

## Retenues d'altitude pour la production de neige de culture : recommandations pour la conception, la réalisation, la surveillance et la réhabilitation

Depuis vingt ans, le développement des retenues d'altitude destinées au stockage de l'eau pour la production de neige de culture a été spectaculaire sur l'ensemble des massifs français, pour des raisons tant climatiques que commerciales.

Exposées à des aléas naturels spécifiques au milieu montagnard comme les avalanches ou les débordements torrentiels, la conception et la gestion de ces retenues posent toutefois des problèmes de réglementation et de sécurité publique. Cet article propose des recommandations en matière de conception, de réalisation et de surveillance.

# L

Le parc français de barrages d'altitude est riche de quelque cent cinq ouvrages réalisés essentiellement dans les Alpes ou les Pyrénées. Les retenues d'altitude sont implantées en station de loisirs de montagne et destinées à créer une réserve d'eau. Majoritairement,

l'usage de l'eau est la production de neige de culture.

Les retenues d'altitude, malgré des volumes modestes, induisent des risques potentiellement importants. Le retour d'expérience montre qu'une retenue d'altitude sur deux intéresse la sécurité publique au sens où la rupture de la partie en remblai de l'ouvrage ou l'expulsion brutale du volume d'eau stockée aurait des conséquences graves pour les personnes et les biens situés en aval.

Leur implantation en montagne entre 1 200 et 2 700 m en fait indubitablement des ouvrages d'altitude. Cette situation entraîne des difficultés spécifiques dans toutes les phases : en conception, en réalisation, en exploitation et, s'il y a lieu, en réhabilitation. Parmi les plus importantes difficultés, on peut citer : des contextes géologiques et géotechniques complexes, des aléas spécifiques à la montagne, des dispositifs techniques parfois fragiles propres aux retenues d'altitude, une fenêtre de construction très limitée dans l'année, des sollicitations importantes par la glace, des structures soumises au froid intense, une surveillance difficile en conditions hivernales, etc.

D'un point de vue écologique, les sites de montagne sont souvent très riches, mais également fragiles.

Le retour d'expérience des retenues d'altitude en service et des projets en cours est en demi-teinte, montrant de nombreuses pathologies, des incidents, voire des accidents, des défauts de conception et de réalisation. La réhabilitation des retenues d'altitude dont la sécurité ou la fiabilité n'est pas satisfaisante est également une préoccupation essentielle des maîtres d'ouvrages et de leurs bureaux d'études et de conseil.

Après un premier travail préparatoire (Mériaux *et al.*, 2006), le présent article s'appuie sur le guide de recommandations « Retenues d'altitude » qui est paru en mai 2009 aux Éditions QUAÉ ([www.quae.com](http://www.quae.com)). Il établit un bilan de retour d'expérience sur le comportement et les pathologies des ouvrages. Il présente les recommandations fortes du guide relatives aux impacts environnementaux, aux aléas spécifiques à la montagne, à la conception des remblais et de leur système de drainage et à la surveillance et l'exploitation.

### Enquêtes et retour d'expérience en demi-teinte pour les retenues d'altitude

Pour la préparation de ce guide, des enquêtes documentaires et de terrain ont été conduites sur le parc de retenues d'altitude des massifs alpin et pyrénéen. Les ouvrages examinés ont fait l'objet de différentes investigations : analyse des études de conception du dossier de l'ouvrage (hydrologie, aléas\* de montagne, maîtrise d'œuvre, impact environnemental, onde de submersion), analyse approfondie centrée sur les études géologiques et géotechniques, visite détaillée et parfois expertise approfondie. Ce sont au total quelque soixante-cinq ouvrages qui ont été ainsi examinés, ce qui a permis de rassembler un important retour d'expérience sur la conception, l'état, le comportement, les incidents, l'exploitation et la surveillance des retenues d'altitude. Nous présentons ici le retour d'expérience technologique.

#### Caractéristiques générales des aménagements

- Type de barrage : ouvrages en remblai-déblai, avec étanchéité complète par géomembrane\* du remblai et de la cuvette.



