des forages à produire doivent être basés sur des observations préliminaires, afin de construire un profil stratigraphique fiable du site. La technique de forage doit être adaptée au type de sol et à la nécessité de récupérer des échantillons de matériaux qui pourront ensuite être analysés en laboratoire. À cet égard, le niveau de qualité de l'échantillon doit être spécifié, en se référant aux classifications reconnues dans la littérature (par exemple, les recommandations sur la planification et l'exécution des études géotechniques publiées en 2022 par l'Association italienne de géotechnique, AGI). Les normes mondiales (UNI EN ISO) et françaises (NF) pertinentes sont les suivantes :

- NF P 94-410-3 : essais pour déterminer les propriétés physiques des roches ;
- UNI EN ISO 14689 : identification, description et classification des roches ;
- UNI EN ISO 22475-1 : principes techniques pour l'échantillonnage du sol, des roches et des eaux souterraines ;
- NF P 94-500 : missions d'ingénierie géotechnique, classification et spécifications ;
- UNI EN ISO 19901-4 : caractérisation du site et planification des études géotechniques.

Parmi les différentes techniques de forage, les principales sont : les forages rotatifs, les forages à percussion et les forages à hélice.

Les forages permettent d'acquérir des données approfondies pour évaluer la stabilité du site, la portance des sols et la profondeur des couches. Les résultats influencent la conception des fondations et des structures du barrage. Pour les petites retenues à géologie simple et affleurements nombreux, les investigations par puits peuvent parfois suffire. L'équipement de piézomètres dans ces sondages permet également de suivre le niveau piézométrique du site.

Essais *in situ*

Les essais et mesures *in situ* sont utiles dans les différentes phases des études de barrages pour obtenir des informations sur le matériau de fondation et le dimensionnement des travaux qui en découlent. Ils visent à caractériser la qualité de la fondation d'un barrage et à mesurer la réponse du sol ou des roches à différents types de sollicitations, et à déterminer les propriétés mécaniques de la fondation telles que la résistance au cisaillement, la perméabilité ou la compacité. Bien que peu fréquents, ils sont particulièrement utilisés dans les zones avec des fondations compressibles.

L'essai de pénétration statique (NF EN ISO 22476-12 ou NF P 94-113) évalue l'homogénéité des horizons et aide au dimensionnement des fondations d'ouvrages rigides, tandis que l'essai de pénétration dynamique permet de distinguer les horizons de sols et de localiser une couche résistante. Le pénétromètre dynamique de type A (NF EN ISO 22476-2) estime la capacité portante, tandis que le type B (NF EN ISO 22476-2) fournit une évaluation

qualitative de la résistance. L'essai de pénétration au cône (CPT) (NF EN ISO 22476-1) peut également être employé. L'essai au pressiomètre Ménard ou autres (NF EN ISO 22476-4, NF EN ISO 22476-5, NF EN ISO 22476-6, NF EN ISO 22476-8, et NF EN ISO 22476-12) mesure la déformabilité du sol ou des roches et permet d'évaluer l'amplitude du tassement, essentiel pour le dimensionnement des fondations d'ouvrages rigides.

Ces essais donnent des informations précieuses sur la résistance du sol et la possibilité de stabiliser les fondations. Ils permettent de vérifier la capacité portante et d'adapter les conceptions techniques du barrage en fonction de la nature du terrain. Dans tous les cas, il faut garder à l'esprit que les volumes de sol concernés par les essais *in situ* sont très faibles par rapport à ceux concernés par le barrage. Les données obtenues ont donc une valeur locale.

Essais en laboratoire

Les études en laboratoire sont un complément essentiel des études géotechniques *in situ*. En effectuant des essais normalisés, il est possible de déterminer les propriétés physiques et mécaniques des sols et des roches, ce qui fournit des données essentielles pour la conception et la justification de la stabilité des ouvrages géotechniques.

Les prélèvements pour le remblai ou les fondations sont souvent remaniés, tandis que, pour les propriétés hydromécaniques des fondations, des échantillons intacts sont prélevés pour préserver les caractéristiques du terrain.

Classification des sols et des roches

Les systèmes de classification des sols et des roches sont définis par des normes. En France, le guide GTR 2024 sert de référence et repose sur l'essai de compactage Proctor et sur les essais d'identification. En Italie, les principales normes de référence sont les normes techniques pour la construction (NTC18), qui fournissent des critères pour la caractérisation géotechnique des sols et des roches, et les recommandations de l'AGI.

Pour les sols, la classification repose en large partie sur les essais d'identification : la teneur en eau naturelle, les limites d'Atterberg, les poids volumiques, l'indice des vides et la granulométrie.

Pour les roches, la classification se fait par analyse minéralogique et pétrographique, par la détermination de la teneur en eau, de la porosité, du potentiel de gonflement et de la teneur en carbonates.

Essais d'identification des sols

Les essais d'identification classent les sols selon leur granulométrie et leur sensibilité à l'eau. Ces essais sont principalement les suivants.

Teneur en eau naturelle (norme NF EN 1097-5)

La teneur en eau naturelle (Wn) est essentielle pour caractériser l'état hydrique du sol et réaliser un remblai compact. Le GTR définit cinq classes d'états hydriques : très humide (th), humide (h), moyen (m), sec (s), très sec (ts). Le rapport Wn/W_{OPN} est un des paramètres proposés pour caractériser l'état hydrique d'un sol. L'état moyen est le plus favorable pour le compactage, tandis que les états humide et sec sont acceptables sous conditions et que les états très humide et très sec nécessiteront des études spécifiques.

Granulométrie (NF EN ISO 17892-4)

La courbe granulométrique, obtenue par tamisage et sédimentométrie, est essentielle pour caractériser les sols. Elle permet de déterminer les zones homogènes, d'évaluer le comportement des sols et la représentativité des essais de laboratoire. Plusieurs paramètres sont analysés :

• le diamètre maximal (Dmax) : le diamètre des plus gros éléments du sol est déterminé à partir de la courbe granulométrique ou visuellement. En cas de blocs allongés, Dmax correspond à la longueur la plus petite. Il sert à définir l'épaisseur du remblai et à choisir les méthodes de terrassement. Le seuil de 63 mm est fixé par le GTR pour différencier les sols fins, intermédiaires, sableux et graveleux (F, I, S et G) des sols grossiers (blocailleux) (VC) ;

• le tamisat à 63 µm ou le pourcentage de fines : ce paramètre permet de savoir si le sol est riche en fines et d'évaluer sa sensibilité à l'eau ;

• la forme de la courbe granulométrique : la forme de la courbe reflète l'étalement de la granulométrie d'un sol. Le coefficient d'uniformité (Cu) permet de quantifier cet étalement, et, de ce fait, sa capacité de compactage.

Blocométrie (NF EN 13383-1 et NF EN 13383-2)

La blocométrie, analogue à la granulométrie, analyse la distribution des blocs rocheux en fonction de leur taille, ce qui est essentiel pour le terrassement et la gestion des matériaux.

Limites d'Atterberg (NF EN ISO 17892-12)

L'indice de plasticité (IP) est utilisé pour caractériser l'argilosité des sols fins. Le GTR définit quatre seuils d'IP : 12 (F1 : sols peu plastiques), 22 (F2 : argiles peu plastiques), 40 et 55 (F3 et F4 : sols très plastiques).

Valeur de bleu d'un sol (VBS) (NF EN 17542-3)

La valeur de bleu d'un sol (VBS) caractérise l'argilosité et la sensibilité à l'eau d'un sol. Le GTR définit plusieurs seuils de sensibilité à l'eau en fonction de la VBS, en particulier :

• 0,1 : sol insensible à l'eau en dessous de cette valeur ;

• 2,5 : seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne ;

• 6 : seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux ;

• 8 : seuil au-delà duquel les sols sont considérés comme très argileux et très plastiques, ne pouvant pas être utilisés en l'état.

Détermination des caractéristiques mécaniques

Les essais de caractérisation mécanique fournissent des données sur la résistance et sur la déformabilité du matériau constituant le sol concerné par les travaux. Ils comprennent différents essais pour les sols et pour les roches.

• Pour les sols :

  – essai de compression confinée (ou triaxiale), pour la détermination de la résistance à la compression, des paramètres de déformabilité élastique et du critère de résistance ;

  – essai de cisaillement direct, pour l'évaluation des paramètres de résistance au cisaillement ;

– essai de cisaillement dans des conditions dynamiques (essai de cisaillement cyclique, essai de cisaillement cyclique en torsion, colonne résonante, essai par éléments de flexion, etc.), pour l'évaluation du module de cisaillement dynamique ;

– essai œdométrique, pour l'évaluation du potentiel de tassement.

• Pour les roches :

– essai de compression non confinée (ou uniaxiale), pour la détermination de la résistance à la compression non confinée et des paramètres de déformabilité élastique ;

– essai de compression confinée (ou triaxiale), pour la détermination du critère de résistance ;

– essai de traction indirecte (brésilien), pour l'évaluation de la résistance à la traction ;

– essai de dureté et d'abrasion.

Essai de compactage

L'objectif de l'essai de compactage est de déterminer les conditions optimales pour compacter un sol. L'essai Proctor Normal (NF P 94-093) est couramment utilisé en laboratoire pour étudier le compactage des remblais. Il mesure la masse volumique sèche du sol compacté en fonction de la teneur en eau et permet d'apprécier l'aptitude du matériau à être mis en œuvre en remblai. Si la teneur en eau naturelle d'un matériau s'écarte de la teneur en eau optimale, le matériau ne pourra pas être utilisé directement pour le remblai sans séchage ou humification. Des techniques comme le drainage, l'évaporation ou l'étalage du matériau peuvent être utilisées pour traiter les teneurs en eau trop élevées.

En zone de montagne ou en piémont, les matériaux sont souvent hétérogènes et peuvent contenir une fraction importante d'éléments grossiers. Pour réaliser des essais sur ces matériaux, il est nécessaire de les écrêter afin de ne tester que la fraction compatible avec les dimensions des moules (Proctor ou CBR). La norme NF P 94-093 définit des règles pour cet écrêtage, la limite de représentativité des essais et les corrections à appliquer.

Les matériaux évolutifs, comme les schistes ou calcaires tendres, peuvent poser des problèmes pour l'essai Proctor, car leur évolution granulométrique diffère souvent entre le laboratoire et le chantier. Pour ces matériaux, une étude spécifique est nécessaire, et des planches d'essais sont indispensables pour analyser les résultats avant et après compactage.

Essais de cisaillement

Deux types d'essais de cisaillement sont utilisés pour estimer les caractéristiques mécaniques des sols : l'essai triaxial et l'essai de cisaillement rectiligne à la boîte. Ces essais sont essentiels pour les calculs de stabilité et concernent aussi bien les matériaux du remblai que ceux de la fondation. La principale difficulté réside dans l'écrêtage des fractions grossières des matériaux étudiés. Selon les normes, le diamètre maximal (Dmax) des matériaux soumis à ces essais ne doit pas dépasser 1/5 à 1/6 de la taille de l'éprouvette ou de la boîte. Les sols en montagne ou en piémont contenant des éléments grossiers (classe VC) ne peuvent généralement pas être étudiés avec les installations standards. Deux cas sont alors envisagés selon le GTR :

• pour un sol avec moins de 60-80 % de fraction 0/63 mm (sous-classe VC1) : son comportement est fortement influencé par la fraction grossière. Les essais classiques ne sont pas adaptés, et des essais sur de grandes boîtes de cisaillement rectiligne doivent être réalisés. En première approche, les caractéristiques mécaniques des matériaux grossiers peuvent être estimées de manière experte par le géotechnicien en adoptant alors de fortes marges de sécurité ;

• pour un sol avec plus de 60-80 % de fraction 0/63 mm (sous-classe VC2) : son comportement peut être assimilé à celui de la fraction 0/63. Les essais classiques sont possibles, mais les résultats doivent être interprétés avec prudence, car l'écrêtage peut sous-estimer l'angle de frottement interne et surestimer la cohésion.

L'essai triaxial (normes NF EN ISO 17892-9 et NF P 94-070) est recommandé pour les sols fins, car il permet de mesurer les pressions interstitielles et d'analyser l'état de contrainte du sol. Il existe deux types d'essais :

• l'essai non consolidé non drainé (UU), qui donne les caractéristiques apparentes du sol, adaptées pour des sols saturés ou non saturés, et correspond au comportement à court terme ;

• l'essai consolidé non drainé avec mesure des pressions interstitielles (CU+u), qui fournit les caractéristiques effectives du sol, correspondant au comportement à long terme.

Ces résultats doivent être interprétés par un expert, notamment pour évaluer l'impact de l'écrêtage du matériau.

L'essai de cisaillement rectiligne (normes NF EN ISO 17892-10 et NF P 94-071-2) peut être effectué dans une boîte classique, mais il est limité pour les sols peu perméables. Pour les matériaux grossiers, une grande boîte de cisaillement est préférée, car elle permet de limiter l'écrêtage et d'obtenir des résultats plus fiables.

Essais hydromécaniques et hydrauliques

Des essais hydromécaniques et hydrauliques sont réalisés pour évaluer la compressibilité et la perméabilité des sols. Les deux principaux sont :

• l'essai au perméamètre : il mesure la perméabilité d'un sol, ce qui est crucial pour évaluer les conditions d'écoulement dans les remblais ;

• l'essai de compressibilité à l'œdomètre : utilisé pour évaluer les tassements dans les fondations ou remblais constitués de matériaux compressibles.

L'évaluation de la perméabilité peut être basée sur la réalisation d'essais sur site et en laboratoire. Pour avoir un premier ordre de grandeur lors des études préliminaires, la perméabilité doit être estimée sans recourir à des essais en se fiant à l'expérience du concepteur et aux données de la littérature pertinente, par exemple au tableau 1.

Type de sol	Perméabilité	Caractéristiques de perméabilité/drainage
Argile	$< 10^{-8}$	imperméable
Limon	$[10^{-8} ; 10^{-6}]$	faible perméabilité, drainage difficile
Sable	$[10^{-6} ; 10^{-3}]$	perméabilité moyenne/haute, drainage modérément libre
Gravier/cailloux	$> 10^{-3}$	perméabilité élevée, drainage libre

***Tableau 1**. Perméabilité des sols*

Dans le cas des sols, les tests les plus courants sont :

• les essais de perméabilité à charge constante, dans le cas des sols à gros grains ;

• les essais de perméabilité à charge variable, dans le cas des sols à grains fins.

Dans le cas des masses rocheuses, les essais les plus couramment utilisés sont :

- les essais de perméabilité en laboratoire, sur des échantillons de roche ;
- les mesures de la conductivité hydraulique des discontinuités ;
- l'analyse de la porosité.

Essais spécifiques aux roches

Les matériaux rocheux, notamment les enrochements, sont soumis à des essais spécifiques pour évaluer leur comportement, particulièrement lorsqu'ils sont susceptibles d'évoluer après extraction. Certaines roches (schistes, calcaires tendres, marnes) peuvent paraître solides à l'extraction, mais devenir fragmentables et produire des fines lors de la mise en œuvre, ou rester en blocs mais risquer la désagrégation, surtout si elles sont sensibles à l'eau. Les tests d'extraction et de mise en œuvre sont nécessaires pour éviter ces évolutions et la réduction des caractéristiques mécaniques sous l'action de l'eau. Le guide *Rock Manual* (CIRIA, 2007) est la référence en matière d'enrochements.

Les caractéristiques déterminées sur les roches incluent :

- les caractéristiques intrinsèques : densité apparente, minéralogie ;
- les caractéristiques d'état : teneur en eau, granulométrie, blocométrie, coefficient de forme, porosité ;
- les caractéristiques de comportement :
  - mesure de fissuration, indice RQD (*rock quality designation*) : ils mesurent la fracturation de la masse rocheuse ;
  - essai Los Angeles (LA) et Micro-Deval (MDE) (NF EN 1097-2 et NF EN 1097-1) : il estime respectivement la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure des roches dures, comme le granite ou le calcaire ;
  - essai de gélivité (NF EN 12371) : il mesure la résistance des pierres naturelles au gel et au dégel ;
  - essai de fragmentabilité (FR) (NF EN 17542-2 et NF P 94-066) : il évalue la capacité d'une roche à se fragmenter sous les sollicitations mécaniques ;
  - essai de dégradabilité (DG) (NF EN 17542-1 et NF P 94-067) : il évalue la résistance d'une roche à se dégrader sous l'effet des cycles climatiques (gel, imbibition-séchage) et des contraintes mécaniques, particulièrement pour les roches argileuses.

Synthèse géologique et géotechnique – Modèles géologique et géotechnique

La synthèse géologique et géotechnique regroupe un résumé clair des investigations menées (reconnaissances de terrain et essais de laboratoire), leurs résultats et leur interprétation. Elle débouche sur les modèles géologiques et géotechniques de la fondation renseignant les caractéristiques géomécaniques et hydromécaniques des différents matériaux rencontrés.

La synthèse géologique et géotechnique est établie sur les bases des reconnaissances et des résultats d'essais sur site. Elle présente les résultats et leur interprétation : présentation de coupes types du sous-sol du site, distinction de familles de matériaux homogènes, valeurs des différents paramètres géotechniques mesurés pour chaque famille, interprétation des valeurs des paramètres (réutilisation des déblais en remblai, sensibilité à l'eau, résistance, compressibilité, etc.). Elle intègre les coupes lithologiques, les schémas, les coupes des

perméabilités sous l'ouvrage, les coupes montrant le comportement hydromécanique des formations et toute représentation, afin de rendre les résultats facilement compréhensibles et utilisables pour la maîtrise d'œuvre.

La synthèse géologique et géotechnique donne en conclusion les modèles géologiques et géotechniques de la fondation (qualité mécanique et étanchéité), les traitements correctifs qu'il y a lieu de prévoir (renforcement du drainage, zone dont l'étanchéité doit être ponctuellement renforcée, etc.), le type et la quantité de matériaux réutilisables en remblai et en couche support du dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG), les purges nécessaires, le confortement des zones instables, etc. Elle indique les propriétés géomécaniques et hydromécaniques des matériaux constituant la fondation (sols, roches, hydrogéologie) selon les différents horizons et zones du modèle géologique. Les investigations doivent permettre de dire si le site peut être utilisé avec un certain nombre de mesures correctives ou bien s'il doit faire l'objet d'un traitement global (étanchéification totale de la cuvette par exemple).

On insiste sur le fait que chaque site doit faire l'objet d'études spécifiques et sur mesure, et que la complexité et la diversité du milieu naturel en montagne et en zone de piémont ne se prêtent pas à des études types. Le retour d'expérience montre une grande variabilité de problèmes géologiques, et la géologie n'est valable, bien souvent, que localement, les conditions pouvant changer radicalement en quelques dizaines de mètres de distance, influant alors fortement sur les dispositions constructives à mettre en œuvre.

Justification des petites et moyennes retenues en remblai

Ce chapitre établit une synthèse des justifications à produire pour la stabilité des retenues collinaires et d'altitude étanchées par des dispositifs d'étanchéité par géomembranes (DEG), comprenant les remblais, les fondations, les déblais et les abords.

Le format de justification proposé dans ce chapitre est un calcul aux états-limites. On utilise donc le formalisme des Eurocodes : définition des situations de projet, mode de calculs des actions, valeurs caractéristiques des résistances, états-limites et conditions d'états-limites. Ce chapitre s'appuie sur les recommandations existantes qui constituent les références de base pour la justification des barrages en remblai, notamment le guide « Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai » (CFBR, 2015), le guide *Retenues d'altitude* (Peyras et Mériaux, 2009), ou encore le guide italien « Decreto Ministeriale 2014 – Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta ».

Les situations de projet

Afin de justifier la stabilité des retenues, il est nécessaire de définir avec précision les situations de projet auxquelles le barrage est soumis. Par situations de projet, on entend un ensemble de conditions physiques auxquelles l'ouvrage est soumis et pendant lequel on suppose que les données concourant à la stabilité (les actions et les résistances) restent constantes. Les situations de projet définissent les sollicitations hydrauliques agissant sur les ouvrages. Le concepteur définit dans les notes de calculs les situations qu'il envisage pour le projet. Pour cela, il tient compte de la conception du projet, du mode de fonctionnement des installations, de l'environnement dans lequel l'ouvrage sera placé et de la vraisemblance des situations de défaillances.

Les situations de calcul décrites ci-après servent de guide au concepteur pour la justification des retenues et doivent être complétées autant que nécessaire. Elles sont classées en différentes catégories, en fonction des intervalles de temps pendant lesquels les valeurs des actions et des résistances de la structure peuvent être considérées comme constantes.

Situation durable d'exploitation

Il s'agit du niveau normal d'exploitation autorisé (cote RN, retenue normale, correspondant généralement à la cote du seuil déversant pour les barrages équipés d'un déversoir à surface libre).

Cela représente la condition normale d'exploitation, avec le niveau d'eau au maximum prévu. Le cas échéant, des niveaux intermédiaires représentatifs de l'exploitation courante peuvent également être pris en considération.

Situations transitoires

Il s'agit de la situation transitoire en fin de construction avec réservoir vide, situation de référence pour évaluer le comportement du barrage à la fin des travaux, avant sa mise en eau. Cette situation est justifiée pour les barrages en remblai dont les matériaux de remblai ou de la fondation sont susceptibles de développer des pressions interstitielles lors des travaux de construction (matériaux peu drainants). Les contraintes résiduelles et la stabilité globale de l'ouvrage avant le premier remplissage sont analysées.

Situations rares

Situation rare de vidange rapide

Cette situation de calcul intéresse uniquement les remblais constitués de matériaux peu drainants. Elle vise à vérifier les conditions de stabilité du talus en amont ou du DEG en condition partiellement saturée. En situation de vidange rapide, deux états-limites doivent être envisagés :

- le glissement circulaire lié aux pressions interstitielles régnant dans le remblai ;
- le soulèvement et le glissement du DEG par l'eau contenue dans le remblai.

Le calcul est guidé par la position de la ligne piézométrique dans le remblai. Celle-ci est évaluée en tenant compte des risques d'endommagement du DEG et/ou du dispositif de drainage (voir le paragraphe « Situation rare de défaillance du DEG » ci-après). En dehors de ces défaillances, cette situation de projet n'est pas à justifier, car le fonctionnement de ce type de barrage à masque en amont conduit à l'absence de sous-pression dans le remblai.

Situation rare de défaillance d'un composant de l'ouvrage

Certaines défaillances d'éléments impliqués directement dans la sécurité de l'ouvrage sont susceptibles de conduire à des situations rares devant être spécifiquement étudiées. En fonction de la conception de l'ouvrage et de son environnement, le concepteur peut être amené à examiner des situations particulières :

- la perte ou dégradation significative de la capacité de drainage de la retenue ;
- la perte ou dégradation significative de son étanchéité (voir le paragraphe « Situation rare de défaillance du DEG » ci-dessous) ;
- la perte ou dégradation d'une autre fonction importante de sécurité à définir au cas par cas.

Situation rare de défaillance du DEG

La défaillance du DEG donne lieu à des justifications spécifiques des conditions de stabilité du remblai et de la fondation. Ces situations peuvent être rencontrées lors de différentes défaillances :

- des poinçonnements multiples du DEG ;
- des défauts de raccordement de la géomembrane sur un ouvrage rigide ;
- le glissement de la couche de recouvrement, qui pourrait entraîner la déchirure de la géomembrane ;
- des déchirures du DEG par glissement de blocs de glace, mais qui sont peu probables en cas de recouvrement de la géomembrane.

Le concepteur définit les situations de défaillance du DEG en fonction des dispositions du projet pour le recouvrement de la géomembrane et pour le dispositif de drainage. Les situations de projet traduisent la nature et l'importance de la défaillance du DEG et les probabilités d'occurrence de la défaillance. Les situations de défaillance du DEG définies par le concepteur permettent de fixer les hypothèses de calcul pour la justification de la stabilité du remblai vis-à-vis des états-limites de glissement et d'érosion interne : les conditions de drainage, les conditions d'écoulement dans le remblai et les paramètres géotechniques des matériaux liés aux pressions interstitielles.