- Altitude d'implantation : 1 200 à 2 700 m.
- Volume de retenue : 5 000 à 400 000 m<sup>3</sup> (moyenne environ 40 000 m<sup>3</sup>).
- Hauteur maximale du remblai : 4 à 20 m.
- Fruit du talus amont : 1,5 à 3.
- Fruit du talus aval : 1,5 à 3,5.
- Évacuateur de crues : en général de type déversoir en enrochements bétonnés, placé sur le remblai, le plus souvent sans dissipateur d'énergie ou très rustique.
  - Dispositif d'auscultation : souvent réduit à un point de collecte unique des débits de drainage.
  - Organe de vidange : conduite traversant le remblai ou placée dans la fondation.

### Retour d'expérience sur les aspects géologie, géotechnique et conception

Les enquêtes réalisées montrent qu'une large majorité des remblais (90 %) repose sur une fondation résistante (moraine\* ou rocher) et non compressible. La coupe géologique type rencontrée lors des reconnaissances d'un sous-sol de montagne montre du haut vers le bas :

- en surface, une couche dépassant rarement plus de deux mètres de terre végétale, limons, tourbe, argile ou éboulis ;
- des moraines argilo-graveleuses à blocs, pouvant être affleurantes et suffisamment épaisses pour constituer le substratum géotechnique ;
- le substratum géologique rocheux (schistes, grès, granite, quartzites, cargneules, gneiss, calcaire, marno-calcaire...) pouvant être affleurant, avec parfois une frange importante altérée.

Cette coupe type met en évidence la particularité géologique des sites de montagne, qui se caractérisent par des difficultés d'étanchéité naturelle : présence d'éboulis sur pentes, moraines, rocher fracturé, cargneules, karsts, absence d'argile en haute altitude, etc. Les analyses hydrogéologiques des fondations montrent très souvent des venues d'eau (70 %).

Concernant la conception géotechnique des retenues d'altitude, les matériaux des remblais sont constitués majoritairement de moraines et de schistes (60 %). À un moindre niveau, on rencontre des remblais en matériaux

limoneux (15 %) et en enrochements (15 %). Les remblais en enrochements sont construits en déblai miné et parfois concassé, issu principalement de quartzites, de gneiss et de calcaires. Le retour d'expérience montre que leur mise en remblai conduit à un matériau qui n'est plus une roche et dont les caractéristiques de drainage sont fortement diminuées. De fait, les cas de retenues d'altitude avec remblai drainant sont apparus marginaux.

Un remblai sur deux présente une pente de talus aval trop raide au regard des règles de l'art (pente supérieure à 1V/2H). Un constat analogue est fait sur les pentes des talus amont. Cela peut conduire à une sécurité au glissement insuffisante au regard des standards actuels de justification. Concernant le drainage, les enquêtes ont montré que 20 % des barrages ne disposent pas de dispositif de drainage du remblai et sont donc vulnérables en cas de défaillance du dispositif d'étanchéité.

Concernant l'exécution des travaux relatifs au remblai, le retour d'expérience des chantiers a mis en évidence de nombreuses situations problématiques. Parmi les plus importantes, on peut citer :

- des excès d'eau (terrains et matériaux très humides, difficultés de contrôle des venues d'eau en sous-sol, portance très faible) ;
- des difficultés de compactage (densité insuffisante, déformabilité importante) ;
- des difficultés liées à des reconnaissances insuffisantes (pénurie de matériaux, matériaux inadaptés pour le remblai, zones non portantes).

En conséquence, les sites d'implantation des retenues d'altitude, leur topographie et leur géologie imposent souvent une étanchéité généralisée de la cuvette, la principale raison étant le contrôle des fuites en fondation. En effet, on trouve des configurations où les fuites par le fond de la cuvette peuvent échapper au talweg\* et rejoindre au final des talwegs adjacents. Par ailleurs, d'autres raisons conduisent également au choix d'une étanchéité artificielle de la cuvette et du remblai : notamment une disponibilité de matériaux étanches insuffisante et, très souvent, une très forte hétérogénéité des matériaux.



3 Chutes de blocs de glace ayant entraîné des déchirures décimétriques de la géomembrane en fond de retenue.



4 Nombreuses perforations de la géomembrane par effet de rabotage par la glace.

### Retour d'expérience sur le dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG\*)

L'essentiel des ouvrages sont équipés d'un dispositif d'étanchéité artificiel par géomembrane et le guide « Retenues d'altitude » est centré sur cette technologie.

Quatre principaux types de géomembrane de synthèse sont rencontrés de façon égale sur les ouvrages étanchés artificiellement : EPDM\*, PEHD\*, PP-F\* et PVC-P\*. Il n'y a donc pas d'utilisation privilégiée d'une famille particulière.