Les retenues envisagées dans le présent guide sont équipées d'un DEG systématiquement recouvert et il n'est pas envisagé de DEG non recouvert pour des raisons à la fois environnementales et de protection de la géomembrane. Aussi, il est proposé d'envisager pour ces retenues avec DEG recouvert deux situations rares de défaillance de DEG considérant : 1) des défauts localisés de la géomembrane et le dispositif de drainage non défaillant structurellement et 2) le glissement de la couche de recouvrement susceptible d'entraîner la déchirure de la géomembrane.

Toutefois, le concepteur peut être amené à considérer d'autres situations rares de défaillance de DEG plus défavorable selon la conception, et notamment si une partie de la géomembrane n'est pas recouverte. Le cas échéant, il peut envisager une géomembrane fortement endommagée (par exemple, un trou de diamètre d'un mètre dans la géomembrane ou une géomembrane partiellement effacée) et/ou un endommagement ou une défaillance complète du dispositif de drainage du DEG.

Situations de crues

Situation exceptionnelle de crue

La situation exceptionnelle en crue couvre toutes les situations de projet comprises entre la cote normale d'exploitation et la cote des plus hautes eaux (cote PHE) obtenue pour la crue de projet. Elle permet d'évaluer le comportement du barrage dans les conditions contraignantes de remplissage.

En France, la crue de projet est donnée dans l'arrêté technique du 6 août 2018 qui fixe la fréquence en fonction de la taille de l'ouvrage. Les retenues envisagées dans le présent guide sont le plus souvent en classe C au sens de la réglementation française sur les barrages et la période de la crue exceptionnelle est alors de 1 000 ans.

Situation extrême de crue

La situation extrême de crue correspond à la cote au-delà de laquelle l'ouvrage risque de subir des dégâts majeurs par submersion du remblai, pouvant conduire rapidement à la rupture.

Le dépassement de la cote de danger conduit à un état-limite ultime par surverse. La situation extrême de crue peut résulter soit d'une crue extrême avec un fonctionnement nominal de l'évacuateur de crues, soit d'une crue plus faible combinée avec un dysfonctionnement de l'évacuateur de crues.

En France, la situation extrême de crue est donnée dans l'arrêté technique du 6 août 2018 qui fixe la fréquence en fonction de la taille de l'ouvrage. Les retenues envisagées dans le présent guide sont le plus souvent en classe C et la période de la crue exceptionnelle est alors de 10 000 ans pour les ouvrages neufs. Cette crue ne doit pas conduire à une cote supérieure à la cote de la crête du barrage (pas de surverse en situation extrême de crue).

Situations accidentelles

La situation accidentelle sismique

Il s'agit de vérifier les conditions de stabilité de l'ouvrage sous l'action du séisme de projet. Dans cette situation de projet, on adopte pour la sollicitation hydraulique et les paramètres géotechniques des hypothèses analogues à celles de la situation normale d'exploitation (cote RN).

Autres situations accidentelles

D'autres situations accidentelles liées à des aléas extérieurs peuvent, dans certains projets, être examinées en fonction du projet :

- la situation accidentelle de grand glissement de terrain ;
- la situation accidentelle d'effondrement de versant dans la retenue ;
- la situation accidentelle d'avalanche dans la retenue.

Calcul des actions et des sollicitations

Sollicitation hydraulique et champ de pressions interstitielles

Dans le cas des retenues étanchées par DEG, la situation normale d'exploitation conduit à une non-saturation du remblai et à des matériaux dans un état hydrique humide.

En situation rare de défaillance du DEG, le concepteur peut être amené à envisager une saturation partielle du remblai. Une des difficultés est d'évaluer la position de la ligne de saturation en cas de défaillance de la géomembrane ou du dispositif de drainage. À cet égard, le concepteur définit les situations de défaillance du DEG en fonction de la conception du recouvrement de la géomembrane et du dispositif de drainage. Par ailleurs, le concepteur dispose de nombreuses méthodes et modèles de calculs permettant l'étude des infiltrations et la détermination du champ de pressions interstitielles dans un remblai. Les plus classiques sont les codes d'éléments finis, GeoStudio-SEEP/W ou PLAXIS-PLAXFLOW, utilisés couramment en ingénierie. Lors de l'utilisation de ces modèles, il est fondamental d'intégrer l'anisotropie de perméabilité dans le remblai, inévitable quelle que soit la qualité de réalisation du remblai. On adopte des ratios k_h/k_v (perméabilité horizontale/perméabilité verticale), compris entre 10 et 100 selon les matériaux en place et les conditions de mise en œuvre.

Action sismique

Approche normative française (arrêté du 6 août 2018)

La carte d'aléa sismique en France définit cinq zones sismiques :

- Zone 1 : sismicité très faible ;
- Zone 2 : sismicité faible ;

- Zone 3 : sismicité modérée ;
- Zone 4 : sismicité moyenne à forte ;
- Zone 5 : sismicité élevée.

Dans les départements français frontaliers avec l'Italie (arc franco-italien), le zonage sismique est essentiellement de niveau 4 ou de niveau 3. Il s'agit donc d'une action importante pour le dimensionnement des retenues.

Les retenues sont dimensionnées pour le séisme SES (*safety evaluation earthquake*) qui représente le séisme maximal envisageable pour le site. L'objectif est de garantir la stabilité globale et d'éviter la rupture de la structure, même en cas de dommages importants. Le maintien de la fonctionnalité de l'ouvrage n'est pas requis.

Pour l'évaluation des actions sismiques, il est possible d'utiliser soit l'approche forfaitaire, soit des approches spécifiques, qu'elles soient déterministes ou probabilistes.

L'approche forfaitaire consiste à définir la sollicitation sismique horizontale et verticale à partir de l'accélération maximale au bedrock (roche de base). L'accélération est déterminée en fonction de la zone sismique (de 1 à 5) et de la classe de l'ouvrage (A, B, C). Les retenues traitées dans le présent guide sont généralement en classe C et les accélérations suivantes sont alors à considérer :

Zone de sismicité	Accélérations horizontales pour le SES (en m/s²)	Accélérations verticales pour le SES (en m/s²)
1	0,5	0,5
2	0,9	0,8
3	1,4	1,3
4	2,0	1,8
5	3,5	2,8

Tableau 2. *Accélérations à considérer*

Approche normative italienne

Conformément à la réglementation italienne, les actions sismiques de projet sont définies à partir de la dangerosité sismique du site. Ces actions sont exprimées selon l'accélération horizontale maximale attendue en condition de champ libre, sur un sol rigide avec surface topographique horizontale.

Pour les barrages situés dans des zones où, pour une période de retour, $T_{R,}$ de 475 années, l'accélération horizontale maximale, a_g, est supérieure à 0,15 g, il est nécessaire de réaliser une étude sismotectonique du site afin de déterminer l'action sismique de projet.

La période de référence (V_R) est définie en fonction de la durée de vie nominale (V_N) de l'ouvrage et du coefficient d'usage (C_U), selon la formule :

$$V_R = V_N C_U$$

Pour les barrages de dimensions modestes (hauteur ne dépassant pas 15 m et volume de retenue ne dépassant pas 1 000 000 m^3), il convient de déterminer la catégorie de barrage à laquelle on fait référence pour définir la durée de vie nominale :

- barrages d'importance stratégique : barrages dont la fonctionnalité, en cas de séisme, est essentielle pour les objectifs de protection civile ;
- barrages présentant un risque significatif en cas d'effondrement : toutes les grandes digues et celles classées comme telles par les règlements régionaux ;
- barrages d'importance normale : tous les barrages ne relevant pas des catégories A et B.

Les valeurs de vie nominale (V_N) et de coefficient d'usage (C_U) sont données dans le tableau suivant :

Catégorie	V_N (année)	C_U
A	≥ 100	2
B	≥ 50	1,5
C	≥ 50	1

***Tableau 3**. Valeurs de vie nominale et coefficients d'usage*

Valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques

La détermination des paramètres géotechniques relatifs aux fondations et au sol du remblai est fondamentale pour l'élaboration du modèle géotechnique. Les paramètres géotechniques recherchés visent à caractériser le poids spécifique des matériaux, leurs propriétés mécaniques de déformabilité et de résistance et leurs propriétés hydrauliques. Les principaux paramètres géotechniques intervenant dans les justifications sont :

- la cohésion non drainée pour les calculs à court terme en contraintes totales (c_u) et la cohésion effective à long terme pour les calculs en contraintes effectives (c') ;
- les angles de frottement en conditions non drainées (Φ_u) et à long terme (Φ') ;
- le poids volumique humide γ_h, saturé γ_{sat} ou sec γ_d ;
- les paramètres géotechniques hydrauliques : les perméabilités horizontale k_h et verticale k_v ;
- les paramètres élastiques (E, ν) pour les calculs par éléments finis.

Les paramètres géotechniques sont pris en compte dans les notes de calculs à travers leurs valeurs caractéristiques (notées généralement R_k). La valeur caractéristique d'un paramètre géotechnique est une estimation prudente de la valeur du paramètre du matériau.

L'étendue de la zone de la fondation ou du remblai qui gouverne le comportement de l'ouvrage vis-à-vis d'un état-limite considéré est, sauf exception, beaucoup plus grande que celle qui intervient dans un essai de laboratoire ou *in situ*. Par conséquent, la valeur du paramètre qui contrôle le comportement de l'ouvrage n'est pas la valeur ponctuelle mesurée localement, mais une valeur moyenne sur une certaine surface ou un certain volume de sol. La valeur caractéristique correspond à une estimation prudente de cette valeur moyenne. Elle ne peut résulter d'un seul calcul statistique et doit faire appel au jugement de l'expert.

Le choix des valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques adoptées dans les notes de calculs par l'ingénieur géotechnicien doit être justifié de façon minutieuse et motivée. Ce choix doit s'appuyer sur trois types d'informations :

- une campagne de reconnaissances géologique et géotechnique, comprenant de nombreux essais d'identification et, en général, quelques essais de cisaillement ;
- le retour d'expérience du géotechnicien issu de matériaux analogues ou de sites voisins. Ce retour d'expérience doit être détaillé et référencé dans les notes de calculs ;
- la connaissance des valeurs des paramètres géotechniques pour ce type de matériaux issues de la littérature. Les références bibliographiques utilisées dans les notes de calculs doivent être citées.

En toute hypothèse, le géotechnicien doit adopter une grande prudence dans le choix des paramètres géotechniques caractéristiques, conduisant notamment à retenir en général des valeurs nulles ou très faibles pour la valeur caractéristique de la cohésion effective. Cette prudence est particulièrement recommandée sur le paramètre de la cohésion pour les projets de petite hauteur de remblai, pour lesquels, d'une part, il y a en général peu d'essais, donc peu de moyens de garantir une valeur fiable, d'autre part, la cohésion joue un rôle déterminant sur les critères de stabilité.

Par ailleurs, on recommande de procéder à des calculs de sensibilité portant sur les paramètres clés, notamment les paramètres de résistance au cisaillement. Cette démarche permet de mettre en évidence les paramètres prépondérants et de tenir compte des effets de seuils. Les études de sensibilité réalisées doivent figurer dans les notes de calculs de stabilité.

États-limites et justifications correspondantes

Les principaux états-limites à justifier sont les suivants :

- état-limite ultime de glissement pour les remblais, la fondation et les déblais ;
- état-limite ultime de glissement du DEG ;
- état-limite ultime de stabilité d'ensemble (site, versant) ;
- état-limite de rupture par érosion interne ;
- état-limite de déformation (ouvrages rigides, remblai, fondation) ;
- état-limite de la liquéfaction (fondations avec sols lâches).

État-limite ultime de glissement pour les remblais, la fondation et les déblais

Cette vérification consiste à analyser le risque de glissement du barrage (remblais, fondation, déblais) le long d'une surface de rupture, qui peut se situer à la base de la fondation ou à l'intérieur du barrage.

On examine le comportement sous l'effet de forces horizontales ou de sollicitations sismiques. Le calcul consiste à comparer les forces résistantes (poids du remblai, résistance du sol) aux forces de glissement. Les méthodes de calcul en rupture circulaire conviennent généralement pour les cas classiques. Les profils retenus doivent assurer la stabilité des deux talus de l'ouvrage, de la fondation et des déblais de la cuvette.

On ne détaille pas ces méthodes de justification largement décrites dans la littérature et intégrées dans les principaux codes de calculs (TALREN, SLOPE/W, etc.). En France, les conditions d'états-limites sont données dans le guide « Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai » (CFBR, 2015).

État-limite ultime de glissement du DEG

Voir section « Conception et réalisation d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane » (p. 60).

État-limite ultime de stabilité d'ensemble (site, versant)

Il s'agit de vérifier la stabilité au grand glissement de la masse du sol en remblai ou déblai, et de la pente naturelle (versant). Pour cela, on applique les méthodes de justification de stabilité de pente (circulaire ou non circulaire). Cette vérification est à effectuer en situation durable d'exploitation et en situation accidentelle sismique, en prenant en compte les charges apportées par l'ouvrage.

État-limite de rupture par érosion interne

La stabilité des ouvrages à l'érosion interne doit être analysée. Cela nécessite :

- d'identifier les chemins de percolation potentiels, y compris en cas de défaillance des organes d'étanchéité (la géomembrane), de filtration (les géotextiles) ou de drainage ;
- le long de ces chemins de percolation, de prendre les dispositions assurant la stabilité interne des matériaux de remblai.

La stabilité interne des matériaux de remblai est assurée si les conditions de filtre suivantes sont satisfaites :

- les conditions d'autofiltration d'un remblai pseudo-homogène doivent être assurées en cas d'écoulements dans le remblai liés à la défaillance de l'étanchéité et du drainage ; le cas échéant, le concepteur peut prévoir un dispositif spécifique de protection tel qu'une butée de pied équipée d'un filtre ;
- à l'interface entre deux matériaux de remblai : les matériaux du remblai le plus fin ne doivent pas pouvoir être entraînés dans les vides du remblai le plus grossier ;
- à l'interface remblai-rocher : les matériaux de remblai doivent être suffisamment grossiers pour ne pas être entraînés dans les fissures du rocher.

On ne détaille pas ces méthodes de justification décrites dans la littérature et nous renvoyons le lecteur français au guide « Érosion interne dans les ouvrages hydrauliques » (Deroo et Fry, 2023) et au guide « Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai » (CFBR, 2015).

État-limite de déformation (ouvrages rigides, remblai, fondation)

Pour la plupart des retenues, les fondations sont peu compressibles (fondations rocheuses ou moraines surconsolidées) et les déformations de la fondation restent très limitées. Les notes de calculs se contentent alors de préciser l'absence de déformations attendues compte tenu de la géologie du site.

Toutefois, notamment en zone de piémont, certaines configurations de projet nécessitent d'examiner la déformation des fondations, notamment en présence de sols sableux ou limoneux ou argileux. Dans ces situations, il s'agit d'évaluer la capacité du sol de fondation à supporter le poids du barrage sans subir de tassements excessifs. Le tassement doit être limité pour ne pas modifier la géométrie du remblai ni générer d'instabilités.

Le cas échéant, les notes de calculs doivent justifier les états-limites liés à la déformation du sol : 1) l'état-limite ultime de capacité portante du sol et 2) l'état-limite de service de tassement. Ils concernent essentiellement les ouvrages rigides dotés de fondations superficielles,

tels que les locaux techniques et les évacuateurs de crues posés sur remblai, pour lesquels en France le guide CFBR 2015 ou encore l'Eurocode 7 s'appliquent intégralement. Ces états-limites peuvent également concerner le remblai du barrage lui-même pour la vérification de la compatibilité des déformations vis-à-vis des conduites sous remblai ou de la géomembrane au voisinage des ouvrages en béton.

Vérification de la sensibilité à la liquéfaction

En présence de sols lâches et saturés en fondation, l'action sismique peut déclencher des phénomènes de liquéfaction, avec perte temporaire de la résistance au cisaillement et augmentation des déformations permanentes. Ce processus peut se manifester aussi bien en concomitance avec le séisme qu'en phase postsismique, voire statique, par effet de la lente dissipation des surpressions interstitielles induites par les sollicitations cycliques. La susceptibilité à la liquéfaction dépend de multiples facteurs, dont la granulométrie, la densité initiale et l'énergie transmise par le séisme. Dans les cas où des horizons de la fondation présentant un potentiel de liquéfaction sont identifiés, il est nécessaire d'évaluer leur impact en matière de déclenchement d'instabilité et de compatibilité des déplacements avec l'intégrité des organes d'étanchéité.

En cas de susceptibilité à la liquéfaction, la conception doit inclure des mesures d'atténuation appropriées, telles que l'amélioration des sols vulnérables, l'optimisation du système de drainage ou l'adoption de géométries qui réduisent les contraintes dans les zones critiques.

Conception et réalisation des ouvrages géotechniques

Préparation du terrain de fondation

Pour les retenues d'altitude dont le barrage et la cuvette sont entièrement étanchés par une géomembrane, la fondation nécessite généralement peu de préparation. Celle-ci consiste tout d'abord en la réalisation de déblais dans la cuvette pour accroître le volume de stockage disponible et pour obtenir tout ou partie des matériaux qui sont ensuite mis en place et compactés en remblai.

En montagne ou en zones de piémont, les fondations classiques sont constituées de roches ou de moraines. Sur des fondations rocheuses, elles nécessitent un dégagement du rocher altéré en surface. Sur des moraines généralement surconsolidées, elles nécessitent la séparation de la terre végétale superficielle pour une réutilisation ensuite en couverture du talus en aval ou des déblais.

Quelques précautions classiques sont à considérer :

- il est nécessaire de s'assurer d'une bonne stabilité des talus de déblais. La création de redans est suggérée pour stabiliser les premières couches de remblai et s'assurer un bon compactage ;
- afin de limiter les risques de tassement différentiel, l'élimination des matériaux compressibles est obligatoire et les différences de rigidité d'une zone à l'autre peuvent conduire à rectifier la fondation ;
- des risques d'érosion ou de dissolution interne peuvent être provoqués suite à une défaillance de la géomembrane, dans le cas où le terrain est de nature friable ou irrégulier tel que le karst ou le gypse.

Conception des remblais

Conception en déblai-remblai

La conception standard d'une retenue est celle en déblai-remblai (figure 2). L'ouvrage est conçu en tenant compte du volume d'eau souhaité, avec les déblais extraits de la cuvette, servant ensuite de remblais. L'équilibre entre déblai et remblai n'est pas toujours satisfait. Dans le cas où il manque de remblais, des matériaux extérieurs sont utilisés. À l'inverse, les déblais excédentaires sont acheminés hors du site ou peuvent servir de protection contre les aléas de montagne (avalanches, laves torrentielles ou chutes de blocs) ou autres usages liés à l'aménagement. Ces retenues sont étanchées artificiellement par un dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG) sur la totalité de leur surface (talus en amont et cuvette), les matériaux en montagne ou en zones de piémont ayant le plus souvent de faibles caractéristiques d'étanchéité.

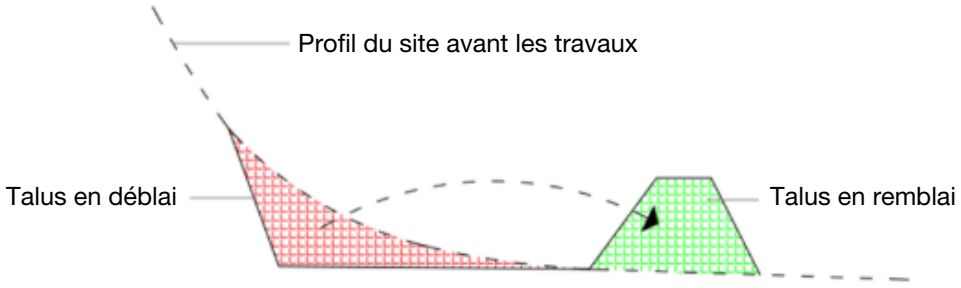


***Figure 2**. Retenue d'eau en déblai-remblai*

Pente des talus

Les pentes des talus en amont sont dimensionnées en fonction du dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG) envisagé, et en particulier de son potentiel support de recouvrement. Celles-ci sont également influencées par la qualité de la fondation, le matériau et la hauteur de remblai.

Pour un prédimensionnement lors des études d'avant-projet, des valeurs indicatives des pentes de talus en amont et en aval peuvent être utilisées pour les barrages en remblai avec géomembrane recouverte (tableau 4).

Hauteur	Type de barrage	Amont	Aval
< 5 m	Avec géomembrane recouverte	1/3	1/2
5 à 10 m	Avec géomembrane recouverte	1/3	1/2
10 à 15 m	Avec géomembrane recouverte	1/3	1/2,25

***Tableau 4**. Valeurs indicatives des pentes maximales des talus d'un barrage en terre et en matériaux grossiers sur fondation non compressible*

Lors des études du projet, un dimensionnement précis doit être établi. Celui-ci repose sur des essais de laboratoire et des calculs de stabilité.

Il n'est pas recommandé de concevoir une risberme sur le talus en amont, qui présente plusieurs inconvénients tels que le blocage de la glace, l'entraînement de blocs rocheux et des problèmes de continuité du drainage.

En dehors des zones refuges écologiques (voir section « Intégration environnementale des retenues », p. 82) et pour des raisons d'intégration paysagère, des enrochements peuvent être prévus légèrement sous la cote normale d'exploitation, pour recouvrir la partie supérieure du talus et de la géomembrane (figure 3). Cette pratique favorise l'intégration de l'ouvrage dans son environnement tout en offrant une protection.

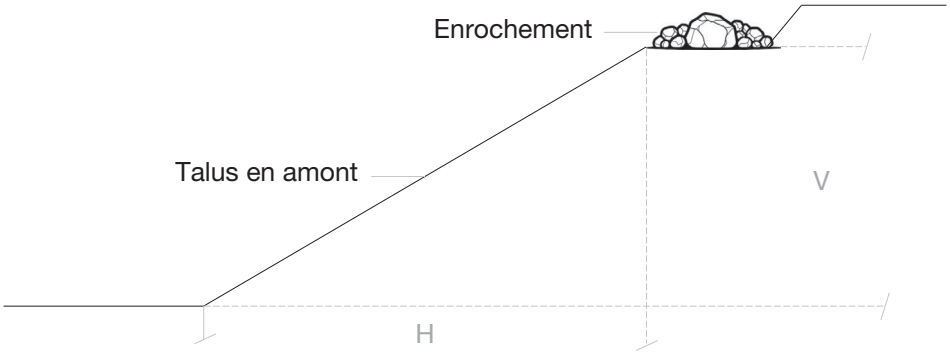


***Figure 3**. Enrochement sur la partie supérieure du talus en amont pour des raisons paysagères*

Concernant les déblais, ils doivent être réalisés sans déstabiliser le versant. Leur pente doit résulter d'une étude de stabilité qui concerne le talus en déblai, le versant au pied duquel il s'inscrit et le DEG. Les talus en déblais de sols meubles ne doivent *a priori* pas dépasser 1/2. L'analyse des conditions de réalisation des déblais doit être conduite dans le cadre des études géologiques et géotechniques du projet et intégrer la stabilité des versants.

Couronnement et crête

La largeur en crête doit être au minimum de trois mètres, pour permettre la circulation des véhicules d'entretien. En ajoutant une éventuelle clôture en tête de talus et l'espace de mise en place du DEG, cette largeur doit être portée à quatre à cinq mètres.

Afin de résister aux conditions climatiques et à la circulation, les matériaux en crête doivent avoir une forte proportion d'éléments grossiers. Si le corps du barrage est composé d'éléments fins, alors une couche de transition granulométrique s'impose. Ces différentes couches doivent mesurer entre 30 et 50 cm d'épaisseur. La végétalisation de la crête est recommandée pour des questions d'intégration environnementale (voir section « Intégration environnementale des retenues », p. 82).

Pour permettre une meilleure insertion environnementale des retenues, elles sont conçues dans la mesure du possible sans clôture. Si celles-ci sont nécessaires pour assurer la sécurité des usages (retenues d'altitude dans les stations de sports d'hiver, par exemple), elles sont conçues en matériaux naturels tels que le bois, et de préférence amovibles pour permettre leur dépose hors période de ski, par exemple.

Protection du talus en aval

Le talus en aval doit être protégé vis-à-vis du risque d'érosion par ruissellement. La couche de terre végétalisée d'espèces herbacées assure la protection contre l'érosion due au ruissellement.

Le choix adopté pour la protection des talus en aval des retenues doit être compatible à une bonne intégration paysagère et ne doit pas porter atteinte à la faune et à la flore locales. Le choix de matériaux plus adaptés que les enrochements participe notamment à l'intégration des retenues dans leur environnement.

Hauteur du remblai et revanche

La hauteur d'un barrage est obtenue en considérant (figure 4) :

- la cote de la retenue normale (RN) en fonction de la topographie et des volumes de déblais, afin de stocker l'eau souhaitée, et en intégrant la valeur estimée du tassement de l'ouvrage et de la fondation ;
- le niveau des plus hautes eaux (PHE) en crue ;
- la revanche (R) sur les PHE nécessaire pour protéger la retenue contre les vagues (CFBR, 2013 : « Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages »).

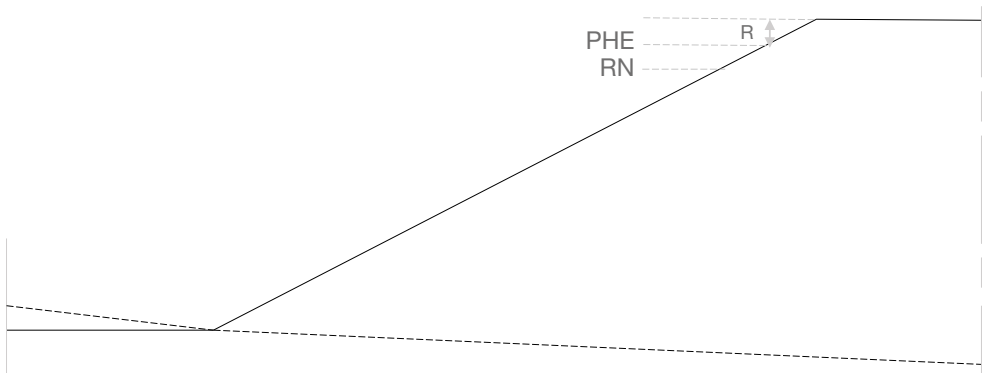


***Figure 4**. Coupe de détail associant la hauteur du remblai et la revanche (R) (PHE : niveau des plus hautes eaux en crue ; RN : retenue normale)*

Protection du talus en amont et dimensionnement du rip-rap

Dans le cas de géomembrane recouverte par des enrochements ou un rip-rap, ces protections doivent résister à la fois 1) aux vagues générées par le vent et 2) à la glace et à la neige.

Le dimensionnement face aux vagues est détaillé dans le bulletin CIGB n° 91 (GIGB/ICOLD, 1993) et dans le guide CFGB (2002) qui définit les règles pour l'épaisseur et le diamètre des enrochements. Par ailleurs, pour éviter le risque de poinçonnement causé par la couche de recouvrement, le rip-rap repose sur une couche d'assise en sable et graviers placée sur un géotextile antipoinçonnant, c'est-à-dire avec la fonction protection, de manière à éviter les endommagements par poinçonnement de la géomembrane. La couche support ne doit pas présenter un diamètre maximal supérieur à 30 mm et son épaisseur est de 0,20 à 0,30 m.

Le dimensionnement vis-à-vis de l'action de la glace est détaillé dans le bulletin CIGB n° 105 (CIGB/ICOLD, 1996). Plusieurs phénomènes liés à la glace peuvent affecter le talus en amont des retenues en altitude :

- l'action de gel et du dégel : en cas de baisse du niveau de la retenue, le gel de l'eau dans les matériaux sous-jacents peut mener à un soulèvement du rip-rap ;
- l'action des glaces lors de la baisse du plan d'eau : la formation de glace peut, à la suite d'une baisse du plan d'eau, glisser et détériorer les matériaux du rip-rap. Un talus en amont avec une pente inférieure à 1/3 permet de minimiser ces risques ;
- l'action des glaces lors de la montée du plan d'eau : de petits blocs d'enrochements peuvent être déplacés.

Le marnage apparaît être le principal moteur d'agression du talus en amont par la glace. Aucune méthode n'est établie pour dimensionner le rip-rap vis-à-vis des endommagements

liés à la glace, et on estime qu'un rip-rap dimensionné aux vagues est suffisant pour résister à la glace. Une attention particulière est à prendre en compte pour les petites retenues d'altitude, où une longueur limitée du fetch conduit à une faible hauteur de houle, alors que les épaisseurs de glace peuvent être importantes (supérieures à 0,5 m). Dans ces cas, c'est l'estimation de l'épaisseur maximale de glace qui fixe l'épaisseur du rip-rap.

Tassements

Les tassements du remblai et des fondations doivent être évalués lors des études de conception. En règle générale, les tassements à long terme sont faibles. En effet, le remblai est généralement bien compacté et constitué de matériaux grossiers, tandis que les fondations sont le plus souvent constituées de sols non compressibles tels que la moraine. Dans le cas de fondations déformables et si des tassements à long terme sont envisageables, une contre-flèche doit être prévue par le concepteur, visant à surélever la zone de remblai la plus haute.

Protection vis-à-vis du torrent

Lors des études préliminaires, les risques de crues ou de divagations d'un torrent doivent être analysés. Si la retenue présente ces risques, des mesures de protection doivent être appliquées, notamment la protection des berges du torrent aux endroits critiques. Les techniques de génie végétal doivent être favorisées dans la mesure du possible. En toute hypothèse, les techniques de protection doivent respecter l'environnement, la faune et la flore et, de ce fait, s'intégrer dans le paysage.

Dispositifs de drainage

Drainage du barrage

Les retenues étudiées dans le présent guide doivent être dotées d'un dispositif de drainage permettant d'évacuer d'éventuels écoulements provoqués par d'éventuels défauts de soudure ou endommagements de la géomembrane du talus en amont, de manière à protéger à la fois 1) le DEG et 2) le remblai. Ce dispositif de drainage doit permettre d'éviter l'érosion de la couche support du DEG, l'érosion interne du remblai ou le glissement du talus en aval. Ces retenues étant le plus souvent de taille petite à moyenne, c'est le même système qui assure le drainage du DEG et du remblai. Il est classiquement intégré dans le DEG, et est le plus souvent constitué d'un drain géosynthétique (figure 5).

La conception du dispositif de drainage intégré dans le DEG est traitée de façon détaillée dans la section « Conception et réalisation d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane » (p. 60) de ce guide.

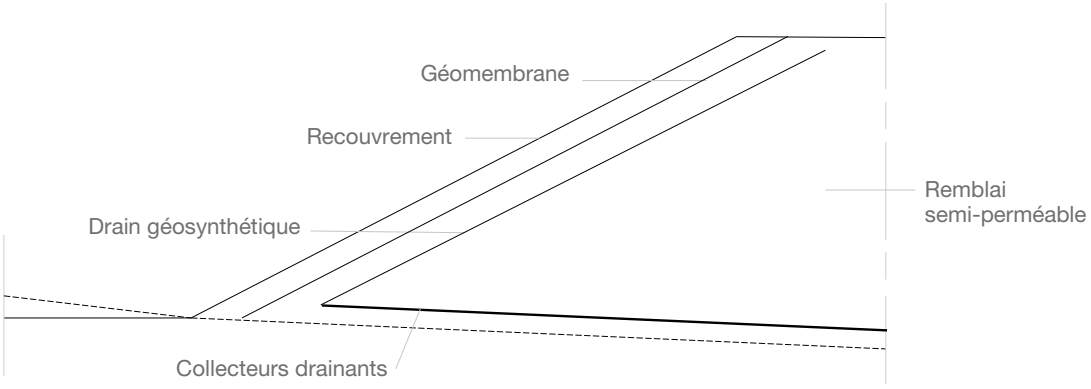


***Figure 5**. Drainage avec géomembrane recouverte et remblai semi-perméable*

En complément du dispositif de drainage intégré dans le DEG, un réseau de collecteurs drainants est mis en place pour assurer l'évacuation des débits drainés par le système de drainage du DEG. La conception du réseau de collecteurs drainants prend en compte la nature du dispositif de drainage (le plus souvent constitué de drains géosynthétiques) et permet, par leur position et leur pente, une évacuation des débits sans mise en charge des drains. On distingue les collecteurs drainants, généralement perforés sur la demi-circonférence supérieure et fermés en partie basse, et les collecteurs non perforés (ou « aveugles »).

Pour collecter les eaux de fuites provenant du drainage sous le DEG, on dispose un collecteur drainant le long du pied du talus en amont et on traverse le remblai vers l'exutoire en aval par un ou plusieurs collecteurs aveugles. On adopte à la conception des réseaux gravitaires ayant une pente suffisante pour limiter le risque de contre-pente locale due à une réalisation imprécise ou à un tassement différentiel. Cette pente doit être au minimum de 1 %. Les collecteurs peuvent être de plusieurs natures : PEHD, PVC, métalliques, béton, etc. Ils doivent être choisis en fonction des charges verticales auxquelles ils sont soumis.

Il est recommandé de compartimenter le dispositif de drainage sous la géomembrane pour permettre de mesurer séparément divers secteurs, et au minimum de séparer les débits provenant du remblai de ceux provenant des déblais et de la cuvette. Ainsi, en cas de fuites significatives, le diagnostic puis la réparation seront simplifiés.

Drainage de la cuvette

En cas de présence de nappes susceptibles de remonter jusqu'à la cuvette et pouvant avoir été détectées lors des études géotechniques, un drainage spécifique complémentaire du drainage comprenant des tranchées et ses propres exutoires peut être prévu. Ce dispositif de drainage peut, si nécessaire, être prolongé sous le remblai.

Drainage des déblais de la retenue et des versants

Cette section traite des venues d'eaux naturelles, qu'il est nécessaire de drainer soigneusement pour assurer la tenue des pentes de déblais ou des pentes de versants et pour éviter la mise sous pression de la géomembrane.

On réalise pour cela des éperons drainants pour traiter des venues d'eau ponctuelles ou des masques drainants pour des venues d'eau importantes. Ces drainages sont réalisés en matériaux granulaires. Un filtre géotextile correctement dimensionné leur est systématiquement associé.

Les exutoires des drains des déblais de la retenue sont reliés aux drains de la cuvette s'ils existent ou rejoignent l'aval du barrage sans être confondus avec les collecteurs des drains du DEG. L'exutoire des drains des versants surplombant la retenue est un fossé à ciel ouvert ou un drain de pied de versant et doit se situer hors de l'emprise de la retenue. Un raccordement au système de drainage de la retenue doit être évité.

Phasage et contenu des études de conception des ouvrages géotechniques

Le maître d'œuvre produit l'étude d'avant-projet et l'étude de projet, constituant les deux phases principales de conception d'un ouvrage géotechnique. Ces phases distinctes prennent notamment en compte la caractérisation géologique et géotechnique. Elles visent à maîtriser les risques géologiques et géotechniques, en approfondissant les reconnaissances et en affinant la conception du projet.

Phase	Principes	Contenu
Étude d'avant-projet	Phase d'investigation Caractéristiques du site Choix du type d'ouvrage en remblai et de l'étanchéité de la fondation Prédimensionnement Précaractérisation des matériaux Adaptation du projet au site	Rappel du bilan de l'étude préliminaire de site. Reconnaissances géologiques complémentaires. Investigations géotechniques : – reconnaissances de terrain : puits à la pelle hydraulique, géophysique, sondages carottés ; – essais de laboratoire : identification (teneur en eau, granulométrie, limites d'Atterberg, VBS, GTR). Synthèse des investigations : – résumé des résultats obtenus à la suite des investigations réalisées ; – interprétation des investigations : aspect visuel des coupes géologiques, quantité et qualité des matériaux, hydrologie du site ; – définition du programme d'investigation géotechnique pour la phase d'étude du projet. Éléments d'aménagement : – réalisation d'un diagnostic avancé de faisabilité de l'ouvrage ; – fondation : mode de traitement de l'étanchéité de la cuvette, caractérisation du sol d'assise du remblai, principes généraux de mise en œuvre ; – remblai : matériaux constitutifs, dimensions générales de l'ouvrage (côte de la crête, largeur en crête, hauteur maximale au-dessus du terrain naturel TN, côte de fond de la retenue, estimation des pentes en amont et en aval), principes de drainage et d'étanchéité.
Étude de projet	Dimensionnement avec investigations supplémentaires nécessaires Caractérisation complète des matériaux Dimensionnement et vérifications des hypothèses d'avant-projet Calculs de stabilité	Rappel de la synthèse des études précédentes. Investigations géotechniques complémentaires : – reconnaissances de terrain complémentaires (si difficulté) : densification des sondages à la pelle mécanique, sondages destructifs ou carottés, pressiomètre, pénétromètre ; – essais de laboratoire : compactage (Proctor ou CBR), mécanique et hydraulique (essai triaxial, compressibilité à l'œdomètre, essais de perméabilité, etc.), essais spécifiques aux roches. Synthèse des investigations : – rappel de la synthèse d'avant-projet et résumé des investigations ; – interprétation finale des investigations : coupes et profils géologiques définitifs, descriptif détaillé des matériaux. Dimensionnement : – traitement des fondations : purges, stabilité des fouilles, rectification du rocher, etc. ; – remblai : profils et détails géométriques ; – calculs de stabilité du remblai, du DEG, des déblais, des versants. Recommandations : – construction : techniques d'excavation, de compactage, particularités de mise en œuvre, suivi du chantier ; – suivi : précision d'un suivi spécial si particularités de construction dues à la géologie.

***Tableau 5**. Les grandes étapes de conception durant les deux phases du projet*

Bien que dans le cas des petites retenues, la partie géotechnique puisse être confiée à un bureau d'études géotechniques collaborant avec la maîtrise d'œuvre, il est conseillé qu'un seul et unique cabinet d'ingénierie, avec de bonnes notions en géotechnique, traite l'intégralité du projet. Quoi qu'il en soit, le maître d'œuvre supervise le projet, de l'analyse géotechnique, en passant par la conception du DEG et tous les autres domaines du projet.

Les sous-parties ci-dessous regroupent les grandes étapes de conception durant les deux phases du projet, y compris les investigations et les essais géotechniques associés. Chaque projet étant spécifique, certaines adaptations sont nécessaires.

Conception et réalisation d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane

Paramètres principaux de conception et d'exploitation des DEG

Généralités concernant les DEG et les matériaux géosynthétiques

Dans tout système d'étanchéité d'un ouvrage de génie civil, la géomembrane seule ne suffit pas. Elle s'intègre dans un dispositif complet qui comprend la géomembrane elle-même, des matériaux perméables (géotextiles et produits associés) assurant des fonctions de renforcement, de drainage et de filtration, les assemblages entre les panneaux, les raccordements aux ouvrages hydrauliques (arrivées et évacuations d'eau), ainsi que les ancrages garantissant la stabilité du dispositif.

L'ensemble de ce système d'étanchéité, appelé DEG, constitue une solution d'étanchéité fiable lorsqu'il est correctement conçu, réalisé, suivi et entretenu. La performance ainsi que la durabilité d'un DEG reposent sur une étude approfondie et une mise en œuvre soignée, prenant en compte tous les composants du dispositif. C'est particulièrement le cas pour les géomembranes. Ces matériaux relèvent de l'ingénierie et doivent être traités comme tels : contrôle de qualité à la production, essais normalisés, méthodes de dimensionnement, contrôle de la qualité de pose et suivi de la durabilité comprenant des inspections sur le terrain.

Pour concevoir un DEG dans des retenues d'eau, et plus généralement dans les barrages, plusieurs documents de référence ont été édités par des sociétés savantes spécialisées :

- le guide publié par la commission internationale des grands barrages (CIGB/ICOLD, 2010), s'intitulant « Dispositifs d'étanchéité par géomembranes pour les barrages. Principes de conception et retour d'expérience » ;
- le guide publié par le comité français des géosynthétiques (CFG, 2017), s'intitulant « Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par géomembranes ».

Ces deux guides de recommandations sont généraux et exhaustifs en matière de détails techniques et couvrent plus de catégories d'ouvrages hydrauliques que les retenues d'eau de moyenne et de haute altitude traitées dans le présent guide. Il est donc conseillé au lecteur de consulter ces documents.

Du côté normatif, le présent guide fait référence à plusieurs normes :

- la norme NF EN ISO 10318-1 qui définit tous les termes liés aux géosynthétiques ;
- la norme NF EN 13361 qui définit les caractéristiques requises des géomembranes et des géosynthétiques bentonitiques pour l'utilisation dans la construction des réservoirs et des barrages ;

• la norme NF EN 13252 qui définit les caractéristiques requises des géotextiles et produits apparentés pour l'utilisation dans les systèmes de drainage ;

• la norme NF EN 13254 qui définit les caractéristiques requises des géotextiles et produits apparentés pour l'utilisation dans la construction de réservoirs et de barrages ;

• La norme NF P 84-500 qui définit les termes relatifs aux géomembranes ainsi que ceux relatifs aux dispositifs d'étanchéité par géomembranes ;

• la norme NF G 38-061 centrée sur le dimensionnement et les éléments de conception des géotextiles et produits apparentés utilisés dans les systèmes de drainage et de filtration ;

• la norme NF G 38-067 centrée sur la justification du dimensionnement et les éléments de conception des géosynthétiques, géotextiles et produits apparentés utilisés dans la stabilisation d'une couche mince sur pente.

Les DEG incluent systématiquement plusieurs géosynthétiques : une géomembrane pour assurer la fonction d'étanchéité, des géotextiles pour assurer la fonction de protection (parfois appelée antipoinçonnement), et des produits apparentés aux géotextiles pour assurer la fonction de drainage (également appelés dans ce cas précis géocomposites de drainage) ou pour assurer la fonction de renforcement (également appelés dans ce cas précis géogrilles de renforcement).

L'utilisation de géomembranes, de géotextiles et de produits apparentés pour la construction de réservoirs et de barrages est réglementée respectivement par les normes européennes NF EN 13361 (relative aux géomembranes), NF EN 13254 (relative aux géotextiles). Ces deux normes, complétées par la norme NF EN 13252, s'adressent principalement aux producteurs de géosynthétiques (géomembranes et géotextiles), car elles précisent les essais à réaliser obligatoirement afin d'établir la déclaration de performance (DoP) du produit (relative à sa fonction), indispensable dans le cadre du marquage CE.

Ces normes précisent également le contrôle de la production en usine (CPU) que le fabricant doit mettre en œuvre pour chaque produit fabriqué :

• les contrôles et essais à effectuer avant et/ou durant la fabrication selon une fréquence établie dans le plan d'essai du CPU et/ou ;

• les vérifications et essais à effectuer sur les produits finis selon une fréquence établie dans le plan d'essai du CPU.

Ces deux normes servent indirectement les maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre ainsi que les bureaux d'études :

• les deux normes ne précisent pas le produit à choisir ; en revanche, ces normes permettent aux maîtres d'ouvrage et donneurs d'ordre d'exiger des produits conformes aux normes EN, de comparer les produits à partir de leurs performances déclarées et enfin de rédiger des cahiers des charges ;

• les deux normes ne précisent pas de valeurs dimensionnantes au regard des ouvrages à construire (par exemple exigence d'une épaisseur minimale d'une géomembrane pour une retenue d'eau d'une hauteur d'eau de plus de 10 m) ; en revanche, ces normes permettent aux bureaux d'études et concepteurs de disposer des valeurs et des caractéristiques des produits issus d'essais normalisés, notamment en matière de durabilité.

Il est donc important que les maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre ainsi que les bureaux d'études soient en étroite interaction avec les producteurs de géosynthétiques (géomembranes et géotextiles), afin de disposer des DoP des produits qui seront mis en œuvre dans le DEG considéré.

Principaux paramètres de conception

Un des premiers paramètres à considérer est les enjeux en aval de l'ouvrage. Cela permet d'évaluer l'impact potentiel d'un dysfonctionnement sur les plans humains, économiques, sociaux et environnementaux.

Ensuite, les caractéristiques du site intègrent la localisation, la topographie, l'accessibilité, les conditions climatiques (variations thermiques attendues, présence de glace attendue, exposition au vent, etc.), le contexte hydrogéologique (position d'une éventuelle nappe phréatique, présence d'arrivées d'eau et d'infiltrations, interactions avec la nappe phréatique, etc.), le contexte géologique (stabilité des talus naturels, présence de cavités ou d'effondrements karstiques, risque de tassements différentiels, présence d'éléments agressifs ou de matières fermentescibles, présence de glaciers en profondeur, etc.) et enfin le contexte environnemental (présence de zones humides naturelles, présence d'animaux, etc.)

Il est également nécessaire de considérer l'ensemble des aspects géométriques de l'ouvrage :

- l'emprise foncière : il est essentiel de prévoir une surface suffisante pour garantir la stabilité structurelle de l'ouvrage, faciliter son entretien et assurer la sécurité pendant et après sa construction ;
- les formes générales : les formes simples sont à privilégier pour limiter les assemblages de la géomembrane et éviter la formation de plis ;
- les pentes : pour les talus intérieurs étanchés, il est recommandé de maintenir les pentes entre 1/2,25 et 1/3. Ces valeurs garantissent la stabilité au glissement de la structure support et du recouvrement, une mise en œuvre plus facile et une pose de meilleure qualité pour la géomembrane. Des pentes plus raides nécessitent des études spécifiques ;
- la crête de talus : une largeur de 5 m (ou 4 m au minimum) au niveau de la crête est conseillée pour intégrer une tranchée d'ancrage et permettre la circulation des engins sans risque d'endommager la géomembrane ;
- la pente du fond : une inclinaison minimale de 2 % est préconisée pour faciliter le drainage et le nettoyage, tout en évitant absolument les contre-pentes, afin de garantir une vidange efficace du bassin et un drainage optimal des eaux et gaz situés sous la géomembrane (sous-pressions à éviter). Les angles entre le fond, les talus et la crête doivent être arrondis avec un rayon d'au moins 0,50 m, afin d'améliorer le contact avec la géomembrane et d'évacuer les gaz ;
- les dimensions minimales d'ancrages : les ancrages jouent un rôle clé dans la fixation du DEG, notamment à travers des tranchées d'ancrage de dimensions minimales 0,5 m × 0,5 m. Leur conception doit tenir compte des efforts de traction liés à la géométrie du talus et aux sollicitations externes.

Les conditions de mise en œuvre et de réalisation prennent en compte les contraintes liées aux délais et à la sécurité, aux conditions climatiques durant la réalisation et à l'accessibilité du site. Elles doivent intégrer une attention à la manutention des géosynthétiques, à leur stockage sur site et aux circulations des engins lors de l'installation.

La conception du DEG doit considérer sa durabilité. Le propriétaire de l'ouvrage doit analyser les bénéfices d'une conception robuste et durable au regard des coûts de construction et des futurs coûts de réparation en cas de dommages, pouvant conduire au cas extrême au remplacement prématuré de l'ensemble du DEG. Les points clés à analyser sont :

- la nature et l'épaisseur de la géomembrane ;
- la présence ou non d'une couche de recouvrement au-dessus de la géomembrane ayant pour objectif une protection de cette dernière vis-à-vis d'agression mécanique (chute de

blocs, reptation de couche de glace, roulage d'engins, etc.) et d'agression physico-chimique (oxygène moins disponible conduisant au vieillissement des polymères par thermo-oxydation, dégradation des polymères par exposition aux UV du rayonnement solaire, etc.). En particulier, la présence d'une couche de recouvrement bien dimensionnée au-dessus de la géomembrane permet de végétaliser une partie de la retenue pour une meilleure intégration environnementale (voir section « Intégration environnementale des retenues », p. 82).