Les géomembranes sont non protégées ou protégées uniquement sur la partie supérieure des talus intérieurs dans la très grande majorité (90 %) des retenues d'altitude (photos 1 et 2), le recouvrement intégral étant très rarement observé.

La couche support de la géomembrane présente un niveau de qualité très variable d'un ouvrage à l'autre : si 10 % des couches supports sont sableuses et non agressives, on recense 40 % de couches irrégulières

à très irrégulières pouvant être agressives et engendrant des sollicitations de poinçonnement sur la géomembrane. Les écoulements souvent rencontrés dans la couche support accentuent son irrégularité lorsque cette couche n'est pas auto-stable (entraînement des fines pouvant rendre saillants des granulats grossiers agressifs).

L'endommagement de la géomembrane est une pathologie très courante sur les retenues d'altitude : 40 % des retenues connaissent régulièrement des endommagements importants (arrachements, très nombreux poinçonnements chaque année), 15 % connaissent des défauts récurrents nécessitant des interventions annuelles de maintenance.

Deux facteurs explicatifs de l'endommagement des géomembranes ont été mis en évidence lors des enquêtes :

- l'action de la glace (photo 3) ;
- l'agressivité du support (photo 4).

Le retour d'expérience a montré que la présence d'une risberme avec couverture supérieure en petits enrochements est généralement un facteur aggravant d'endommagement de la géomembrane : la glace qui se forme au niveau de la risberme et de la couverture au-dessus de la risberme reste accrochée aux enrochements, et des décrochements brutaux de blocs de glace entraînant parfois des cailloux se produisent ensuite, avec pour conséquences des perforations et des déchirures de la géomembrane en partie inférieure du parement non recouvert et en fond de retenue lorsque celle-ci est vide.

Nous renvoyons le lecteur intéressé vers la publication (Girard *et al.*, 2009) qui traite spécifiquement de la pathologie et des solutions relatives au DEG, et qui synthétise le guide « Retenues d'altitude » sur ce sujet.

## Les principales recommandations

### Des milieux riches et fragiles : l'enjeu de l'impact environnemental

Les milieux d'altitude présentent une grande richesse écologique, caractérisée notamment par une flore et une faune remarquables et par des zones humides à forte valeur patrimoniale. Ils sont également caractérisés par une grande fragilité ainsi que par une dynamique très lente : toute dégradation du milieu s'inscrit dans une durée bien plus longue qu'à de plus faibles altitudes et les dynamiques naturelles de reconstitution peuvent s'y étaler sur des décennies.

L'étude des impacts environnementaux est essentielle et doit être abordée dès le démarrage du projet. Elle doit approcher l'aménagement de manière globale et permettre d'avoir une vue d'ensemble du projet et de ses différents impacts sur l'environnement, en particulier sur les milieux aquatiques. L'étude doit également recenser les sites où les projets d'aménagement sont contraints par des enjeux environnementaux particuliers (milieux remarquables, dispositions réglementaires, etc.). À de telles fins, le guide « Retenues d'altitude » rappelle les principes réglementaires relatifs à la protection de l'en-



© Cemagref.

5 Zone humide de montagne  
(Saint-Jean Montclar – Alpes  
de Haute-Provence).

vironnement, propose des éléments d'aide à la décision et de hiérarchisation des sites vis-à-vis des questions liées aux impacts et donne des éléments de méthodes pour conduire les études d'impact.

La réglementation sur l'eau demande que le document d'incidence prenne en compte les ouvrages soumis à déclaration ou à autorisation, mais également les éléments connexes à l'ouvrage qui participent aux incidences sur l'eau. Il convient donc d'analyser l'impact de la construction de la retenue d'altitude et de ses ouvrages associés, mais aussi l'impact de la mise en place des réseaux qui viennent alimenter ou desservir la retenue, les voies d'accès au chantier et les éventuels impacts qualitatifs et quantitatifs sur les eaux et les milieux liés notamment aux modalités de prélèvements et à la qualité des eaux utilisées pour produire la neige de culture.