Principaux paramètres d'exploitation

Les conditions d'exploitation et d'entretien doivent considérer les conditions opérationnelles comme la hauteur d'eau, l'exposition au rayonnement solaire (UV), au vent et aux variations de température, la résistance aux vagues et à l'éventuelle présence attendue de glace, au vandalisme et aux animaux, et, enfin, la facilité d'entretien (curage, nettoyage, inspections régulières et adaptations aux évolutions du site).

D'un point de vue hydraulique, un débit de fuite admissible doit être intégré à la conception de l'ouvrage. Un dispositif de détection de fuite peut être prévu dès la conception afin de procéder à des réparations localisées dans le cas où des fuites compromettraient le bon fonctionnement de l'ouvrage, voire sa stabilité.

Le propriétaire de l'ouvrage étant responsable de la surveillance de l'ouvrage, des dispositions doivent être prises pour garantir la sécurité des utilisateurs et intervenants.

Conclusion sur les paramètres de conception et d'exploitation d'un DEG

Pour garantir l'efficacité et la durabilité du DEG pendant toute sa durée de service, plusieurs paramètres ont été listés ci-dessus, mais cette liste n'est pas exhaustive.

Compte tenu de tous ces paramètres à prendre en compte, il n'existe pas de solution unique pour dimensionner un DEG. Son dimensionnement va donc reposer sur :

- des calculs mettant en œuvre des formules scientifiques ou empiriques, en suivant des normes et des guides de recommandations ;
- des essais de laboratoire pour alimenter les dimensionnements par calcul analytique ;
- l'expérience et le « bon sens » pour les éléments difficilement quantifiables tels que, par exemple, la sécurité des personnes ou la protection contre le vandalisme.

Leur prise en compte garantit la capacité du DEG à répondre aux exigences fonctionnelles et environnementales, même dans des conditions difficiles. Le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre devront y attacher une attention particulière, au regard de la durée de vie attendue du DEG et des conditions d'exploitation.

Composition, conception et réalisation d'un DEG

Éléments constitutifs d'un DEG

Un DEG est un système composé de trois éléments principaux (figure 6), chacun ayant une fonction spécifique : la structure support, la structure d'étanchéité et l'éventuelle structure de protection supérieure.

Il convient de préciser que le terme protection, utilisé pour la « structure de protection », est souvent remplacé par recouvrement, afin d'éviter la confusion qui pourrait être faite avec la fonction de protection qui peut tout aussi bien être assurée par les matériaux placés sous la géomembrane. Autrement dit, la structure support intègre pratiquement systématiquement

une couche ayant la fonction de protection, placée juste au-dessous de la géomembrane, tandis que la structure de protection supérieure est généralement appelée couche de recouvrement et assure la fonction de protection de la géomembrane.

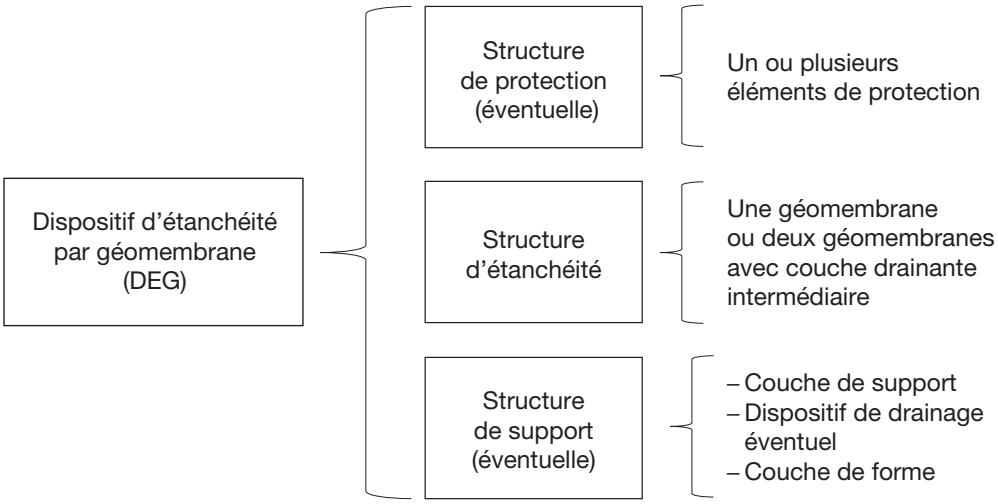


***Figure 6**. Composition d'un DEG selon la norme NF P 84-500*

Fond de forme

Le fond de forme constitue la surface sur laquelle repose le DEG. L'étude géotechnique préalable permet de détecter des risques liés aux cavités ou aux sols solubles, comme les effondrements karstiques ainsi que des risques de tassements différentiels, qui doivent être anticipés pour éviter des tensions sur la géomembrane. La préparation du fond de forme est une étape déterminante pour assurer l'efficacité, la stabilité et la durabilité de l'ensemble de l'ouvrage. Elle doit répondre à des exigences précises en matière de compactage, de propreté, de portance et de géométrie, conformément aux recommandations de l'étude géotechnique préalable. Le pourtour des ouvrages en béton ou autres éléments structurels constitue des zones sensibles pour lesquelles l'utilisation d'engins de compactage adaptés est impérative.

Dans le cas où l'étude géotechnique détecte la présence de matières organiques, susceptibles de libérer des gaz, le fond de forme doit être dégagé de tout élément organique pour garantir une mise en œuvre optimale du DEG. Cela inclut :

- la suppression de la végétation : éliminer toute la terre végétale, les racines et les matières organiques superficielles afin d'éviter tout contact direct entre ces éléments et le DEG, ainsi que les tassements différentiels ou le dégagement de gaz dû à leur décomposition ;
- l'élimination des dépôts organiques épais : dans les cas de sols tourbeux ou d'anciens bassins contenant des effluents organiques, il faut évaluer les tassements totaux prévisibles et adapter les dispositifs en conséquence, prévoir une pente suffisante pour compenser les tassements (entre 3 % et 6 % généralement), et installer un système de drainage des gaz performant pour prévenir les sous-pressions ;
- la compatibilité chimique : en cas de traitement herbicide, il est crucial de vérifier le pH du sol après application pour s'assurer qu'il est compatible avec les géosynthétiques.

L'étude géotechnique permet de déterminer la nécessité d'une couche de forme, en fonction de la granulométrie du fond de forme, susceptible de contenir des particules agressives pouvant endommager la géomembrane.

Concernant les pentes naturelles (en déblai), l'étude géotechnique doit attester de leur stabilité naturelle, aussi bien vis-à-vis de mouvements superficiels que de mouvements profonds, et doit détecter de possibles venues d'eau, pouvant générer des sous-pressions, voire des phénomènes d'érosion sous la géomembrane. Dans le cas de la présence d'une nappe phréatique sous l'ouvrage, des dispositifs adaptés tels que des drainages, des clapets ou un lestage réparti doivent être intégrés pour gérer efficacement ces fluides et ainsi éviter des soulèvements et des tensions dans la géomembrane. Le matériau utilisé pour le lestage doit être compatible avec la géomembrane, et ces dispositifs doivent garantir la stabilité et la longévité du DEG.

Structure support

La structure support d'un DEG, située entre le fond de forme et la géomembrane, doit assurer quatre fonctions essentielles :

- la fonction de stabilité mécanique : elle permet au DEG d'être stable mécaniquement, c'est-à-dire qu'il ne doit pas y avoir de tassement uniforme (sous le poids de la colonne d'eau sous-jacente) ni différentiel (par exemple tassement local lors du passage d'un engin). Cette fonction est assurée par une portance adaptée (à dimensionner) ;
- la fonction de drainage de l'eau et des gaz : elle est décrite plus précisément ci-après ;
- la fonction de filtration : cette fonction est liée à celle de drainage, c'est-à-dire qu'un dimensionnement adéquat, favorisant l'autofiltration des couches granulaires, permet d'éviter le colmatage du dispositif de drainage ainsi qu'une perte des fines de la structure support par migration ou érosion interne ;
- la fonction de protection : le dimensionnement de cette fonction permet d'éviter des endommagements par poinçonnement de la géomembrane positionnée juste au-dessus de la structure de protection. Le CFG a édité le guide « Recommandations pour la protection contre le poinçonnement des géomembranes » (CFG, 2021), qui donne des informations intéressantes pour dimensionner un géotextile pour la fonction protection, même si ce guide n'inclut pas de méthode analytique de dimensionnement dans le cas des retenues d'eau de moyenne et de haute altitude.

La conception de ces différentes couches de la structure support est globale, dans la mesure où une même couche peut assurer plusieurs fonctions, tandis qu'une même fonction peut être assurée par plusieurs couches. En outre, les différentes fonctions à assurer sont en interaction les unes avec les autres. La structure support est conçue en tenant compte de la partie de l'ouvrage que l'on traite (remblai, cuvette et déblai), des caractéristiques du sol en place (en particulier la granulométrie) et des circulations d'eau dans le sol. Elle est donc à étudier et à adapter spécifiquement pour chaque site.

Spécificités de la fonction de drainage de la structure de protection

Le drainage sous la géomembrane répond à plusieurs objectifs qui concourent à éviter les désordres sous la géomembrane :

- recueillir les fuites sous la géomembrane ;
- éviter les sous-pressions hydrauliques, en particulier lors des abaissements rapides du plan d'eau ;
- protéger la structure support des mécanismes d'érosion qui conduisent à la dégradation de la fonction antipoinçonnement de la couche support ;
- dissiper les sous-pressions dues aux gaz ;
- ausculter le barrage et connaître la performance du dispositif d'étanchéité.

Le drainage des retenues d'altitude comprend :

a. le drainage sous la géomembrane sur le remblai ;

b. le drainage sous la géomembrane sur les talus en déblai ;

c. le drainage sous la géomembrane en cuvette ;

d. éventuellement, le drainage des venues d'eau naturelle (talus en déblai, fond de la cuvette, fondation du remblai) ;

e. éventuellement, le drainage propre du remblai.

Les drainages (a), (b) et (c) sont inclus dans le DEG. Ils sont indépendants autant que possible des éventuels dispositifs de drainage des venues d'eau naturelles (d) et du drainage propre du remblai (e) qui sont envisagés dans des situations particulières.

L'usage de géotextiles et de produits apparentés permet de remplacer les drains et les filtres granulaires par des matériaux géosynthétiques d'épaisseurs moindres, faciles à transporter et rapides à mettre en place. Les géocomposites, constitués de plusieurs matériaux dont au moins un d'entre eux est un produit géosynthétique, peuvent assurer plusieurs fonctions ; ainsi, on peut avoir des géocomposites drainants qui comportent une âme drainante et une ou deux faces constituées par des géotextiles filtrants. Ces géocomposites sont plus faciles à mettre en œuvre que des produits indépendants.

Les géosynthétiques assurant les fonctions de drainage et de filtration sont dimensionnés en se référant à la norme NF G 38-061 et au guide « Recommandations pour l'emploi des géosynthétiques dans les systèmes de drainage et de filtration » (CFG, 2012).

En cuvette, la pente du fond doit être supérieure à 2 %. Le dispositif drainant est le plus souvent complété par des tranchées drainantes qui jouent le rôle de collecteurs. Le dispositif de drainage est indispensable dans la plupart des ouvrages.

Pour les talus et dans le cas courant des remblais semi-perméables, un dispositif de drainage est nécessaire.

Le dispositif de drainage du DEG doit aboutir à sa base à un collecteur drainant ; ce collecteur est séparé en plusieurs tronçons, afin de pouvoir identifier la zone de la géomembrane à l'origine des fuites. Les eaux recueillies par les différents tronçons du collecteur sont ensuite évacuées vers l'aval par autant de tuyaux aveugles, afin de pouvoir mesurer séparément les venues d'eau des différentes zones de la géomembrane. Le dispositif drainant joue ainsi un rôle fondamental pour l'auscultation de l'ouvrage et en particulier pour l'auscultation des remblais.

Il faut néanmoins souligner quelques limites : en cuvette et dans le cas d'un sous-sol perméable, l'absence de débit drainé ne garantit pas nécessairement l'inexistence de fuites à travers la géomembrane du fait d'infiltrations possibles ; en déblai, le débit drainé peut être augmenté par des arrivées d'eau naturelle. Dans ces cas, seule une double étanchéité permet de garantir la connaissance précise du débit de fuite. Un zonage du dispositif drainant est conseillé afin d'aider à la localisation de fuites éventuelles.

Le drainage des gaz est nécessaire en cas de risques de remontées de nappe phréatique, de présence de matériaux organiques ou de formation de vapeur d'eau liée à l'humidité sous la géomembrane. Les drains de gaz doivent être équipés de sorties placées aux points hauts et munies d'évents protégés des entrées d'animaux et de la pénétration d'eau.

Structure d'étanchéité

La structure d'étanchéité principale des DEG est assurée par une géomembrane. Dans les DEG des retenues de moyenne et de haute altitude, les géomembranes polymériques, également appelées géomembranes de synthèse, sont les plus utilisées. Les géomembranes bitumineuses sont peu utilisées dès lors que l'ouvrage atteint une altitude qui implique un coût prohibitif du transport des matériaux sur le site de l'ouvrage, du fait de la masse surfacique significativement plus élevée que celle des autres types de géomembranes.

On distingue deux grandes familles de géomembranes polymériques utilisées :

- les géomembranes en polymère thermoplastique plastomère : polychlorure de vinyle plastifié (PVC-P), polyéthylène linéaire basse densité (PELBD), polyéthylène haute densité (PEHD), polypropylène flexible (PP-F) ;
- les géomembranes en polymère élastomère : élastomère éthylène propylène diène monomère (EPDM).

Dans la norme NF EN ISO 10318-1, qui définit tous les termes liés aux géosynthétiques, les géomembranes ont la seule fonction de barrière, tout comme les géosynthétiques bentonitiques. Compte tenu des contraintes spécifiques de site des retenues d'eau de moyenne et de haute altitude, notamment en matière de variations thermiques, il n'est absolument pas recommandé d'utiliser un géosynthétique bentonitique pour assurer seul la fonction barrière du système d'étanchéité, même s'il est recouvert par une couche de matériau granulaire. Ce type de produit est significativement influencé par les cycles de gel-dégel et par les cycles d'humidification-dessiccation et ne pourrait pas assurer de façon pérenne la fonction barrière dans les ouvrages traités dans ce guide.

Le choix de la nature de la géomembrane utilisée doit être compatible avec les caractéristiques du projet et les différents éléments constituant le DEG. De plus, la résistance aux dommages mécaniques doit être un critère de sélection important dans le choix de la géomembrane. Il est difficile de trouver dans la bibliographie des comparatifs de différents types de géomembranes. Notons qu'il peut être trouvé dans le guide CIGB (2010) un tableau comparatif évaluant différents types de géomembranes sur la base d'une analyse multicritère (quatorze critères : imperméabilité, comportement en traction, résistance à la déchirure, résistance au poinçonnement, flexibilité, poids spécifique, facilité de soudage, stabilité dimensionnelle, constructibilité d'ensemble, applications intérieures, durée de vie, disponibilité, réparabilité, coût). Cette démarche d'analyse multicritère devrait être réalisée à chaque conception de DEG et adaptée à l'ensemble des spécificités de sites.

Après le choix de la nature de la géomembrane, son épaisseur est le deuxième élément à déterminer. La norme NF EN ISO 10318-1 ne définit pas d'épaisseur minimale pour une géomembrane. La norme française NF P 84-500, qui définit les termes relatifs aux géomembranes, précise qu'une géomembrane a une épaisseur minimale de 1,00 mm sur toute la surface du lé. Cette norme française est donc plus restrictive que la norme européenne concernant l'épaisseur de la géomembrane.

Bien qu'il n'existe à l'heure actuelle aucune méthode ou moyen de dimensionnement unanimement reconnu permettant de dimensionner une épaisseur pour un ouvrage donné vis-à-vis des caractéristiques mécaniques et de la durabilité physique et chimique, il n'en demeure pas moins que l'épaisseur est un élément essentiel qui conditionne, pour une famille donnée, les caractéristiques physico-chimiques, mécaniques et de durabilité d'une géomembrane. Notamment, la résistance aux UV, à l'oxydation et à la perte de plastifiants et donc, de manière générale, la durabilité augmentent avec l'épaisseur. Aussi, il convient de bien considérer au niveau d'un projet la faible incidence financière du choix d'une épaisseur,

sachant que la géomembrane n'est qu'un élément du coût global et que cette augmentation d'épaisseur apporte une amélioration importante des caractéristiques physico-chimiques, mécaniques et de durabilité.

D'un point de vue conceptuel lié à la durabilité, la géomembrane doit être mise en œuvre de telle sorte qu'elle conserve son épaisseur initiale dans l'ensemble de l'ouvrage, c'est-à-dire qu'il ne doit pas y avoir de zones dans lesquelles la géomembrane serait en tension ou soumises à des efforts locaux de compression qui viendraient alors réduire son épaisseur (sa durabilité en serait alors affectée). Autrement dit, la géomembrane doit conserver son épaisseur initiale dans l'ensemble de l'ouvrage et pendant toute la durée de service de ce dernier.

Une deuxième différence entre les deux normes NF EN ISO 10318-1 et NF P 84-500 concerne la performance d'une géomembrane en matière d'étanchéité. La norme NF EN ISO 10318-1 ne définit pas de seuil minimal d'étanchéité, alors que la norme française NF P 84-500, plus restrictive, définit que le flux d'eau traversant une géomembrane en partie courante (hors joint) dans les conditions de mesure de la norme européenne NF EN 14150 doit être inférieur à 10^{-5} $m^3/m^2/j$. En France, l'organisme de certification des géomembranes et des géotextiles, appelé ASQUAL, impose dans son référentiel technique que toute géomembrane certifiée ASQUAL doit présenter un flux strictement inférieur à 10^{-6} $m^3/m^2/j$, mesuré suivant la norme EN 14150, c'est-à-dire un seuil dix fois plus faible que celui spécifié dans la norme française NF P 84-500. L'utilisation d'une géomembrane certifiée ASQUAL permet donc une garantie sur le niveau d'étanchéité du produit.

Il n'existe pas encore de norme qui permette de dimensionner une géomembrane sur la base de ses caractéristiques physico-chimiques et mécaniques. Cependant, de récentes études ont démontré la pertinence d'évaluer les efforts et les déformations que subirait une géomembrane dans son ouvrage, et notamment sur pente. Ce type de calcul repose sur la base de valeurs d'essais sur géomembranes. Les essais de géomembranes destinés à évaluer leurs caractéristiques physiques, mécaniques et de résistance aux intempéries peuvent être répartis en quatre catégories :

- le contrôle de qualité : ces essais permettent aux fabricants de s'assurer de l'homogénéité du produit au cours de sa fabrication ;
- les essais d'identification : ces essais réalisés sur des éprouvettes de petites dimensions permettent principalement de reconnaître (identifier) le produit ;
- les essais de performance : ces essais réalisés sur des échantillons de grande taille sont représentatifs du comportement opérationnel et permettent au concepteur de dimensionner les produits au regard des spécificités de l'ouvrage à construire ;
- les essais de conformité : ces essais permettent à l'utilisateur final de vérifier que la géomembrane fournie répond aux spécifications contractuelles.

Selon la norme EN 13361 (relative aux géomembranes), les caractéristiques obligatoires à mesurer, notamment pour l'édition de la déclaration de performance du matériau, sont :

- l'épaisseur et la masse surfacique ;
- l'étanchéité aux liquides ;
- la résistance et la déformation à la traction unidirectionnelle (différentes normes sont considérées selon les différents types de géomembranes) ;
- la résistance au poinçonnement statique ;
- la dilatation thermique ;
- la durabilité (chaque nature de géomembrane va impliquer des essais de vieillissement différents, selon les mécanismes de vieillissement propres à chaque géomembrane).

Détection et localisation de fuites au travers des géomembranes

Pour les ouvrages jugés importants ou exposés à des risques élevés, il est fortement recommandé d'intégrer dès la phase de conception un dispositif électrique permanent ou un dispositif à fibre optique active sous la géomembrane. Ces dispositifs permettent un suivi en temps réel de l'étanchéité, facilitant la détection précoce des fuites potentielles et garantissant une maintenance proactive. Ce type d'installation représente un investissement dans la durabilité et la sécurité à long terme de l'ouvrage, particulièrement pertinent pour les projets complexes ou situés dans des environnements critiques. De plus, ils permettent de localiser plus facilement une fuite dans le cas d'une géomembrane entièrement recouverte par une couche granulaire, évitant ainsi un coût significatif pour le retrait complet de la couche de recouvrement pour localiser la fuite. Le guide de recommandations « Présentation de méthodes de détection et de localisation de défauts dans les dispositifs d'étanchéité par géomembranes » (CFG, 2003) fournit de nombreuses informations concernant ce point.

Structure de protection supérieure

Pour les retenues d'altitude et collinaires, il est recommandé de recouvrir la géomembrane par une protection granulaire. En effet, le DEG doit être conçu pour résister aux facteurs environnementaux susceptibles de compromettre sa pérennité. Cela inclut les conditions climatiques (humidité, pluie, rayonnement UV, chaleur), les propriétés chimiques et biologiques du sol (pH, oxygène, température, microorganismes, teneur en carbonates, etc.), mais aussi des actions diverses telles que les racines de la végétation, les animaux fouisseurs, la reptation de la glace, le vandalisme, etc. La mise en place d'une couche de recouvrement permet d'apporter une protection de la géomembrane, augmentant ainsi sa pérennité, tout en permettant la mise en place d'une végétation adaptée (voir section « Intégration environnementale des retenues », p. 82), mais apporte également un dimensionnement rigoureux de la stabilité de cette couche. Le tableau 6 (p. 70) donne une comparaison entre les géomembranes exposées et recouvertes. Dans le cas d'une géomembrane recouverte partiellement (partie haute de la retenue d'eau), l'ensemble du tableau doit être considéré.

Installation et inspection du DEG

Domaine des inspections et recommandations générales

Les contrôles appliqués au DEG concernent à la fois les composants du DEG et leur mise en œuvre sur le chantier. Ils sont de natures diverses (documentaires, visuels, essais destructifs et non destructifs) et interviennent à toutes les étapes clés du projet, comme précisé dans le cahier des clauses techniques particulières (CCTP). L'efficacité de ces contrôles dépend fortement d'une organisation rigoureuse du chantier. Celle-ci inclut notamment la vérification, à l'aide des plans d'assurance qualité (PAQ), de la présence de personnel qualifié tel que des soudeurs certifiés.

Contrôle de la structure d'étanchéité

La mise en œuvre du système d'étanchéité fait l'objet de trois niveaux de contrôle distincts et complémentaires. Un contrôle interne est effectué par l'entreprise chargée de la pose, qui vérifie notamment les soudures, les assemblages et les matériaux utilisés. Un contrôle externe, mandaté par l'entreprise, consiste en des sondages réalisés par une entité indépendante afin de valider certains points sensibles de l'installation. Enfin, un contrôle extérieur est assuré par le maître d'œuvre ou par un prestataire désigné par le maître d'ouvrage. Ce dernier inclut une revue documentaire, des inspections visuelles et des essais spécifiques.

	DEG avec géomembrane exposée	DEG avec couche de recouvrement
Conditions climatiques	Choix rigoureux de la géomembrane selon la composition (résistance aux UV et minimisation de la dilatation thermique indispensables) et l'épaisseur (résistance et durabilité).	Tenir compte des conditions climatiques principalement pour la mise en œuvre. Les effets thermiques peuvent générer des efforts et des déformations dans la géomembrane et doivent donc être anticipés (Tahir, 2026).
Stabilité	Dispositifs de lestage pérenne à dimensionner en zone ventée.	Stabilité de la couche de recouvrement à dimensionner selon la norme NF G 38-067.
Végétation	Absence totale de végétation.	La végétalisation est possible (voir section « Intégration environnementale des retenues », p. 82).
Actions de la glace	Système de bullage performant indispensable pour éviter la formation de glace.	Système de bullage recommandé pour éviter une surcharge déstabilisatrice sur la couche de recouvrement.
Autres sollicitations (animaux fouisseurs, vandalisme)	Géomembrane exposée à ces sollicitations. Prévoir des dispositifs de grimpement et de remontée pour animaux.	La couche de recouvrement garantit une protection.
Localisation de fuites et réparation	Facilité dans ce cas.	Difficile : prévoir un dispositif de détection et localisation de fuites sous la géomembrane.
Autres avantages et inconvénients	Coût et durée de chantier moindres. Moindre risque de perforation de la géomembrane lors de la mise en œuvre. Ancrages moindres.	Coût et durée de chantier élevés. Mise en œuvre délicate de la couche de recouvrement. Nécessité d'ancrages dimensionnés selon la norme NF G 38-067.

***Tableau 6**. Comparaison des géomembranes exposées aux géomembranes recouvertes*

L'ensemble de ces contrôles vise à garantir la qualité, la conformité réglementaire et la durabilité de l'étanchéité, assurant ainsi la pérennité de l'ouvrage dans le temps.

Les différents contrôles pouvant être menés sont multiples :

- contrôles des zones de stockage et de manutention des produits afin de s'assurer que la géomembrane n'est pas endommagée avant sa mise en œuvre ;
- contrôles de réception des matériaux et matériels sur le chantier ;
- planches d'essais et épreuves de convenance ;
- contrôles associés à la mise en œuvre et à la réception de la structure support qui doit être nette et exempte de tout élément agressif ;

- contrôles du plan de calepinage et du plan de phasage des travaux ;
- contrôle de la mise en œuvre de l'étanchéité qui peut être de nature destructive, afin de caractériser la résistance mécanique et le mode de rupture d'un assemblage (traction pelage, traction cisaillement), ou de nature non destructive, tel que des contrôles visuels ou des contrôles par mise en eau ;
- contrôles associés à la mise en œuvre de la structure de protection : l'intégrité de la géomembrane doit être contrôlée avant la mise en place de la couche de recouvrement ;
- contrôle du dossier d'ouvrage exécuté.

Pour assurer le maintien en bon état de la géomembrane, il est important d'apporter un contrôle des paramètres suivants tout au long de sa vie, depuis sa fabrication jusqu'à sa mise en place sur site, en passant par son acheminement :

- stockage en usine ;
- transport depuis l'usine jusqu'au site de construction ;
- conditions de stockage sur le site ;
- état de la couche support sur le site ;
- mise en place provisoire ;
- traitement sur site pendant le soudage ;
- exposition sur site après soudage ;
- apport d'un matériau de protection ou de terre de remblai sur la géomembrane achevée le cas échéant.

Ces différents contrôles tout au long de la mise en œuvre du DEG et de la durée de vie de la retenue doivent permettre d'assurer un bon fonctionnement de l'ouvrage et d'éviter tout problème qui pourrait être lié à l'endommagement de la géomembrane ou du DEG.

Conception des ouvrages associés

L'évacuateur de crues

Typologie des évacuateurs de crues des retenues collinaires et d'altitude

L'évacuateur de crues permet d'évacuer en sécurité les eaux excédentaires arrivant dans la retenue. Ces apports proviennent principalement de la pluie qui tombe directement sur la retenue, des ruissellements du bassin-versant vers la retenue et, le cas échéant, des crues des cours d'eau pouvant alimenter la retenue et des débits excédentaires de pompage ou de dérivation.

Aucune retenue collinaire ou d'altitude ne doit être construite sans évacuateur de crues. Cela vaut également pour les retenues qui sont placées en dehors des talwegs ou des axes d'écoulements directs, ou isolées du bassin-versant naturel par un remblai de ceinture, de sorte que leur bassin-versant se limite au seul impluvium de la retenue.

L'évacuateur de crues le plus courant et le plus sûr est « le seuil libre », dont le seuil déversant est calé à la cote de retenue normale. En cas de crue, il entre en service avec fonctionnement passif sans intervention humaine et il est moins sensible au risque d'embâcle. C'est ce type d'évacuateur de crues qui est recommandé pour les retenues collinaires ou d'altitude et qui est traité dans le présent guide.

L'évacuateur de crues à seuil libre est composé :

- d'un seuil d'entonnement situé à la côte de débordement (côte normale d'exploitation) ;
- d'un coursier pour diriger l'eau à évacuer hors de l'implantation des remblais et déblais ;
- et d'un ouvrage de restitution pour assurer le passage avec le milieu naturel.

Implantation de l'évacuateur de crues

L'implantation de l'évacuateur de crues à seuil libre dépend essentiellement des conditions topographiques et géologiques du site. Il peut être situé en dehors ou sur le corps du remblai. Lorsque l'évacuateur est posé sur le remblai de la retenue, il doit supporter les tassements de la digue, il doit être fondé hors gel et doit respecter des exigences de sécurité élevées pour éviter tous débordements ou désordres directs sur le remblai, et notamment l'étanchéité globale doit être continue et sans faille.

Dans les cas spécifiques des retenues d'altitude, le risque de formation de congères impose des précautions spécifiques :

- le choix d'implantation adapté pour limiter ce risque ;
- le recours éventuel à une expertise nivométéorologique pour estimer les épaisseurs de neige ;
- la mise en place si nécessaire de protections (barrières à vent) ;
- la conception de l'évacuateur avec des parois latérales très évasées pour faciliter l'entretien mécanique.

Dimensionnement hydraulique de l'évacuateur de crues

L'évacuateur de crues doit être conçu pour garantir un écoulement torrentiel en aval du seuil, afin d'éviter son ennoiement qui réduirait sa capacité d'évacuation. Cela nécessite une pente de chenal suffisante. Si l'écoulement est dénoyé, on utilise la loi de seuil suivante :

$$Q = a\, L \sqrt{(2\, g)}\, h^{1,5}$$

avec a de l'ordre de 0,30 à 0,35 (coefficient de débit des seuils épais).

Dans les bassins boisés de montagne ou en fond de talweg, le risque d'obstruction par corps flottants doit être pris en compte. Pour cela, 10 à 15 mètres de large et 1,5 à 2 mètres de tirant d'air sont nécessaires.

En montagne, la glace peut réduire la performance hydraulique des évacuateurs de deux façons :

- la prise en glace diminue la profondeur d'eau à l'approche du seuil, réduisant le débit de la loi de seuil. Le coefficient de débit a d'une valeur de 0,30 est adopté pour prendre en considération cet effet ;
- la formation de neige dure (congères) sur l'évacuateur peut en bloquer partiellement l'écoulement (figure 7).

Pour garantir la sécurité en crue, il est recommandé d'adapter le dimensionnement en évaluant l'épaisseur de glace attendue et en la limitant (choix d'implantation, mesures de protection). Le dimensionnement peut aussi être pris en compte en intégrant l'épaisseur de glace dans les calculs d'évacuation des crues.



***Figure** 7. Évacuateur de crues obstrué par une congère (photo prise au mois de juin) (crédit : © INRAE)*

Le dimensionnement hydraulique comprend classiquement l'évaluation des vitesses et des profondeurs d'écoulement, ainsi que les conditions de restitution en aval avec le milieu naturel. Il est recommandé les justifications suivantes :

- pour la capacité d'évacuation : comparaison du débit de pointe de la crue de projet avec la loi de débitance de l'évacuateur ;
- pour l'écoulement dans le coursier : calcul de la ligne d'eau, par les formules d'hydraulique 1D ou par le logiciel de modélisation 1D ;
- pour l'ouvrage de restitution en aval : pas de calcul, sauf si risque d'érosion.

Le dimensionnement doit être réalisé pour les crues exceptionnelles et extrêmes, avec des marges de sécurité prévues dans les recommandations professionnelles (voir le guide CFBR 2013, « Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages ») visant à éviter tout débordement.

Si la rupture de l'évacuateur n'engendre pas de risque pour les remblais et déblais, un dimensionnement au moins pour la crue centennale peut être accepté pour le coursier et l'ouvrage de restitution, à condition que les désordres en crue exceptionnelle ne mettent pas en danger l'ouvrage. La géométrie du coursier doit rester aussi rectiligne que possible, afin d'éviter la formation d'ondes stationnaires et des hausses locales de niveau d'eau. Pour des débits de projet supérieurs à 10 m^3/s, une expertise hydraulique est nécessaire.

Conception structurelle de l'évacuateur de crues et principales recommandations constructives

La conception structurelle de l'évacuateur de crues vise à assurer la stabilité de l'ouvrage, notamment en crue, ainsi que sa durabilité en contexte de montagne ou de piémont. Pour cela, deux points essentiels :

- la stabilité du seuil face aux poussées hydrauliques à la cote normale ;
- la stabilité du coursier et de la restitution en crue, en tenant compte des vitesses et des sous-pressions éventuelles.

Le seuil, généralement en béton armé, doit garantir une cote de déversement précise et stable. Son dimensionnement prend en compte les poussées hydrostatiques et de glace, les sous-pressions sous l'ouvrage et les risques d'affouillement en aval. Il est nécessaire de maintenir la fondation hors gel et de traiter soigneusement l'étanchéité au droit du seuil.

Pour le coursier et la restitution, plusieurs types d'ouvrages sont possibles selon le contexte : en béton armé (avec éléments suffisamment lourds ou ancrés, avec des joints d'étanchéité et un drainage sous radier), en enrochements bétonnés, en enrochements libres ou à même le rocher naturel. Les évacuateurs de crues peuvent avoir un fort impact paysager, notamment pour les évacuateurs construits en béton, et le concepteur devra prendre en compte cet impact dans le choix des matériaux constituant le coursier et la restitution.

Les différentes solutions de conception des coursiers et des restitutions présentent des domaines d'emplois spécifiques. Le béton armé est adapté à toutes les hauteurs de barrage et à tous les débits, sous réserve de précautions particulières lorsque les vitesses d'écoulement dépassent 15 m/s. Les enrochements percolés de béton conviennent bien pour des hauteurs de chute inférieures à 10 m et pour des vitesses inférieures à 10 m/s. Les gabions autorisent des débits de 1 à 2 m^3/s/ml, ou de 0,5 à 1,5 m^3/s/ml pour les matelas Reno. Les enrochements libres peuvent être employés pour les petites retenues et uniquement pour les coursiers implantés hors du remblai et pour l'ouvrage de restitution. Enfin, le rocher naturel peut être retenu pour les coursiers hors du remblai et lorsque la qualité mécanique du rocher est bonne.

Exemple d'évacuateurs sur remblai rustique à seuil libre

Les évacuateurs de crues peuvent avoir un fort impact sur l'intégration paysagère et environnementale de la retenue, notamment pour les évacuateurs construits en béton. Aussi, le concepteur visera à minimiser cet impact par une conception adéquate. L'exemple type suivant est bien adapté et peut servir de guide pour la conception.

Exemple : évacuateur de crues rustiques (gabions, enrochements bétonnés) (figure 8)

Par souci d'intégration environnementale de la retenue, un évacuateur rustique nécessitant moins de béton doit être étudié. Il est conçu avec un seuil plat en béton armé posé sur des enrochements liaisonnés, un coursier en enrochements liaisonnés, une étanchéité totale présente sous le seuil et le coursier, ainsi qu'un dispositif de drainage. Le concepteur vérifiera les vitesses d'écoulement dans les ouvrages en lien avec les recommandations données au-dessus. Si la conception d'un évacuateur en béton s'impose, un placage en pierres locales peut constituer une alternative pour permettre l'intégration des ouvrages dans leur environnement. Si les conditions de site le permettent, un coursier latéral sur rocher naturel doit être privilégié pour les coursiers hors du remblai et lorsque la qualité mécanique du rocher le permet.

Ouvrages de vidange et de prise d'eau, conduites sous remblai

Fonctionnalités

La vidange permet d'abaisser rapidement le niveau d'eau de la retenue, ce qui en fait un élément essentiel à la sécurité du barrage. Elle doit être capable de fonctionner en toute saison, de réduire de moitié la charge en moins de 8 jours, de vidanger totalement en moins de 21 jours (sans apport d'eau). Pour les petites retenues collinaires et d'altitude, ces exigences sont généralement faciles à satisfaire.

Une disponibilité permanente de la vidange doit être garantie soit par un accès direct à la vanne, soit par une commande à distance. Pour assurer les inspections des conduites, un diamètre minimal est nécessaire. Ceci permet également d'éviter les risques d'obstruction. Le fonctionnement gravitaire est plus fiable et reste privilégié. En cas de pompage, un système de secours doit être prévu.

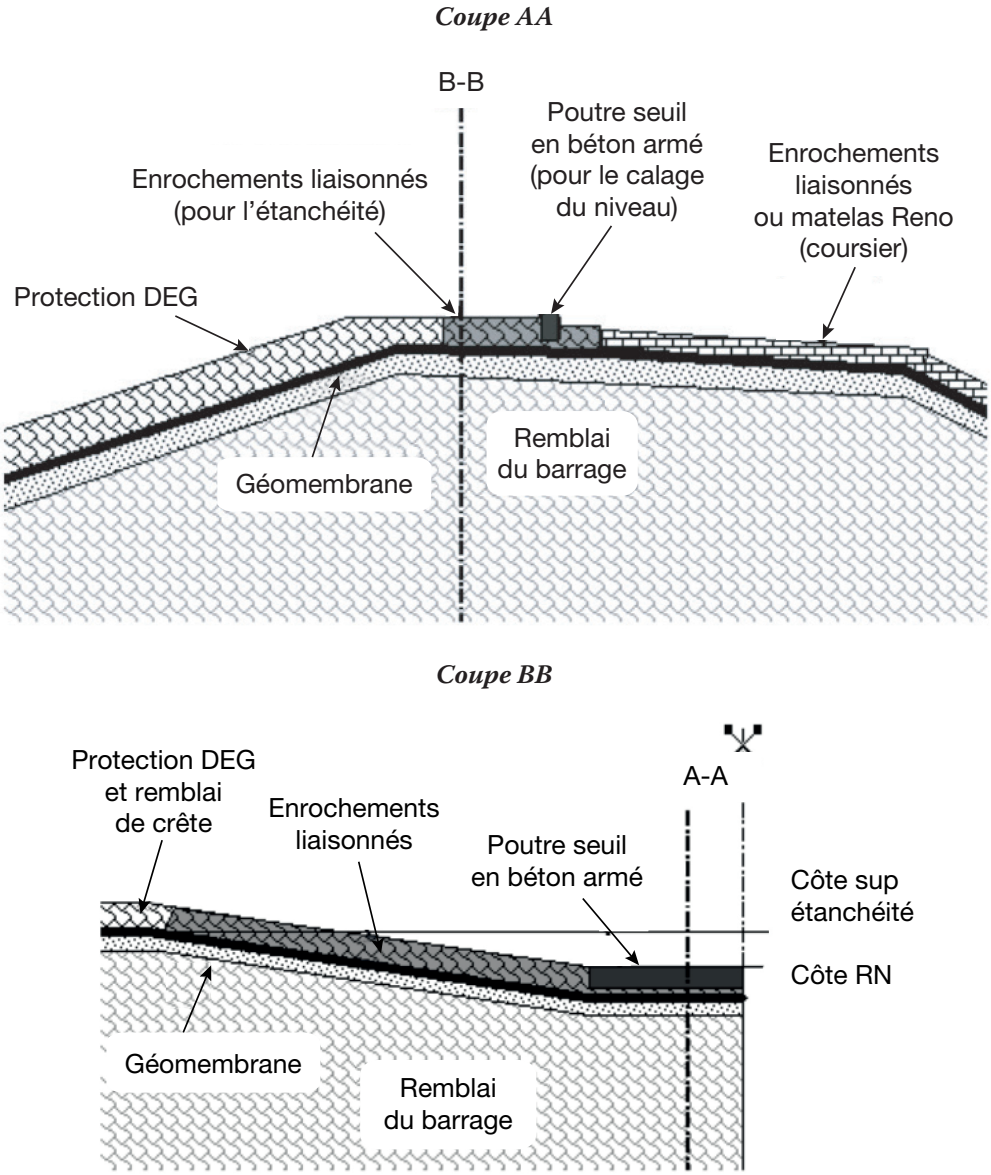


***Figure 8**. Coupes types d'évacuateurs de crues rustiques*

Le dimensionnement des conduites de prise, de transfert et d'amenée d'eau dépend de chaque aménagement. Les conduites à double usage (vidange et alimentation) doivent être limitées aux petites retenues sans enjeux majeurs.

Conception des vannages

Un élément essentiel de la conception du dispositif de vidange concerne les équipements de vannage. Plusieurs options existent, classées du système le plus simple au plus sophistiqué, en fonction des risques associés au barrage et de son importance (CFGB, 2002).

• La solution la plus rudimentaire consiste à n'installer qu'une vanne en aval sans dispositif de coupure à l'amont. L'eau est alors captée par un entonnement en amont muni d'une grille ou d'une crépine, généralement logée dans une chambre en béton. Cette solution est réservée aux petites retenues. Elle implique que la conduite reste constamment en charge, ce qui impose des contrôles réguliers de son étanchéité.

• Une option un peu plus évoluée consiste à ajouter un batardeau manœuvrable à l'amont, pouvant être activé ponctuellement par des plongeurs, combiné à une vanne de service

située en aval. Cette configuration repose sur un entonnement équipé de rainures à batardeau. Là encore, la conduite fonctionne en charge permanente et nécessite des vérifications fréquentes.

• Un niveau de sécurité supérieur est atteint avec l'installation d'une vanne de garde en amont, en complément d'une vanne de service en aval. La vanne en amont peut être abritée dans une chambre noyée, accessible *via* une passerelle, ou commandée à distance, généralement par un système hydraulique depuis une chambre technique. Ce dispositif est adapté aux retenues plus importantes. Il permet de couper les débits en cas d'incident sur la conduite ou sur la vanne en aval.

La conception des vannes de vidange dépend des conditions d'exploitation (spécifications d'étanchéité et risques d'obstruction, éventuels effets de la glace en altitude). Il est recommandé d'utiliser des vannes à ouverture totale pour réduire le risque de colmatage. Pour limiter les effets de la glace, il est courant d'installer un système de bullage.

La chambre des vannes doit être conçue pour permettre leur manœuvre, même en hiver. Elle doit être le mieux intégrée possible dans son environnement. En cas de commande à distance, un système de secours doit être prévu pour garantir le fonctionnement en cas de panne.

Conception des conduites sous remblai

Le choix des conduites dépend de l'importance de la retenue et de son volume (CFGB, 2002). Il est recommandé d'utiliser une conduite en acier ou en fonte verrouillée d'un diamètre minimal de 300 mm. Pour les petites retenues, une conduite d'un diamètre de 200 mm au minimum peut être envisagée. L'utilisation de conduites en béton préfabriqué, béton armé coulé en place ou en fonte non verrouillée est à proscrire. Les conduites PVC ne sont pas recommandées.

La conception des conduites sous remblai doit prévenir le risque d'érosion interne à l'interface conduite-remblai, en assurant un enrobage soigné de la conduite, et éventuellement un drainage en aval efficace pour intercepter d'éventuelles fuites. La méthode recommandée pour limiter les risques d'érosion interne au contact de la conduite est de poser la conduite en tranchée et de remplir cette tranchée par du béton coulé pleine fouille. Ces règles s'appliquent à tous les types de conduites (vidange, prise d'eau, drainage).

Lorsque ces conduites fonctionnent sous pression, elles doivent être dimensionnées pour les transitoires hydrauliques (comme les coups de bélier) et protégées par des dispositifs adaptés (ventouses, butées).

Le raccordement des conduites au DEG est un point sensible. Il nécessite un calepinage précis, des prescriptions techniques détaillées et des dispositions constructives limitant les tassements différentiels, afin de préserver l'intégrité de la géomembrane. Un exemple type de conception est donné dans la figure 9 ci-après.

Conception des ouvrages d'entonnement en amont et restitution en aval

Entonnement en amont

L'entonnement doit être conçu de façon à éviter tout risque d'obstruction complète. Les dimensions des grilles (espacements entre barreaux) doivent être adaptées au diamètre du tuyau ou des vannes. Une conception type de l'entonnement est proposée dans la figure 10.

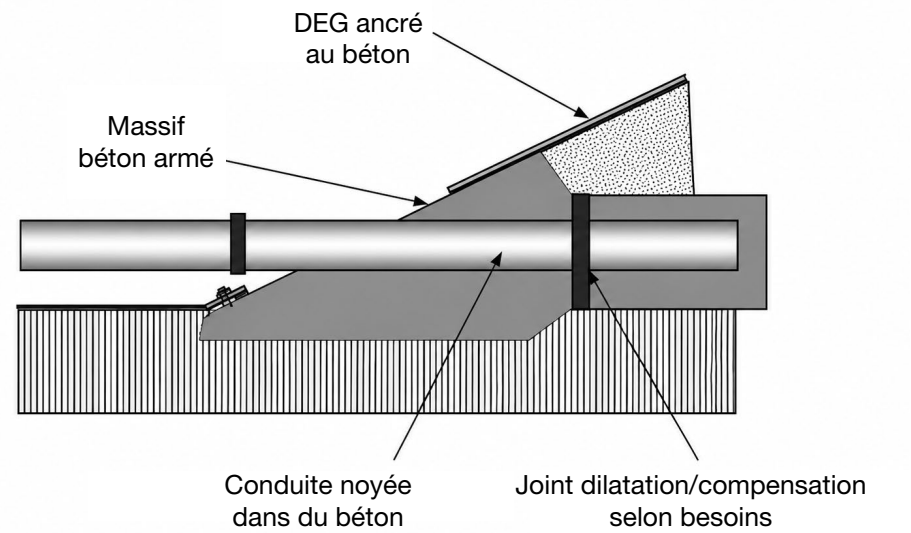


***Figure 9**. Raccordement entre conduite et DEG (Peyras et Mériaux, 2009)*

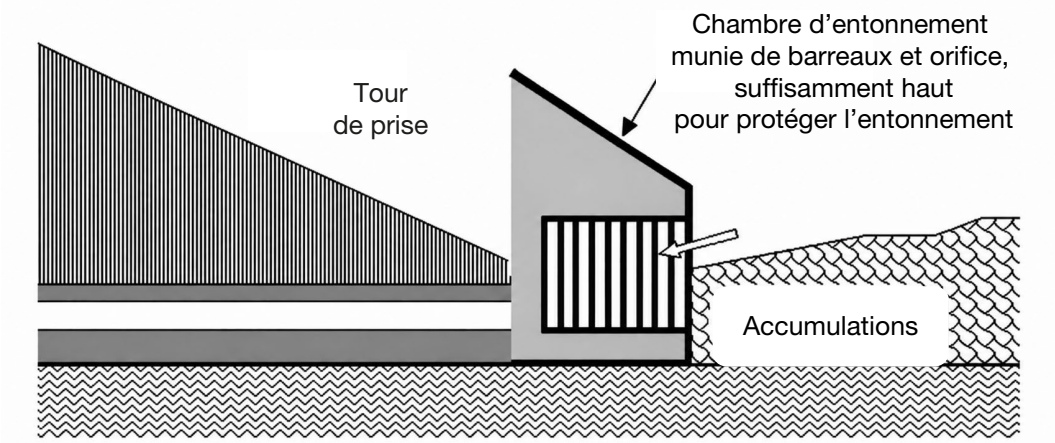


***Figure 10**. Ouvrage d'entonnement*

Restitution en aval

L'évacuation de l'eau en aval doit être protégée pour prévenir l'érosion, qui pourrait compromettre la stabilité du pied du barrage. Un ouvrage de dissipation d'énergie est généralement nécessaire à cet effet.