Les impacts doivent être plus particulièrement évalués sur les points suivants :

- les zones humides d'altitude (photo 5). L'enquête menée dans le cadre de ce guide permet d'estimer qu'environ un tiers des retenues d'altitude ont été installées sur des zones humides. Les travaux réalisés directement sur la zone humide détruiront définitivement les parties impactées et les travaux réalisés à proximité de cette même zone humide, même s'ils ne touchent pas directement celle-ci, pourront également avoir un

impact important (changement des conditions hydrologiques ou hydrogéologiques, apports de fines...);

- la présence d'espèces protégées. La détection des éventuelles espèces animales et végétales protégées doit être réalisée bien en amont du projet afin d'éviter toute complication. L'enquête menée dans le cadre de ce guide montre en effet que cette problématique est fréquente ;

- les torrents et les écoulements superficiels. Les impacts les plus aigus correspondent aux prélèvements réalisés en période d'étiage hivernal, lors de laquelle des prélèvements importants peuvent provoquer la prise en glace pour de petits émissaires et limiter les possibilités de survie de la faune piscicole (dilution de la pollution, débit réservé) ;

- les eaux souterraines. Il peut arriver que l'eau stockée soit polluée du fait de prélèvements dans des eaux de surface recevant des rejets d'assainissements, de déjections animales ou de pollutions physico-chimiques liées aux activités anthropiques. La forte perméabilité générale des sols de montagne et le caractère progressif du ruissellement à la fonte des neiges, rendent les aquifères vulnérables et peut alors constituer une menace potentielle pour les captages d'eau potable. Le rapport récent de l'AFSSET\* (Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail) met en avant les risques liés à ce type de pollution (AFSSET, 2008).

- Enfin, le changement climatique doit être intégré dans l'étude des impacts environnementaux ; en particulier, il est nécessaire d'évaluer les potentialités climatiques d'un site.

### Des aléas spécifiques à la montagne et des risques associés potentiellement forts

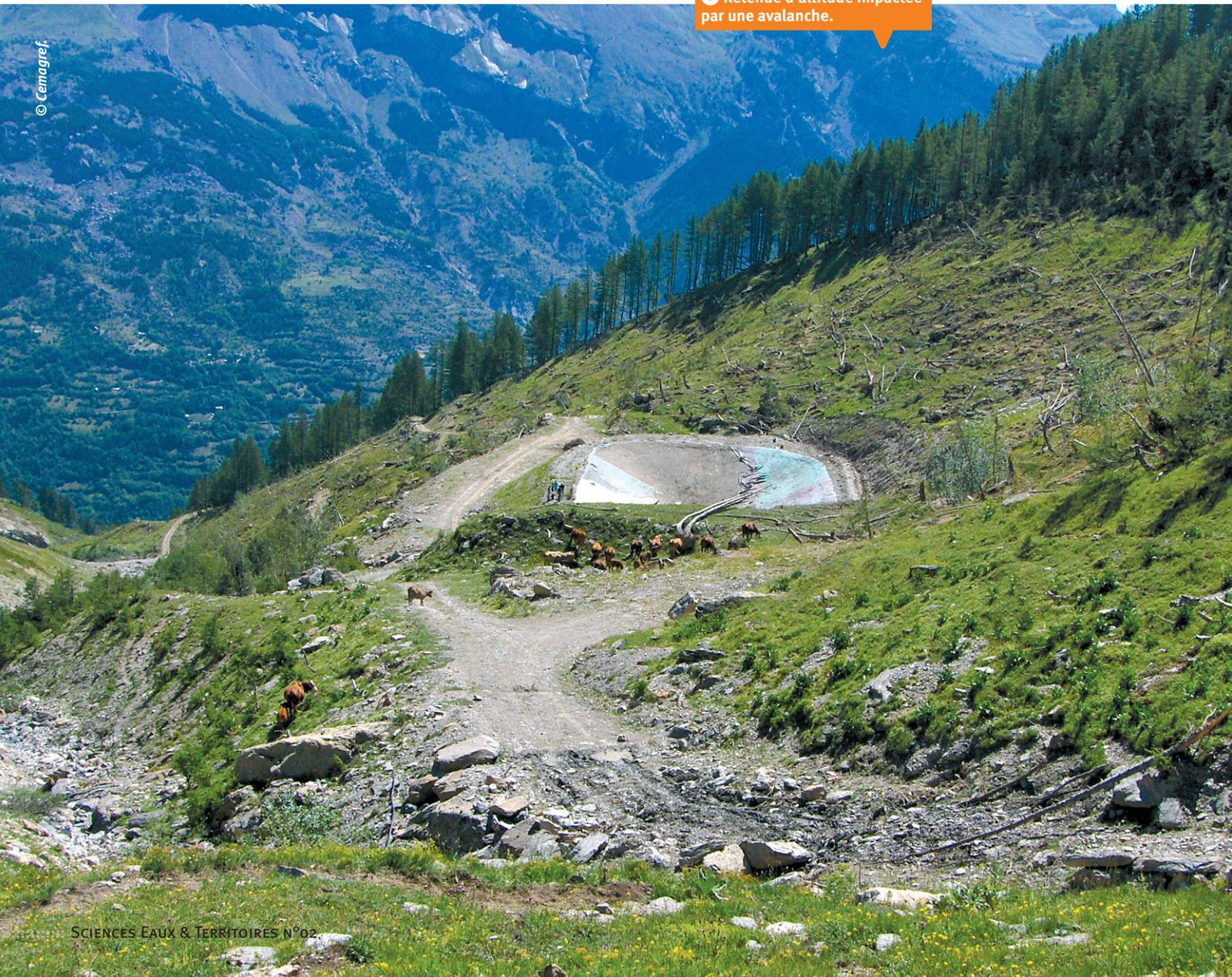
En plus des aléas classiques rencontrés en plaine (crue, séisme), les retenues d'altitude peuvent être exposées à des aléas spécifiques aux zones de montagne : les avalanches\* (photo 6), les phénomènes torrentiels et les aléas géologiques – glissements de versant, écroulements, chutes de blocs. L'intensité de la plupart de ces aléas montagnards est très difficile à quantifier, aux périodes de retour rares à exceptionnelles, ce qui rend délicate la conception des ouvrages de protection des retenues lorsqu'ils s'avèrent nécessaires.