Protection contre les chutes de pierres, les glissements de terrain et les avalanches

En préliminaire important, il est indiqué qu'on ne traite ici que les instabilités de faibles ampleurs ou volumes : si le site envisagé est menacé par des instabilités importantes, il convient alors de changer de site pour le projet.

La stabilité des versants bordant le réservoir est primordiale pour garantir la sécurité sur le long terme du barrage et de ses ouvrages. Les glissements de terrain et les avalanches peuvent endommager le barrage, directement ou indirectement (par exemple, un volume de terre ou de roche atteignant le réservoir, provoquant des vagues qui frappent le barrage). L'analyse de la stabilité de tous les versants concernés par l'ouvrage est donc une étape essentielle de la conception du barrage. Si cette stabilité ne garantit pas un niveau de sécurité

suffisant, il convient d'identifier et de concevoir des dispositions pour réduire les risques liés à l'instabilité, dans la mesure où ceux-ci sont maîtrisables avec des niveaux de fiabilité propres aux standards attendus pour la sécurité des barrages (en France, l'arrêté du 6 août 2018 fixe les prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages et les niveaux de probabilités cibles attendus).

Quel que soit le phénomène naturel, les ouvrages de protection contre les glissements de terrain, les avalanches et les chutes de pierres doivent faire l'objet d'un programme systématique d'inspection, de surveillance et d'entretien, intégré au plan de surveillance du barrage. Les activités de surveillance visent à détecter toute détérioration des ouvrages de protection, toute réduction de leur capacité d'interception due à l'accumulation de matériaux, ainsi que l'apparition éventuelle de nouveaux phénomènes d'instabilité des talus non pris en compte dans l'évaluation des risques initiale. L'intégration de systèmes de surveillance instrumentale en temps réel, tels que des capteurs sismiques pour la détection des impacts, des géophones pour la détection des coulées de débris et des radars pour la surveillance du manteau neigeux et des parois rocheuses instables, représente un complément important aux inspections visuelles, notamment pour les structures situées dans des zones difficiles d'accès.

Protection contre les glissements de terrain

En préliminaire important, on rappelle que l'on traite ici que les instabilités de faibles ampleurs ou volumes : si le site envisagé est menacé par des instabilités importantes, il convient alors de changer de site pour le projet.

Selon le type d'instabilité attendu et le matériau concerné (terre ou roche) (Varnes, 1978 ; Cruden et Varnes, 1996), les analyses de stabilité des pentes doivent être réalisées à l'aide de méthodes appropriées et reconnues, largement décrites dans la littérature. La complexité de la méthode d'analyse dépend de celle du phénomène étudié. Il est recommandé d'adopter une approche analytique par étapes, en utilisant des méthodes de complexité croissante tout au long de la conception de l'ouvrage.

Si le niveau de stabilité des pentes est insuffisant pour garantir la sécurité du réservoir, il peut être nécessaire d'identifier des actions visant à réduire le risque potentiel. Les principales interventions destinées à atténuer le risque induit par les instabilités sur le réservoir sont décrites ci-après. Une distinction est faite entre les interventions de prévention et de protection (AGI, 2022). La prévention vise à réduire la probabilité de déclenchement d'un glissement de terrain d'une ampleur donnée, tandis que la protection réduit la probabilité que ce glissement percute les éléments à risque (réservoir, barrage ou autres éléments structurels de l'ouvrage) en interceptant la masse en mouvement, en déviant sa trajectoire ou en réduisant l'énergie mise en jeu.

Les interventions de protection peuvent comprendre :

• la modification de la géométrie des zones instables : purge de volumes ou de portions de sols ou de roches potentiellement instables (reprofilage, écaillage, etc.) ; lestage au pied du talus ; ouvrages de soutènement utilisés pour modifier la géométrie des zones instables ;

• le transfert des contraintes des zones potentiellement instables vers les zones stables : éléments structurels verticaux ou subverticaux (micropieux, pieux ou parois moulées, reliés en partie supérieure) qui traversent la surface de glissement et s'ancrent dans la partie stable du versant ; clouage systématique des sols, généralement combiné à des treillis, des géogrilles ou des panneaux de béton ; boulonnage ou clouage de blocs rocheux à l'aide de barres d'acier précontraintes (ancrages actifs) ou non précontraintes (ancrages passifs) ;

• la modification des caractéristiques mécaniques de la masse instable : comprend toutes les techniques de traitement du sol par compactage, remplacement, mélange avec du ciment ou de la chaux, ou injections de matériaux cimentaires ou chimiques à basse et haute pression, afin d'améliorer sa résistance et sa déformabilité ;

• la modification du régime hydraulique interne : tranchées de drainage placées en amont ou à l'intérieur du volume du glissement de terrain, revêtues d'un géotextile filtrant et remplies de matériaux grossiers, avec un collecteur de fond ; drains subhorizontaux de petit diamètre, constitués de tubes crépinés et revêtus d'un géotextile filtrant, disposés parallèlement ou radialement et installés sur un ou plusieurs niveaux. Leur longueur doit être suffisante pour dépasser la surface de glissement potentielle ou, dans le cas de massifs rocheux, pour intercepter le plus grand nombre possible de discontinuités ;

• la modification du régime hydraulique de surface pour empêcher l'infiltration des eaux de ruissellement en profondeur : mise en place de déversoirs, canaux, fossés et canalisations en crête du glissement de terrain pour la collecte des eaux pluviales ; colmatage des fractures de traction critiques dans les massifs rocheux ; pose de membranes d'étanchéité ; couverture végétale sélective ; reprofilage de la pente pour éviter les contre-pentes sujettes à l'engorgement ;

• la lutte contre l'érosion de surface.

Les mesures de protection comprennent :

• des déversoirs et barrières : ouvrages en béton, gabions ou bois-terre pour retenir les sédiments et limiter l'écoulement des matières solides en aval ;

• des remblais de retenue et de dérivation : digues compactées, éventuellement revêtues de blocs ou de gabions, pour intercepter les écoulements chargés ou dévier leur trajectoire des infrastructures à protéger ;

• des murs de soutènement : ouvrages rigides en béton (gravitaires, en porte-à-faux, à contreforts) ou en terre armée (géogrille) destinés à contenir les glissements de terrain ou à stabiliser le pied d'un talus ;

• des vallées et bassins de rétention : zones de dépôt contrôlé en amont de l'infrastructure, dimensionnées pour contenir le volume mobilisable estimé.

Protection contre les avalanches

En préliminaire important, les protections indiquées dans cette section visent la protection contre les avalanches de faible intensité : si le site envisagé est menacé par des avalanches importantes, il convient alors de changer de site pour le projet.

Les avalanches de neige représentent l'un des risques naturels les plus importants pour les barrages situés en zone alpine. Les mécanismes de déclenchement, la dynamique et les charges exercées sur les ouvrages varient considérablement selon le type d'avalanche.

Les ouvrages de protection permanente des versants sont conçus pour prévenir le déclenchement des avalanches d'intensité modérée, en agissant directement sur la zone d'accumulation et sur la zone de déclenchement. Cette catégorie comprend les barrières anti-avalanches, installées dans la zone de déclenchement pour empêcher l'écoulement de la neige et maintenir sa cohésion. Il s'agit de structures métalliques ou en bois, ancrées au sol par une série de poteaux, d'une hauteur de 2 à 5 m et dont l'espacement est calibré en fonction de l'épaisseur de neige prévue. Elles sont efficaces contre les avalanches de plaque, mais n'offrent pas une protection complète lors d'années exceptionnellement neigeuses ou en cas de vents forts. D'autres interventions actives comprennent les filets à neige, les ancrages au sol renforcés

et le renforcement des talus dans les zones de déclenchement. Dans certains cas, lorsque la morphologie le permet, il est possible de modifier artificiellement le profil topographique de la zone de décollement en la remodelant avec un matériau inerte, afin de réduire l'angle de pente en dessous du seuil critique de décollement.

Les remblais anti-avalanches constituent une protection passive adaptée à la protection des retenues. Ce sont des remblais construits en matériau granulaire bien compacté et revêtus en amont de roches ou de blocs pour résister à l'abrasion due aux chutes de neige. En milieu alpin, où les avalanches se produisent sur plusieurs années, le dimensionnement du remblai anti-avalanche doit permettre de résister aux impacts successifs, sans nécessiter de réparations structurelles entre les événements. Il est donc nécessaire d'assurer un entretien annuel adéquat, comprenant notamment la vérification de l'état du revêtement et le nettoyage des débris déposés en amont.

Protection contre les chutes de pierres

En préliminaire important, les protections indiquées dans cette section visent la protection contre les chutes de pierre de faible intensité : si le site envisagé est menacé par des chutes de pierres intenses, il convient alors de changer de site pour le projet.

Les chutes de pierres constituent l'un des processus gravitationnels les plus fréquents en zones alpines et dans les vallées creusées par les torrents de montagne. Les parois rocheuses bordant le bassin-versant peuvent y libérer des blocs de pierre dont la taille varie de quelques décimètres cubes à plusieurs milliers de mètres cubes. Ce phénomène est dû à la dégradation mécanique progressive de la masse rocheuse sur la paroi (due aux cycles de gel-dégel, à l'altération chimique, aux variations de pression hydrostatique dans les fractures et aux séismes), jusqu'à ce que des conditions d'instabilité soient atteintes et que le bloc se détache. La trajectoire du bloc après son détachement est caractérisée par trois phases cinématiques principales : la chute libre initiale, le rebond sur la pente et le roulement ou le glissement dans la partie finale de sa trajectoire. Les grandeurs physiques les plus pertinentes pour la conception des ouvrages de protection contre les chutes de pierres sont la vitesse d'impact (généralement de 10 à 40 m/s pour les versants alpins) et l'énergie cinétique totale au point d'impact, qui dépend de la masse du bloc et de sa vitesse. Pour les roches de taille moyenne (1 à 10 m^3), les énergies mises en jeu varient de quelques centaines de kilojoules à plusieurs mégajoules.

Les remblais pour la protection contre les chutes de pierres sont des ouvrages en terre ou en matériaux granulaires positionnés en aval des zones de détachement et le long des trajectoires privilégiées des roches. Leur fonction est d'intercepter et d'absorber l'énergie cinétique des roches avant qu'elles n'atteignent l'ouvrage ou les infrastructures. Comparés aux filets de protection contre les chutes de pierres, les remblais présentent l'avantage de ne pas nécessiter d'entretien fréquent, de résister à des impacts répétés et de pouvoir être dimensionnés pour des énergies d'impact élevées.

Les clôtures de protection contre les chutes de pierres sont des barrières dynamiques préfabriquées, composées d'un câble d'acier à haute résistance ou d'un treillis métallique tendu entre des poteaux métalliques ancrés au talus. Des systèmes d'absorption d'énergie par déformation plastique (freins) sont intégrés aux câbles d'ancrage. Comparées aux remblais, ces clôtures sont plus compactes, plus faciles à installer dans des environnements morphologiquement complexes et offrent différents niveaux d'énergie. Cependant, ces systèmes nécessitent un entretien régulier et ne sont pas adaptés aux énergies d'impact supérieures à environ 5 000 à 8 000 kJ avec les solutions actuellement disponibles (jusqu'à 10 000 kJ pour les barrières les plus performantes).

La protection des barrages contre les chutes de pierres peut être obtenue également grâce à une solution mixte qui combine des barrières de protection en amont interceptant les blocs de faible énergie et des remblais de protection en aval retenant les blocs plus énergétiques, susceptibles de franchir ou de déborder la première ligne de défense. Cette configuration à deux niveaux assure la redondance du système de protection.

Dispositifs d'auscultation

Principes de conception du dispositif d'auscultation

L'auscultation constitue un élément essentiel de la surveillance d'un barrage et permet d'évaluer son comportement sur le long terme, sur les plans tant hydraulique (débits de percolation, pressions interstitielles) que mécanique (déformations, déplacements). Pour les retenues collinaires et d'altitude étanchées avec un DEG, la mesure la plus importante est celle du débit de drainage, qui renseigne sur l'état du dispositif d'étanchéité et sur l'efficacité du drainage, même lorsque le DEG est recouvert. La piézométrie reste un dispositif secondaire, mais peut être utile pour détecter d'éventuels défauts d'étanchéité, des dysfonctionnements du drainage ou de zones fragiles de la fondation. Les mesures topographiques (planimétrie, nivellement) sont généralement mises en œuvre lors des premières années de vie de la retenue.

Conception standard

Il n'existe pas de règle définissant le niveau d'équipement à adopter pour chaque barrage : cela dépend de son importance, mais également de sa conception. Le tableau 7 propose un équipement minimal, valable pour des sites sans particularité. En cas de contraintes spécifiques (géologie complexe, comportement anormal), des adaptations sont nécessaires.

Petites retenues non classées sans enjeux importants	Mesure du niveau de la retenue par échelle limnimétrique ou par sonde de pression. Collecte et mesure manuelle du débit total.
Petites et moyennes retenues avec enjeux	Même équipement que pour petites et moyennes retenues sans enjeux importants, avec éventuellement une télétransmission des données de hauteur de plan d'eau et des débits de drainage. Compartimentage des débits de drainage. Réseau de fibres optiques actives pour la détection des fuites de la géomembrane (voir section « Surveillance des fuites par fibre optique », ci-dessous). Mesures topographiques (planimétrie et nivellement) durant les cinq premières années d'exploitation. Quelques piézomètres ou capteurs de pression en fondation et dans le remblai.

Tableau 7. *Principes de conception standard du dispositif d'auscultation*

Surveillance des fuites par fibre optique

De façon générale, la présence d'une fuite est préjudiciable et peut nuire gravement à la stabilité de l'ouvrage. Il faut donc les repérer afin de les réparer. De nos jours, la détection d'une fuite au travers de la géomembrane peut être visuellement observée à l'exutoire du système de drainage, mais la localisation d'une fuite en vue d'une réparation est plus difficile et plus coûteuse. En effet, dans le cas d'une géomembrane exposée, il est nécessaire que la retenue soit complètement vidée pour qu'une inspection visuelle puisse être menée sur l'ensemble

de la surface de la retenue. Cette inspection visuelle reste cependant une méthode relativement peu efficace, notamment pour localiser des défauts de soudures. Si la géomembrane est recouverte, il faut retirer toute la couche de granulats pour accéder à la géomembrane et procéder à une inspection visuelle, ce qui est particulièrement coûteux et peut endommager la géomembrane.

Dans ce contexte, une action spécifique sur le développement d'une méthode simple et robuste de localisation de fuite a été menée dans le cadre du projet de recherche européen Interreg dénommé RESBA (« Résilience des barrages d'altitude »). Elle a permis de proposer l'utilisation d'une fibre optique active pour détecter de façon très précise la position des fuites. Cette méthode fonctionne aussi bien pour les géomembranes recouvertes que non recouvertes ; elle est aujourd'hui éprouvée et peut être utilisée de façon opérationnelle. Elle nécessite un dimensionnement du réseau de fibres lors de la conception et la réalisation du barrage par des entreprises spécialisées.

Continuité de l'auscultation en période hivernale

Certaines mesures d'auscultation doivent pouvoir être réalisées de manière continue, y compris en période hivernale. Cela implique la mise en place d'un système de télétransmission ou le maintien d'un accès permanent au site et aux instruments de mesure. En fonction de la taille de la retenue, les recommandations suivantes sont formulées (tableau 8) :

Petites retenues non classées	Aucune contrainte.
Petites et moyennes retenues sans enjeux importants	Auscultation : mesure du niveau de la retenue et du débit total de drainage.
Petites et moyennes retenues avec enjeux	Auscultation : mesures du niveau de la retenue, du débit total de drainage, et éventuellement d'auscultation jugées nécessaires au suivi du bon comportement du barrage. Accessibilité : maintien en permanence d'un accès au site et aux points de mesure.

***Tableau 8**. Principes de l'auscultation des barrages d'altitude selon leur classe géométrique*

Les données pouvant être télétransmises incluent les cotes de retenue mesurées par la sonde de pression, le système de drainage et la fibre optique. Par ailleurs, les conduites de drainage débouchant au pied en aval du barrage sont sensibles au gel, ce qui peut compromettre à la fois les mesures et le bon fonctionnement du drainage. Il est donc recommandé d'installer les exutoires dans des regards protégés du gel et correctement drainés.

Intégration environnementale des retenues

Les recommandations de cette section traitent de la question de la végétalisation et de l'aménagement des retenues d'altitude et de leurs berges pour permettre un développement de la biodiversité. Elles s'appliquent prioritairement aux retenues d'altitude qui se caractérisent généralement par un niveau haut de retenue pendant la saison estivale et un niveau bas ou fortement variable en période hivernale. Néanmoins, ces recommandations peuvent en grande partie s'appliquer aux retenues collinaires, dans le cadre de projet conduit avec une ingénierie qualifiée en écologie.

Principes généraux pour le choix du site

Dans un projet d'aménagement d'une nouvelle retenue et dans un objectif de protection de l'environnement, le choix du site est essentiel et les principes fondamentaux suivants doivent être impérativement pris en compte :

• le choix du site doit s'appuyer sur la séquence « éviter, réduire, compenser » (ERC). Introduite dans le droit français dès 1976, la démarche ERC a été précisée dans la loi pour la reconquête de la biodiversité de 2016, et vise l'objectif de zéro perte nette de biodiversité lors de la conception et de la mise en œuvre des projets d'aménagement du territoire. Cette démarche constitue l'un des piliers du plan national « Biodiversité. Tous vivants », porté par le ministère chargé de l'environnement ;

• il faut prioriser la construction de nouvelles retenues sur des sites déjà artificialisés et l'éviter absolument sur les sites abritant des habitats fragiles à forts enjeux, comme les zones humides ;

• il faut éviter la destruction de tout habitat naturel afin de conserver les écosystèmes déjà présents sur site.

Principes généraux pour une nouvelle retenue

Dans un contexte où les enjeux environnementaux deviennent centraux dans l'aménagement des territoires, la conception d'une retenue doit impérativement s'accompagner d'une réflexion approfondie sur la préservation de la biodiversité du site et sur une intégration paysagère adaptée. L'objectif est double : 1) limiter l'impact écologique de l'ouvrage et 2) permettre son insertion environnementale. Il s'agira de tendre autant que possible vers la réalisation d'un ouvrage dont la structure et le fonctionnement écologique sont les plus proches d'un lac d'altitude naturel.

La végétalisation des berges, la conception des talus et de la crête et la création de zones refuges écologiques participent activement à cette démarche. Une attention particulière est portée à la préservation de la faune autochtone, notamment les mammifères, les oiseaux, les invertébrés et les amphibiens, qui dépendent de la présence d'habitats humides et aquatiques pour leur survie, leur reproduction et leur alimentation. De plus, il est recommandé de ne pas procéder à l'alevinage des retenues d'altitude pour protéger la biodiversité de la prédation et de la compétition, sachant qu'il n'y a pas de poissons naturellement dans les lacs de haute altitude.

L'introduction d'une végétation adaptée favorise également le développement d'écosystèmes fonctionnels, tout en contribuant à la stabilisation des talus et à l'intégration visuelle de l'ouvrage si le paysage est déjà végétalisé. En effet, dans certains cas et notamment en altitude, la végétation peut ne pas être très présente sur le site, il est donc préférable de ne pas végétaliser pour permettre une meilleure intégration paysagère de l'ouvrage dans son milieu.

Les principes généraux de conception d'une nouvelle retenue ou de réhabilitation d'une retenue existante comprennent les prescriptions suivantes qui sont développées dans ce chapitre :

• les talus en aval, en amont et la crête sont végétalisés par une végétation herbacée ;

• des zones refuges écologiques sont aménagées sur une partie des talus en amont de la retenue, de préférence dans les zones en déblai ou à la jonction remblai-déblai. Ces zones refuges couvrent un pourcentage cible minimal de 30 % du périmètre de la retenue ;

• sur le reste du talus en amont, l'aménagement se fait selon les pratiques classiques de protection des parements en amont des barrages, prévoyant le plus souvent un enrochement

de couverture sur toute la hauteur pour les retenues d'altitude ou parfois uniquement dans la zone de marnage pour les retenues collinaires. On peut également mettre des plantes aquatiques ou semi-aquatiques herbacées pour améliorer l'intégration des enrochements et l'accueil de la biodiversité.

Ces principes sont illustrés dans la figure 11.

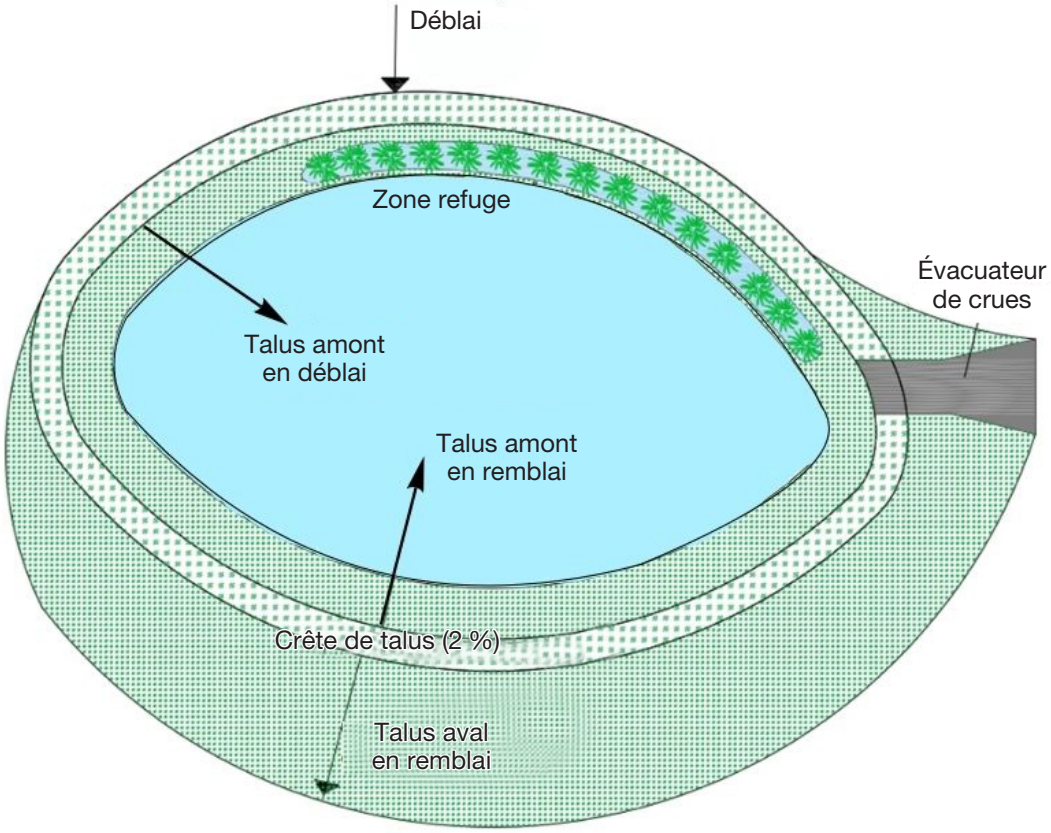


***Figure 11**. Plan général d'une retenue d'eau avec une zone refuge*

Conception des talus en aval, de la crête et des déblais

La stabilisation des talus en aval et du couronnement par la végétation constitue une mesure à la fois technique, paysagère et écologique. Il est recommandé de revêtir le talus en aval et la crête de la retenue d'une végétation herbacée, assurant à la fois une protection contre l'érosion superficielle et une intégration environnementale. Ce couvert végétal doit être composé d'espèces herbacées locales, adaptées aux conditions climatiques du site. La plantation d'arbustes ou d'arbres est proscrite sur les talus en amont et en aval, car leur système racinaire pourrait compromettre la stabilité des talus en dégradant le dispositif d'étanchéité par géomembrane en pénétrant profondément dans le remblai.