Les retenues d'altitude, malgré des volumes modestes, induisent des risques potentiellement importants. Le retour d'expérience montre qu'une retenue d'altitude sur deux « intéresse la sécurité publique » au sens où la rupture de la partie en remblai de l'ouvrage ou l'expulsion brutale du volume d'eau stocké aurait des conséquences graves pour les personnes et les biens situés en aval. Plusieurs raisons expliquent cette situation :

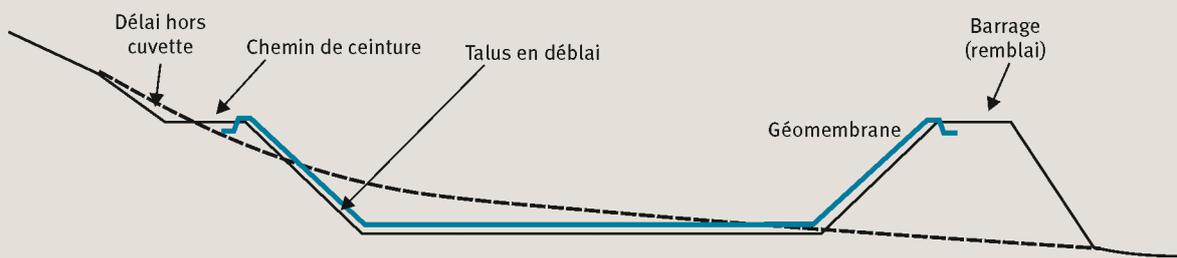
- leur position dominante au-dessus d'installations à forte fréquentation touristique ou des zones résidentielles de station de ski ;
- les pentes fortes et des géologies de versant qui conduiraient à la formation de phénomènes torrentiels en cas de largage de débits importants ;
- la proximité entre retenue et enjeux aval et des délais d'arrivée d'une onde de rupture extrêmement réduits.

La sécurité attendue d'une retenue d'altitude dépend des risques qu'elle fait peser sur les zones en aval. Les retenues « intéressant la sécurité publique » doivent avoir une fiabilité très élevée, conforme à celle d'un

6 Retenue d'altitude impactée par une avalanche.



**1 Principe d'un ouvrage en déblai-remblai, dans le cas d'une étanchéité d'ensemble de la cuvette par géomembrane**



ouvrage de génie civil dont la rupture impacterait lourdement les populations. Pour atteindre un tel objectif, il convient, dès les études préliminaires d'un projet, de rechercher et évaluer précisément les sites pouvant potentiellement accueillir la retenue :

- d'y étudier les aléas naturels spécifiques aux zones de montagne ;
- d'analyser les conséquences sur les zones en aval en cas de défaillance du futur ouvrage.