Sur les déblais surplombant la retenue ou à proximité, la végétalisation est également recommandée pour les mêmes raisons à la fois techniques, paysagères et écologiques. Cette végétation pourra inclure des ligneux ou des arbres ou arbustes, car elle n'est pas en contact direct avec les organes d'étanchéité ou de résistance.

Le tableau 9 permet de résumer les principales mesures à envisager lors de la végétalisation d'une retenue.

Zone de la retenue	Végétation recommandée ou pas
Déblai	Végétation herbacée terrestre. Espèces ligneuses autorisées.
Remblai en amont	Végétation herbacée terrestre en partie haute et aquatique dans la zone de fluctuation du niveau d'eau, y compris dans la zone de rip-rap avec enrochements. Espèces ligneuses interdites.
Remblai en aval et crête	Végétation herbacée terrestre. Espèces ligneuses interdites.

***Tableau 9**. Mesures de végétalisation de l'ouvrage*

Conception des talus en amont incluant des zones refuges écologiques

Objectifs écologiques

Le talus en amont intègre des zones refuges conçues comme des espaces aquatiques pérennes. Leur objectif principal est de maintenir un niveau d'eau constant sur environ 30 % du pourtour de la retenue, y compris en période de marnage, pour permettre un bon compromis entre la surface minimale bénéfique pour l'accueil de la biodiversité et l'accueil d'autres usages ou la gestion et l'entretien de la retenue. Cette zone refuge en eau permettra le développement de plantes hélophytes, voire hydrophytes, tout en offrant un point d'eau permanent ou quasi permanent pour la faune locale.

Les zones refuges ne sont pas nécessairement continues sur tout le périmètre de la retenue. En effet, des secteurs seront traités de façon traditionnelle, afin de permettre l'accessibilité aux véhicules pour les opérations de maintenance de la retenue et, notamment, pour les interventions sur l'évacuateur de crues. Aussi, il est recommandé de privilégier l'implantation des zones refuges écologiques dans les parties en déblai, généralement plus accessibles.

Caractéristiques techniques et description

La pente du talus en amont doit être comprise entre 1/3 et 1/2,5, avec une pente adoucie en zone refuge pour réduire le batillage et limiter l'érosion des fines. Pour le talus en amont n'accueillant pas de zones refuges, il est préférable pour la biodiversité, mais aussi pour la protection de la géomembrane, de les recouvrir complètement. En outre, il convient de préférer les géomembranes de couleur gris clair ou beige, les géomembranes noires étant très chaudes et plus nuisibles pour la faune. Pour les petites retenues collinaires non soumises à de fort vent et avec un faible batillage, l'enherbement du talus en amont est recommandé.

Les zones sur le talus en amont accueillant des refuges écologiques sont composées de matériaux autofiltrants (dont la granulométrie respecte les règles de filtre et empêche la migration de sa composante fine) de 30 à 40 cm d'épaisseur, allant des limons aux petits enrochements (0-125 mm), permettant à la fois la résistance à l'érosion et la rétention des fines, le développement des plantes et la protection du dispositif d'étanchéité par géomembrane. Par ailleurs, la présence de végétation permet d'éviter la dégradation de la couche de matériaux autofiltrants. Le remplissage des vides avec des matériaux fins constitue un substrat qui favorise la croissance racinaire et la fixation des matériaux.

Les enrochements et les matériaux autofiltrants devront être issus autant que possible du site, triés puis criblés sur place, afin de limiter l'impact du transport.

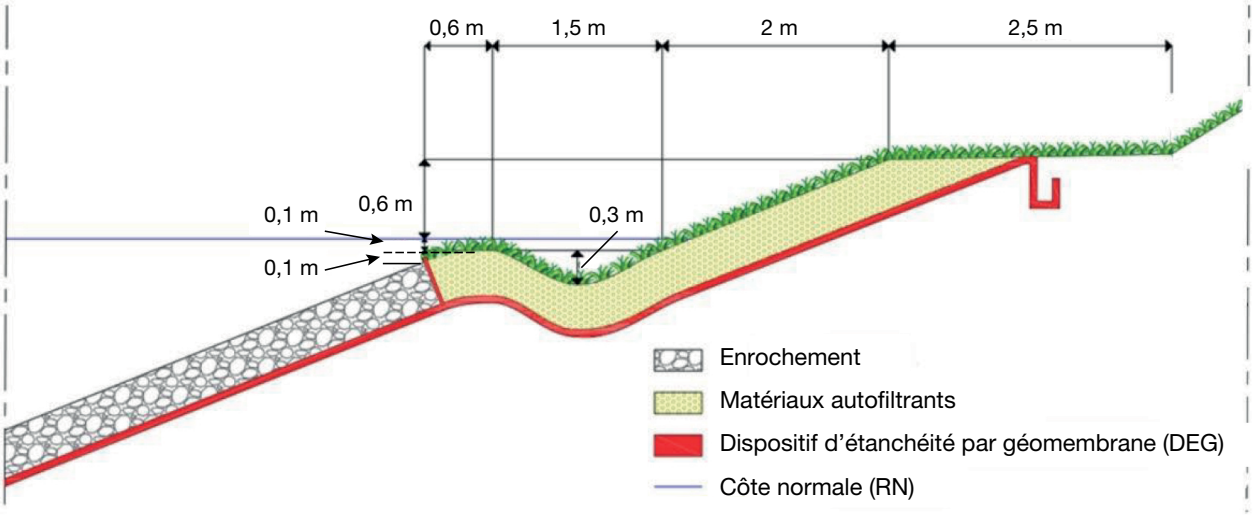


***Figure 12**. Coupe générale d'un talus avec une zone refuge*

Comme présenté sur la figure 12, la zone refuge écologique est située à une profondeur variable comprise entre 10 et 40 cm sous la cote normale de la retenue. Cette disposition permet un remplissage de la zone refuge écologique par la retenue lorsqu'il a atteint son niveau normal d'exploitation, tout en maintenant une profondeur d'eau adaptée au développement des plantes autour de 20 à 30 cm. Pendant la période qui précède le remplissage de la retenue jusqu'au niveau normal d'exploitation, la zone refuge sera remplie par la fonte de la neige située sur la berge, garantissant la présence d'eau le plus tôt possible.

À partir de 20 cm de profondeur sur le rampant du talus et jusqu'au fond de la cuvette de la retenue, le talus en amont est protégé de façon traditionnelle par un enrochement. Pour les retenues d'altitude, il est recommandé de prolonger l'enrochement jusqu'en fond de retenue. Pour les retenues collinaires, la couverture peut parfois être partielle et limitée sur la zone de marnage. L'épaisseur et la granulométrie de l'enrochement sont évaluées en fonction des conditions de site afin de protéger le dispositif d'étanchéité par géomembrane et de limiter les effets de batillage. Pour les petites retenues collinaires non soumises à de fort vent et avec un faible batillage, la mise en place d'un rip-rap en enrochements peut être évitée et l'enherbement du talus en amont est alors recommandé.

Le dispositif d'étanchéité par géomembrane est constitué d'une géogrille pour le maintien des couches superficielles, d'une géomembrane continue assurant l'étanchéité de la retenue et d'un géotextile antipoinçonnement jouant le rôle d'interface et de protection avec le remblai. Ce dispositif sera décrit plus en détail dans la suite de ce chapitre.

Drainage des zones refuges écologiques

Les dispositifs de drainage des zones refuges écologiques doivent être adaptés aux conditions locales topographiques et géométriques du projet :

• la mise en place d'un système de vidange de la zone refuge écologique n'est pas nécessaire dans le cas général. Celui-ci est à étudier au cas par cas, en fonction du dimensionnement de cette zone et de celui de la retenue dans son ensemble, et, le cas échéant, de la nécessité d'éviter l'accumulation d'eau stagnante et d'en permettre le renouvellement ;

• un drainage au pied des déblais par un fossé périmétral est également à examiner au cas par cas. Si les déblais sont végétalisés, ce fossé n'est pas recommandé, car les eaux pluviales pourront alors remplir les zones refuges d'eau claire. En revanche, s'il n'y a pas de possibilité de végétalisation des déblais du fait de l'altitude ou de la minéralité des matériaux, l'installation d'un fossé périphérique en pied de déblai est recommandée, car il permet d'éviter l'arrivée d'eau chargée dans les zones refuges et dans la retenue, et de limiter l'apport de matières organiques non désirées.

Ancrage de la géogrille et de la géomembrane

Dans le dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG), la géomembrane assure la fonction d'étanchéité du remblai et la géogrille assure la fonction de résistance et le maintien des couches supérieures, en reprenant les efforts de traction subis par le DEG.

La conception du DEG doit être adaptée à la présence des zones refuges écologiques. En particulier, l'implantation de l'ancrage de la géogrille doit être étudiée avec un grand soin afin d'éviter un « effet tambour » (mise en tension et soulèvement de la géomembrane) qui pourrait se produire au niveau du positionnement du DEG sur la zone refuge écologique.

Deux solutions sont envisageables pour contrer cet effet tambour, tout en assurant la continuité de l'étanchéité apportée par la géomembrane. Elles reposent sur l'augmentation de la charge exercée sur la géogrille afin de lester l'ensemble du DEG. Nous recommandons de distinguer deux configurations :

• zone refuge écologique étroite (< 1,5 m) : une zone de confinement servant de lestage (figure 13), réalisée avec des matériaux terreux et éventuellement quelques blocs rocheux, permet de stabiliser la géogrille tout en créant un substrat favorable au développement de la végétation et de la biodiversité. Ce confinement saturé en eau s'oppose au soulèvement de la géogrille et renforce la stabilité globale de la zone. Cette solution est d'autant plus pertinente que la profondeur de la retenue est modérée ;

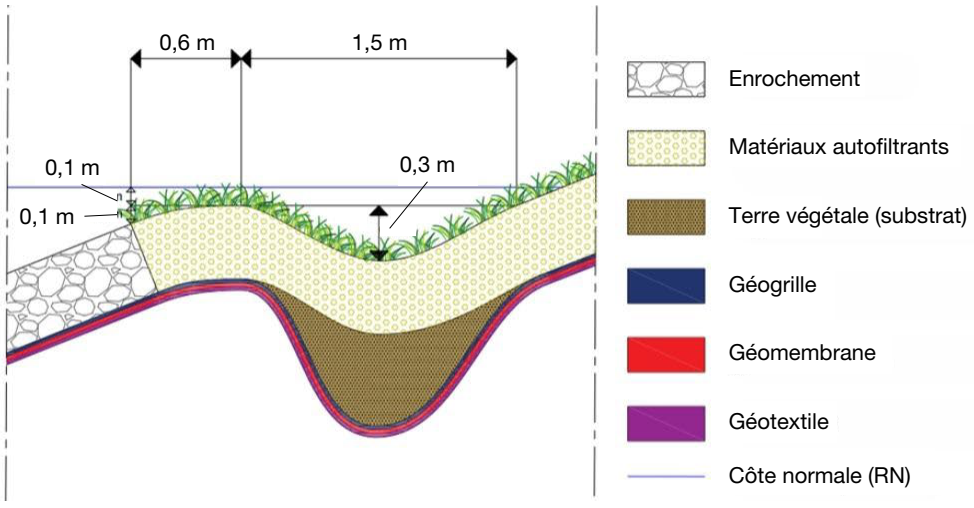


***Figure 13**. Coupe d'une zone refuge étroite avec confinement*

• zone refuge écologique large (> 1,5 m) : une bêche en béton est alors nécessaire pour fixer solidement la géogrille (figure 14). Celle-ci assure un ancrage mécanique fiable et garantit la continuité d'étanchéité avec la géomembrane.

Dans les deux solutions, le DEG est également ancré en tête de talus, au niveau de la crête, afin d'assurer sa tenue dans le temps et sa continuité sur toute la surface du talus en amont.

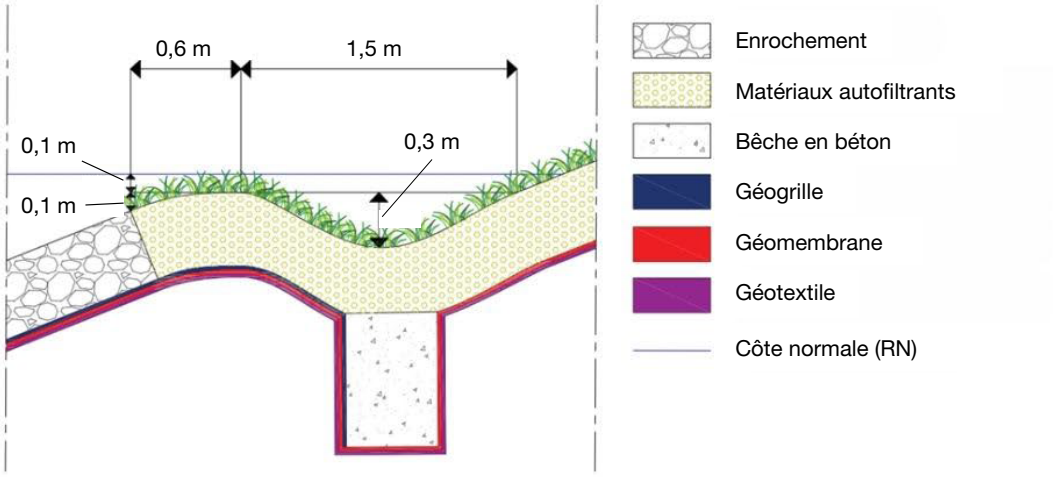


***Figure 14**. Coupe d'une zone de refuge large avec bêche en béton*

Végétation et sélection des espèces

Le choix des espèces végétales est fondamental pour assurer la durabilité écologique du projet. Il doit se baser sur des espèces locales, adaptées à l'altitude (présentes dans la mesure du possible dans le bassin-versant) et aux conditions environnementales, et notamment hydriques, spécifiques des zones aménagées (c'est-à-dire des plantes terrestres en partie haute du talus en amont et des plantes aquatiques en zone de marnage et dans les zones refuges).

S'agissant des berges et à la suite des expérimentations menées ces dernières années, les plantes hélophytes (semi-aquatiques) sont privilégiées dans les zones de marnage et les zones refuges. Celles-ci présentent de bonnes capacités d'enracinement et participent activement à la stabilisation des matériaux en zone humide. Leur système rhizomateux peut par ailleurs leur permettre de se déplacer et de coloniser de nouveaux espaces. Leur développement optimal est variable et elles peuvent généralement se maintenir jusqu'à des hauteurs d'eau souvent comprises entre 20 et 30 cm. Des plantes hydrophytes (aquatiques) peuvent être envisagées dans les zones refuges, offrant des conditions hydriques plus pérennes.

Les ingénieries pour la conception des retenues intégrées dans leur environnement

La conception des retenues collinaires et d'altitude intégrées dans leur environnement nécessite de faire appel à deux compétences distinctes :

• celle de l'ingénierie des barrages : il s'agit de compétences plurielles et ensemblières, de base en génie civil et géotechnique, mais aussi en hydrologie, hydraulique, auscultation, etc. En France, l'ingénierie des barrages fait l'objet d'un agrément ministériel spécifique ;

• celle de l'ingénierie écologique : il s'agit d'une approche interdisciplinaire à la croisée de l'écologie, des sciences du sol et de celles de l'ingénieur. Elle s'inscrit dans le cadre plus large des solutions fondées sur la nature (SfN) et a pour objectif de concevoir des milieux durables et évolutifs, sans dépendre exclusivement d'un entretien mécanique. En France, les démarches de génie écologique sont encadrées par la norme NF X10-900. Dans le cas présent, il s'agit de recréer les conditions d'accueil et de fonctionnement de la biodiversité des berges et des talus des retenues.

CHAPITRE 4

Opération d'entretien sur des bassins de petite et moyenne taille



Le rôle du propriétaire et les différents acteurs de l'entretien et de la maintenance des retenues

Le propriétaire (ou maître d'ouvrage) d'un barrage de retenue, quel que soit son statut, est le principal acteur de la gestion de la retenue. Il est chargé de l'ouvrage tout au long de sa vie : construction, mise en eau, exploitation, surveillance, entretien et gestion des documents réglementaires.

Il est civilement et pénalement responsable des dommages causés, notamment en cas de rupture et en particulier en situation de défaut d'entretien ou de surveillance. Le propriétaire doit produire un suivi régulier afin d'éviter les dysfonctionnements, de garantir la sécurité et la performance de l'ouvrage sur le long terme, de prévenir des phénomènes de vieillissement et d'assurer sa durabilité. L'entretien doit également concerner l'environnement proche (versants, cours d'eau), la végétation, les accès, les dispositifs d'auscultation, les ouvrages de protection, les ouvrages hydrauliques, ainsi que les éléments assurant l'étanchéité, comme le dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG).

Le propriétaire peut confier certaines missions à un exploitant ou à des maîtres d'œuvre (des bureaux d'études, des ingénieurs-conseils). Ainsi, la gestion d'un barrage de retenue de petite et moyenne taille peut impliquer d'autres acteurs aux tâches bien définies :

- l'exploitant est chargé de l'entretien courant, parfois l'entretien plus exceptionnel, des contrôles de fonctionnement, de l'auscultation et de la surveillance visuelle. L'exploitant peut être un service du propriétaire ou une société spécifique chargée de l'exploitation ;
- un bureau d'études externe peut compléter les missions de l'exploitant dans l'analyse des données d'auscultation ou dans la réalisation de visites réglementaires telles que les visites techniques approfondies ;
- le maître d'œuvre intervient lors de la conception et de la construction, jusqu'à la fin de la première mise en eau. Il peut également prendre en charge durant la phase d'exploitation des opérations ultérieures à la construction du barrage telles que des travaux de confortement ou de grosse maintenance.

L'autorité de contrôle, par le biais de son service de contrôle de la sécurité des ouvrages, contrôle que le propriétaire assume correctement ses obligations de surveillance, d'entretien et de maintenance du barrage.

Surveillance du barrage

La surveillance du barrage vise principalement à suivre son état et les évolutions de son comportement. Elle permet au propriétaire de décider de la nature et de l'urgence des interventions de maintenance ou de réparation.

Les évolutions dans le comportement des barrages sont en général lentes. Certaines peuvent s'avérer potentiellement rapides, en particulier pour les barrages en remblai étanchés par DEG, notamment lors de la phase cruciale de première mise en eau. En effet, les remblais de tels barrages sont généralement semi-perméables et, en cas de défaillance de la géomembrane, peuvent être le siège d'écoulements à fort gradient, donc à dynamique rapide. La méthodologie de suivi doit fournir les moyens de détecter les anomalies, d'apprécier les vitesses d'évolution et leur aboutissement probable, en séparant les phénomènes réversibles des phénomènes irréversibles.

En phase d'exploitation, le rythme de la surveillance est adapté à la nature et à l'état du barrage. Il doit toutefois être impérativement renforcé en cas d'anomalies ou de désordres constatés sur l'ouvrage, ainsi qu'à la suite de crues ou d'autres phénomènes naturels (glissements de terrain, crues torrentielles, avalanches, séismes) survenus à proximité de l'aménagement, voire l'ayant affecté.

La surveillance des barrages repose sur :

- la surveillance visuelle ;
- la vérification périodique du bon fonctionnement des organes de sécurité, notamment des vannes. Cette vérification doit être systématique à l'occasion des visites techniques approfondies, mais il est recommandé que le propriétaire fasse procéder à des essais plus fréquents ;
- l'auscultation.

La surveillance visuelle

La surveillance visuelle est une méthode qualitative qui intègre de très nombreux paramètres et qui permet de détecter la grande majorité des désordres et des anomalies susceptibles d'affecter le barrage, ses ouvrages attenants et son environnement. Il existe trois modes ou circonstances de visite de surveillance :

- la surveillance visuelle de routine ;
- la surveillance spéciale à l'occasion d'une circonstance ou à la suite d'un phénomène extérieur particulier : crue, glissement de terrain, chute de pierres, avalanche, séismes, etc. ;
- la visite technique approfondie.

La surveillance visuelle de routine

Elle a pour objectif de déceler rapidement tout phénomène nouveau affectant les ouvrages ainsi que de suivre qualitativement les évolutions. En phase d'exploitation normale et en l'absence de tout indice inquiétant quant au comportement de l'ouvrage, la périodicité minimale recommandée est mensuelle (bimestrielle pour les plus petits barrages sans enjeux). Si l'on constate une évolution nouvelle, les visites doivent être plus rapprochées, et un événement ou un phénomène extérieur particulier doit donner lieu à une visite spéciale. Dans le cadre de la première mise en eau (et, de préférence, également pendant la première vidange), la périodicité de cette surveillance visuelle est liée à la vitesse de montée ou de descente du plan d'eau. Ces visites de surveillance ne doivent négliger aucun point d'observation sur le barrage et sur les ouvrages attenants, et doivent permettre de procéder aux mesures simples du dispositif d'auscultation, telles que le débit de fuite et la piézométrie, et de vérifier le bon fonctionnement des appareils de mesures.

Parmi les points principaux à observer lors d'une visite de surveillance, on peut constater :

- l'apparition ou l'évolution de zones humides sur le parement ou sur le pied en aval du barrage ;
- l'apparition ou l'évolution de fuites localisées, y compris dans la zone en aval du barrage, éventuellement avec entraînement de grains de sol ;
- l'apparition de bourrelets ou de tassements (amorces de glissement) sur le talus en aval ou sur la partie émergée du talus en amont ;
- le creusement de ravines sur le parement en aval ;

- l'apparition de points bas, de fissures, etc., sur la crête du remblai ;
- des désordres sur le recouvrement de la géomembrane (pierres déplacées, désagrégées, sous-couche ou géotextile apparent, etc.) ;
- sur la géomembrane (partie hors d'eau) : poinçonnements, déchirures, plis anormaux, état des joints entre lés et des raccordements aux structures en béton (tassements et/ou tensions) ;
- la végétation arbustive sur les talus et près du pied en aval ;
- les dégâts dus aux animaux (fouisseurs, ruminants) ;
- l'obstruction des vannes ou des seuils par des corps flottants (par exemple, des blocs de glace) ou des matériaux ;
- l'obstruction du coursier de l'évacuateur de crue par de la végétation, des éboulements, etc. ;
- des affouillements, érosions, mouvements de structure dans l'évacuateur de crues ;
- l'état des appareils d'auscultation ;
- l'état de la clôture ;
- l'environnement de la retenue : instabilité de versants, chutes de blocs, activité torrentielle, etc.

En période d'enneigement, il faut porter une attention particulière aux éléments suivants :

- praticabilité des accès aux points de mesure à lecture simple du dispositif d'auscultation ;
- fonctionnalité de l'accès à la vanne de vidange et de son organe de manœuvre ;
- état de la glace formée sur le plan d'eau ;
- fonctionnement du dispositif de bullage ;
- présence de glace, de congères ou de surépaisseurs de neige, notamment sur les différentes parties de l'évacuateur de crues ;
- activité avalancheuse dans l'environnement de la retenue.

À la fin de l'hiver, il faut supprimer toutes les congères qui pourraient s'être formées et qui résistent longtemps à la fonte, afin de rétablir la pleine capacité de l'évacuateur de crues.

Si la visite s'effectue à retenue basse, voire vide, il faut inspecter attentivement les parties habituellement noyées afin de repérer d'éventuels désordres.

Les visites spéciales de surveillance à la suite d'un événement particulier

Ces visites doivent être systématiquement effectuées après chaque événement qui aurait pu avoir affecté le barrage ou qui a affecté son environnement plus ou moins proche. Parmi ces événements, on peut citer les crues, les aléas de montagne pour les retenues d'altitude (crues torrentielles, chutes de blocs, avalanches, glissements de terrain) et les séismes.

La visite technique approfondie (France)

La visite technique approfondie (VTA) est une visite approfondie à périodicité fixée par la réglementation (annuelle à quinquennale), sauf si des circonstances particulières viennent à exiger une VTA spéciale, notamment lors d'un événement important pour la sécurité hydraulique (EISH). Elle doit être réalisée par un professionnel spécialisé compétent, notamment en hydraulique, en électromécanique, en génie civil, et ayant une connaissance

suffisante du dossier et des résultats d'auscultation de l'ouvrage. Ce professionnel peut être un ingénieur au sein des services techniques du maître d'ouvrage ou de l'exploitant, si cet ingénieur a les compétences nécessaires. Dans le cas courant des exploitations des retenues d'altitude ou collinaires, il sera le plus souvent nécessaire que le propriétaire s'entoure de compétences extérieures pour ce faire, sous la forme de l'assistance d'un ingénieur ou d'un bureau d'études spécialisé. Il est recommandé qu'à l'occasion de la VTA, l'ingénieur spécialisé se fasse accompagner du ou des agents d'exploitation chargés des visites de routine, permettant ainsi au spécialiste de vérifier les pratiques de ces agents et, si nécessaire, de consolider, par des échanges directs, leur formation.

Auscultation

L'auscultation est une méthode de surveillance quantitative basée sur l'analyse des mesures fournies par une instrumentation spécifique à chaque ouvrage. Pour les barrages en remblai, on mesure essentiellement des débits de fuite ou de drainage, des pressions ou des niveaux d'eau dans le remblai et des déplacements.

Pour les retenues d'altitude ou collinaires, les principaux phénomènes susceptibles de conduire à des désordres sont globalement de quatre ordres :

- l'existence de fuites à travers le DEG, non contrôlées par le système de drainage et de filtration, et pouvant, par leur aggravation progressive, conduire à des mécanismes d'érosion interne ou de glissement dans le remblai ou dans sa fondation ;
- une modification du régime des écoulements souterrains dans la fondation du remblai, sous la cuvette ou dans les versants, et un colmatage ou une saturation des drains, entraînant localement une montée de la piézométrie dans le remblai ou dans sa fondation, et susceptibles de mettre en danger, sur un tronçon plus ou moins large, la stabilité de l'ensemble « remblai et fondation » ;
- les phénomènes spécifiques à la montagne de type gravitaire : crues torrentielles, chutes de blocs, effondrements, glissements de terrain, avalanches ;
- des tassements de la crête du remblai, pouvant être le signe d'un déplacement du remblai (mécanismes de glissement ou de grand glissement) ou engendrant une diminution de la revanche, conduisant à une perte de sécurité du barrage vis-à-vis de la surverse.

Le système d'auscultation de ces ouvrages doit être conçu et adapté en conséquence, avec :

- une robustesse des instruments manuels ou automatiques ;
- la mise hors gel des points de mesure hydraulique ;
- des regards et des points de mesure à lecture simple accessibles en toutes conditions, notamment d'enneigement pour les retenues d'altitude.

De façon générale, pour les retenues d'altitude, la surveillance et le suivi d'auscultation ne doivent pas être interrompus en période hivernale.

En cas de recours à des systèmes de mesure automatique, des dispositifs d'alarme de mauvais fonctionnement doivent être prévus et le passage des mesures en mode manuel doit toujours rester possible.

C'est à l'occasion des visites de surveillance de routine, donc avec une périodicité au minimum mensuelle (voire bimestrielle pour les plus petits barrages), qu'il convient de procéder aux mesures simples d'auscultation, à savoir :

- la cote du plan d'eau ;
- les débits des drains : fuites du DEG, débits de drainage de la cuvette ou des versants ;

• les pressions si un ou plusieurs instruments contrôlent une zone particulière du barrage ou de son environnement.

Un rapport d'auscultation doit être rédigé de façon périodique, en s'appuyant sur l'analyse des mesures obtenues. Ce rapport vise à appréhender, à partir de l'analyse approfondie des mesures, l'évolution du barrage dans le temps, déduction faite de toute autre variation (analyse à conditions constantes ou identiques).

Entretien et maintenance du dispositif d'étanchéité par géomembrane

Le DEG constitue un composant essentiel au fonctionnement des retenues collinaires et d'altitude, et son entretien et sa maintenance réguliers doivent être réalisés avec le plus grand soin.

Dans le cas d'une géomembrane non recouverte, il convient de :

• maintenir un niveau d'eau minimal au fond de la retenue pour le lestage contre le vent ;

• assurer un examen visuel régulier et complet, une fois par an, de la géomembrane ou, au minimum, à l'occasion de la visite technique approfondie. À ce titre, les zones de raccordement aux ouvrages en béton doivent être vérifiées avec soin ;

• si la géomembrane est non protégée en tête de talus en amont, vérifier que, dans la zone de marnage, l'effet du batillage ne déforme pas les couches de sol support (apparition d'une « marche d'escalier ») ;

• procéder à l'enlèvement des corps flottants éventuels qui pourraient dégrader la géomembrane ;

• si la géomembrane nécessite un nettoyage, respecter les consignes données par l'entreprise spécialisée, notamment en ce qui concerne le matériel et les produits à utiliser.

Dans les parties d'ouvrage où la géomembrane est recouverte, l'examen visuel direct de celle-ci n'est plus possible. On privilégie alors les méthodes indirectes (mesures d'auscultation, fibres optiques, essais à la fluorescéine, méthodes électriques, etc.) pour repérer les défauts ou les déchirures dans ces zones.

Les dégradations nécessitant des interventions de maintenance peuvent être notamment causées par :

• un vieillissement prématuré ;

• des tassements du support à proximité des ouvrages en béton ;

• les effets de la glace pour les retenues d'altitude ;

• les opérations d'entretien elles-mêmes ;

• le vandalisme.

Pour la réparation des trous accidentels ou de joints défectueux de faible longueur qui pourraient être à l'origine de désordres plus importants, il est recommandé de faire appel, dans le cadre de l'entretien annuel, à l'entreprise spécialisée qui a réalisé la pose de la géomembrane.

Si la dégradation de la géomembrane provient d'un caillou en saillie, il convient de pratiquer une petite incision, de retirer le caillou, de glisser un morceau de géotextile sous l'incision et de souder une pièce sur la géomembrane. Si l'origine de la malfaçon correspond à une

zone trop agressive plus large de la couche support, il convient de retirer une large surface de la géomembrane, de reprendre intégralement la couche support, de reconstituer le drain en sous-face, puis de faire réinstaller un morceau de géomembrane. Une telle opération est délicate et doit intervenir dans le cadre d'une maîtrise d'œuvre qualifiée et être confiée à une entreprise d'étanchéité spécialisée.

Ainsi, les opérations de réparation dépendent de la nature de la géomembrane, de la cause et de l'importance des dégradations, de l'analyse de leur vitesse d'évolution ultérieure prévisible (vieillissement prématuré, par exemple), du coût des réparations et de la possibilité de réparation (par exemple, il peut être très difficile de souder une nouvelle géomembrane sur l'ancienne). Les interventions sur la géomembrane peuvent prendre des niveaux d'importance très différents, depuis le simple entretien (pose de quelques pièces sur zones poinçonnées) jusqu'à la réhabilitation nécessitant des améliorations (reprise de la couche support, remplacement de la géomembrane).

La couche supérieure de la structure de recouvrement de la géomembrane, si cette structure existe, est soumise à l'action du batillage et à l'action de la glace pour les retenues d'altitude. Le sous-dimensionnement de la couche de protection vis-à-vis du batillage conduit presque toujours à des désordres plus ou moins rapides sur le parement en amont. Il convient donc d'intervenir rapidement lorsque l'on constate l'amorce des dégradations : en cas de désordres localisés sur une protection en enrochements, il convient de procéder à des réparations ponctuelles, en rechargeant la couverture et en mettant en place des enrochements d'une dimension au moins égale à celle des blocs déplacés.

Entretien et maintenance des structures hydrauliques

Les structures hydrauliques d'un barrage englobent les évacuateurs de crues, la vidange et les prises d'eau. De manière générale, ces ouvrages sont indépendants mais, dans le cas de petit barrage, ils peuvent être partiellement confondus.

Évacuateur de crues

Après chaque crue, les évacuateurs de crues doivent faire l'objet d'un examen visuel.

Dans la grande majorité des cas, les retenues collinaires ou d'altitude sont équipées d'évacuateurs à seuil libre, sans organes mobiles tels que des vannes et des clapets. L'entretien d'un évacuateur à seuil libre consiste essentiellement à enlever périodiquement et au moins après chaque crue tous les branchages, corps flottants et autres dépôts obstruant l'entonnement du seuil, le seuil lui-même, le coursier ou le bassin de dissipation.

Pour les retenues d'altitude, il est nécessaire de procéder à son déneigement (y compris le déblayage d'éventuelles congères) en fin de saison hivernale dans la perspective de crues de fonte. Toute négligence dans cet entretien risque de diminuer la capacité de l'évacuateur ou de nuire à son bon fonctionnement lors des crues. Par ailleurs, le travail d'enlèvement des dépôts ou de déneigement est d'autant plus facile qu'il est fait régulièrement.

Vidange et prise d'eau

La vidange doit être considérée comme un organe de sécurité du barrage, car sa manœuvre permet, en cas d'incident et d'inquiétude sur la sécurité de l'ouvrage, d'abaisser la cote du plan d'eau en quelques heures. La ou les vannes de vidange doivent être testées au moins

une fois par an, y compris en condition hivernale. Si la conduite de vidange est équipée d'une vanne en amont de garde et d'une vanne en aval de réglage, la vanne de garde est ouverte en fonctionnement normal.

Lors des essais, il faut surveiller :

- l'ouverture au moins partielle de la vanne de réglage en charge ;
- la fermeture et l'ouverture de la vanne de garde, vanne de réglage fermée ;
- l'ouverture totale de la vanne de réglage, le cas échéant, avec vanne de garde fermée.

Les vannes de prise d'eau sont manœuvrées régulièrement dans le cadre de l'exploitation normale du barrage. Tout dysfonctionnement apparaîtra donc de lui-même. Néanmoins, il faut vérifier au moins une fois par an le bon fonctionnement des éventuelles vannes de garde des prises d'eau.

Entretien du dispositif de drainage et d'auscultation

Une vérification régulière du bon fonctionnement des appareils d'auscultation doit être faite. Une attention particulière doit être portée en priorité sur l'entretien des dispositifs de drainage, dont le fonctionnement est crucial vis-à-vis de la sécurité des retenues collinaires et d'altitude. Parmi les différents travaux d'entretien, on peut retrouver :

- les exutoires des drains du remblai : dégagement de la végétation, contrôle des éventuels apports solides (examiner en particulier l'intérieur des tuyaux à leur exutoire), élimination des mousses et des algues qui se développent aux exutoires ;
- les fossés de collecte des débits : curage régulier, nettoyage de la végétation, le cas échéant, réfection des revêtements ;
- les drains et piézomètres crépinés dans un remblai : vérification périodique du niveau du fond du drain et, le cas échéant, nettoyage par circulation d'eau à faible pression ;
- les drains forés en fondation : élimination régulière de la calcite ou des divers dépôts susceptibles de se former en surface à l'exutoire des drains ; le cas échéant, nettoyage interne du drain au jet basse pression (l'hydrocureuse haute pression est à proscrire dans les drains crépinés) ;
- les parties métalliques des protections de drains et piézomètres : graissage des pas de vis et des cadenas, peinture des parties oxydables, numérotation ;
- les repères et bornes de nivellement : dégagement de la végétation, peinture.

Pour les retenues d'altitude en hiver, un entretien particulier est à prévoir afin de pouvoir poursuivre les mesures sur les instruments de lecture simple : déneigement, déblocage de regards, vérification du bon fonctionnement des instruments concernés, etc.

Entretien de la végétation

La végétation est un élément essentiel dans la conception et l'exploitation d'un barrage, car elle influence de manière significative le comportement du barrage et ses conditions de stabilité. Les effets peuvent être positifs, mais aussi potentiellement négatifs du point de vue mécanique et hydraulique. La végétation a également un effet très sensible sur les conditions de stabilité des déblais et des versants en amont du barrage.

En ce qui concerne le corps d'un barrage en remblai, les systèmes racinaires d'espèces arborées, arbustives ou ligneuses, même si elles contribuent au renforcement des couches superficielles du sol, introduisent des discontinuités dans le sol et peuvent interagir négativement avec les systèmes de renforcement ou d'étanchéité, réduisant les conditions de stabilité du remblai. Du point de vue hydraulique, la végétation arbustive et la présence de racines génèrent des filtrations préférentielles et augmentent le risque d'infiltration profonde et d'érosion interne. Elles peuvent également compromettre l'efficacité des systèmes de drainage. En outre, l'élimination et la décomposition d'une végétation arbustive non contrôlée sont de nature à laisser des conduits dans le sol augmentant très sensiblement la sensibilité à l'érosion interne.

Ainsi, la règle générale en exploitation est l'élimination de la végétation ligneuse sur les parements en amont, en aval et sur la crête. En revanche, la végétation ligneuse peut être envisagée de façon positive sur les déblais du barrage ou sur les versants, car elle contribue à leur stabilité mécanique sans compromettre la stabilité du remblai du barrage lui-même.

En exploitation, une couverture herbacée superficielle, continue et contrôlée représente donc la solution la plus appropriée, car elle permet de limiter la susceptibilité à l'érosion de surface et elle permet l'inspection détaillée des parements. À l'inverse, la présence de végétation arborée est généralement incompatible avec une bonne gestion de l'ouvrage, en raison des risques induits sur la stabilité et de la réduction de l'accessibilité et du contrôle.

En synthèse, la végétation doit donc être considérée comme une véritable variable de conception et de gestion d'un barrage en remblai et de son environnement (versants et déblais). La végétalisation du barrage et de ses abords est essentielle pour l'intégration environnementale de l'aménagement (voir section « Intégration environnementale des retenues », p. 82), et dépend de conditions de compatibilité qui nécessitent une sélection appropriée des espèces, un contrôle du développement des racines, l'absence d'interférences avec les dispositifs drainants, d'étanchéité et structurels et la préservation de la compacité du remblai.

La gestion de la végétation nécessite donc une approche interdisciplinaire, fondée sur l'intégration des analyses géotechniques, hydrauliques et écohydrologiques, ainsi que sur des activités appropriées de surveillance et d'entretien au fil du temps.

À cet égard, le lecteur pourra se référer au livrable du WP4.3 « Étude de la gestion de la végétation sur les retenues recouverte de végétation » du projet BECCA, relatif à la gestion de la végétation.

Références

Associazione Geotecnica Italiana (AGI). (1997 – new edition on 2022). Raccomandazioni sulla Programmazione ed Esecuzione delle Indagini Geotecniche in Sito. Edizioni AGI.

Associazione Geotecnica Italiana (AGI). (2022). Progettazione degli Interventi di Mitigazione del Rischio da Frana. Edizioni AGI.

Black, R. D. (1975). Flood Proofing Rural Residences: A Project Agnes Report. EDA 77-088. Washington, DC: U.S. Department of Commerce, Economic Development Administration.

Cascini, L., Ferlisi, S., Moraci, N., & Soccodato, C. (a cura di). (2022). Progettazione degli interventi di mitigazione del rischio da frana. Roma: Associazione Geotecnica Italiana (AGI) – ISPRA.

CIRIA, CUR & CETMEF. (2007). The Rock Manual: The Use of Rock in Hydraulic Engineering (2nd ed., CIRIA C683). London: CIRIA.

Clausen, L., & Clark, P. B. (1990). The development of criteria for predicting dam-break flood damages using modelling of historical dam failures. In W. R. White (Ed.), International Conference on River Flood Hydraulics (17–20 September 1990) (pp. 369–380). Chichester: John Wiley & Sons / Hydraulics Research Limited.

Comité français des barrages et réservoirs (CFBR). (2015). Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai [Guidelines for the justification of embankment dams and levees]. Paris : CFBR.

Comité français des barrages et réservoirs (CFBR). (2013). Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages [Dam spillway design guideline]. Paris : CFBR.

Comité français des géosynthétiques (CFG). (2021). Recommandations pour la protection contre le poinçonnement des géomembranes. Paris : CFG.

Comité français des géosynthétiques (CFG). (2017). Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par géomembranes. Paris : CFG.

Comité français des géosynthétiques (CFG). (2012). Recommandations pour l'emploi des géosynthétiques dans les systèmes de drainage et de filtration. Paris : CFG.

Comité français des géosynthétiques (CFG). (2003). Présentation de méthodes de détection et de localisation de défauts dans les dispositifs d'étanchéité par géomembranes. Paris : CFG.

Comité français des grands barrages (CFGB), Degoutte, G. (coord.). (2002). Petits barrages : recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi [Small dams: guidelines for design, construction and monitoring]. Antony/Paris: Cemagref Éditions – ENGREF.

Commission internationale des grands barrages (CIGB) / International Commission on Large Dams (ICOLD). (2022). Dam surveillance. Lessons learnt from case histories [Surveillance des barrages. Leçons tirées d'études de cas]. Bulletin n° 180. Paris : CIGB/ICOLD.

Commission internationale des grands barrages (CIGB) / International Commission on Large Dams (ICOLD). (2010). Geomembrane sealing systems for dams: Design principles and review of experience [Dispositifs d'étanchéité par géomembranes pour les barrages. Principes de conception et retour d'expérience]. Bulletin n° 135. Paris : CIGB/ICOLD.

Commission internationale des grands barrages (CIGB) / International Commission on Large Dams (ICOLD). (1996). Dams and related structures in cold climate. Design guidelines and case studies. Bulletin n° 105. Paris : CIGB/ICOLD.

Commission internationale des grands barrages (CIGB) / International Commission on Large Dams (ICOLD). (1993). Embankment dams: upstream slope protection. Review and recommendations [Barrages en remblai : protection du talus amont. Synthèse et recommandations]. Bulletin n° 91. Paris : CIGB/ICOLD.

Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. In A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. Washington, DC: National Academy Press. Coll. Transportation Research Board Special Report 247, p. 36–75.

Dalrymple, T. (1960). Flood-frequency analyses, Manual of Hydrology: Part 3. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1543-A. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. https://doi.org/10.3133/wsp1543A

Derro, L., Fry, J.-J. (2023). Érosion interne dans les ouvrages hydrauliques. Vol. 3. Guide pour l'ingénieurie. Paris : Presses des Ponts. Projet national ERINOH.

Dressler, R. F. (1952). Hydraulic resistance effect upon the dam-break functions. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 49(3), 217–225.

Evangelista, G., Woods, R., & Claps, P. (2023). Dimensional analysis of literature formulas to estimate the characteristic flood response time in ungauged basins: A velocity-based approach. Journal of Hydrology, 627, 130409. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130409

Evans, S. G. (1986). The maximum discharge of outburst floods caused by the breaching of man-made and natural dams. *Canadian Geotechnical Journal*, 23(3), 385–387. https://doi.org/10.1139/t86-053

French Committe of Small Dams. (2005). Guidelines for Design, Construction, and Monitoring. Coordinator Gerard Degoutte.

Froehlich, D. C. (1995). Peak outflow from breached embankment dam. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 121(1), 90–97. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1995)121:1(90)

Grimaldi, S., Kao, S.-C., Castellarin, A., Papalexiou, S. M., Viglione, A., Laio, F., Aksoy, H., & Gedikli, A. (2011). Statistical hydrology. In P. Wilderer (Ed.), *Treatise on Water Science* (Vol. 2, pp. 479–517). Oxford: Elsevier/Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00046-4

Hosking, J. R. M., & Wallis, J. R. (1997). *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments*. Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511529443

Institut des routes, des rues et des infrastructures pour la mobilité (Idrrim) & Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema). (2024). GTR ou Guide des terrassements des remblais et des couches de forme. Principes généraux et annexes techniques. Bron : Cerema.

Karvonen, R. A., Hepojoki, H. K., Huhta, H. K., & Louhio, A. (2000). The Use of Physical Models in Dam-Break Flood Analysis: Development of Rescue Actions Based on Dam-Break Flood Analysis (RESCDAM). Final Report, 57 pp. Helsinki: Finnish Environment Institute / Helsinki University of Technology.

Kirkpatrick, G. W. (1977). Evaluation guidelines for spillway adequacy. In *The Evaluation of Dam Safety: Proceedings of the Engineering Foundation Conference* (pp. 395–414). New York: American Society of Civil Engineers.

MacDonald, T. C., & Langridge-Monopolis, J. (1984). Breaching characteristics of dam failures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(5), 567–586. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:5(567)

Manuali tecnici sugli sbarramenti per l'accumulo idrico della Regione Piemonte, https://www.regione.piemonte.it/web/temi/protezione-civile-difesa-suolo-opere-pubbliche/difesa-suolo/dighe/manuali-tecnici-sugli-sbarramenti-per-laccumulo-idrico (manuale_tecnico_sbarramenti.pdf e manuale_anomalie-2011_rid3.pdf)

Maidment, D. R. (Ed.). (1993). *Handbook of Hydrology*. New York: McGraw-Hill.

Ministero dei Lavori Pubblici. (2018). Norme tecniche per le costruzioni. Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018.

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. (2025). Decreto direttoriale n. 510 del 29 luglio 2025. Criteri e procedure tecniche per la determinazione delle classi di attenzione degli impianti di ritenuta, in attuazione dell'art. 4 del D.M. 14 maggio 2024, n. 94. Direzione Generale per le Dighe e le Infrastrutture Idriche.

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. (2024). Decreto 14 maggio 2024, n. 94. Regolamento recante la disciplina del procedimento di approvazione dei progetti e del controllo sulla costruzione e l'esercizio degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse). Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 156 del 5 luglio 2024.

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. (2018). Decreto 17 gennaio 2018 – Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» (NTC 2018). Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 42 del 20 febbraio 2018, Supplemento Ordinario n. 8.

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. (2014). Decreto 26 giugno 2014 – Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse). Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 156 dell'8 luglio 2014.

Peyras, L., & Mériaux, P. (Eds). (2009). *Retenues d'altitude*. Versailles : éditions Quæ, 352 p.

Poggi, D., Grimaldi, S., Perucca, E., Miotto, F., Pozzallo, M., & Cagninei, A. (2009). Definizione di una metodologia speditiva per il calcolo del coefficiente di rischio globale per gli sbarramenti di competenza regionale. Contratto di ricerca, Regione Piemonte.

Progetti transfrontalieri INTERREG Francia-Italia: RISBA "Sicurezza degli sbarramenti artificiali" (ALCOTRA 2007-2013) e RESBA "Resilienza degli sbarramenti" (ALCOTRA 2014-2020)

Ritter, A. (1892). Die Fortpflanzung der Wasserwellen. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 36(33), 947–954.

Tahir, H., Veylon, G., Stoltz, G., & Peyras, L. (2026). Development of a thermo-mechanical model for PVC geomembrane—Application to geomembrane stability on dam slopes. *Applied Sciences*, 16(3), 1160. https://doi.org/10.3390/app16031160

U.S. Bureau of Reclamation (USBR). (1982). *Guidelines for Defining Inundated Areas Downstream from Bureau of Reclamation Dams*. Reclamation Planning Instruction No. 82-11. Denver, CO: U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation.

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. In R. L. Schuster & R. J. Krizek (Eds.), *Landslides: Analysis and Control*. Washington, DC: National Academy of Sciences. Coll. Transportation Research Board Special Report 176, p. 11–33.

Varnes, D. J., & International Association of Engineering Geology, Commission on Landslides and Other Mass Movements on Slopes. (1984). *Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice*. Natural Hazards, 3. Paris: UNESCO.

Verifiche Sismiche delle Grandi Dighe, degli Scarichi e delle Opere Complementari e Accessorie Istruzioni per l'applicazione della Normativa Tecnica di cui sl D.M. 26.06.2014 (Ntd14) e al D.M. 17.01.2018 (NTC18) a cura di Armando Lanzi e Paolo Paoliani – Divisione VI Strutture e Geotecnica

Whitham, G. B. (1955). The effects of hydraulic resistance in the dam-break problem. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 227(1170), 399–407. https://doi.org/10.1098/rspa.1955.0019

DOI : 10.5281/zenodo.23218346