Le guide « Retenues d'altitude » propose des réponses aux questions d'évaluation des sites, d'analyse des aléas et d'étude d'onde de submersion. Les principes généraux distinguent :

- les petits ouvrages de classe géométrique D sans enjeux aval. Pour ces ouvrages, on vise *a minima* une protection face à des scénarios de projet de fréquence 1/100 à 1/500. Pour des fréquences plus exceptionnelles, le propriétaire conseillé par son maître d'œuvre peut admettre que l'ouvrage subisse des endommagements potentiellement lourds qui nécessiteraient des travaux de réparation ;
- les ouvrages de moyenne à grande taille, de classes géométriques C, B et A, ainsi que les petits ouvrages de classe D avec enjeux aval. Pour ces ouvrages, une étude par un expert est nécessaire pour évaluer la nature et les caractéristiques des phénomènes suscep-

tibles d'impacter la retenue et/ou les ouvrages, ainsi que la fréquence et les conséquences des phénomènes envisagés selon une approche par scénarios. Le principe est ici de ne retenir que des sites d'implantation présentant un niveau d'aléa très faible.

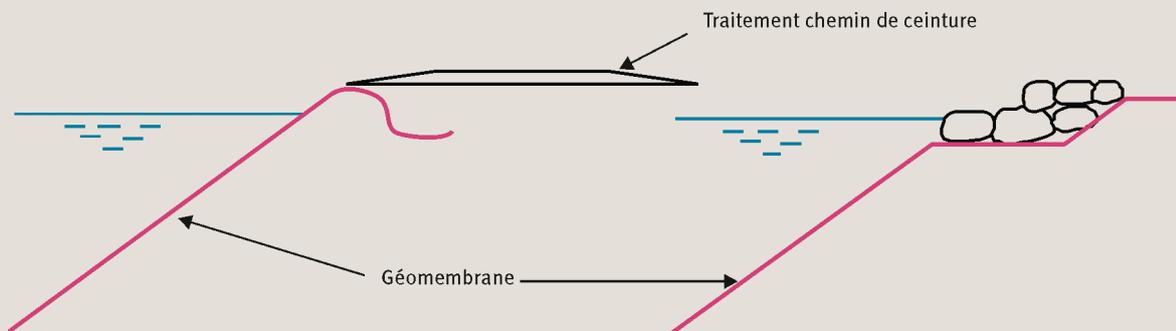
Ce principe est décliné en deux règles :

- les retenues seront implantées sur des sites dont la probabilité annuelle d'atteinte par un phénomène potentiellement dommageable est extrêmement faible. Pour fixer un ordre de grandeur, on vise une probabilité de l'ordre de 1/1 000 à 1/10 000 ;
- si l'extrême faiblesse de cette probabilité annuelle d'atteinte ne peut être complètement établie, on peut néanmoins admettre une implantation sur le site en question, à condition de respecter la double condition suivante :
  - la probabilité que le site soit atteint par un phénomène gravitaire potentiellement dommageable est en tout état de cause inférieure à 1/100 ;
  - l'objectif de protection de la retenue (probabilité d'atteinte de l'ordre de 1/1 000 à 1/10 000) est obtenu par la mise en œuvre d'ouvrages et éventuellement d'autres mesures de protection (paravalanches, par exemple, couplés ou non à une revanche\* assurant la sécurité pour le run-up\* ou à des mesures de défense temporaire). On admet que ces ouvrages de protection

**1 Valeurs indicatives des pentes des talus maximaux d'un barrage en terre en matériaux grossiers sur fondation non compressible**

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

## 2 Ancrage d'une géomembrane non recouverte pour améliorer l'aspect paysager lorsque la retenue est pleine (sans risberme à mi-hauteur du talus intérieur)



► soient dimensionnés par approche experte, en adoptant des marges et des coefficients de sécurité adéquats, qui prennent en compte les nombreuses incertitudes liées au caractère partiel des connaissances sur les phénomènes en cause et les perturbations telles que le blocage du chenal d'écoulement par des corps flottants, induisant un débordement ponctuel.

### Une conception générale en déblai-remblai

La conception classique des retenues d'altitude en montagne est une conception en déblai-remblai. En connaissance du volume d'eau souhaité pour la retenue, le concepteur dessine l'ouvrage qui comporte généralement des déblais prélevés dans la cuvette et des remblais édifiés à partir des déblais (figure 1).

Les remblais des retenues d'altitude sont construits selon la méthode du remblai excédentaire : on compacte une largeur plus grande que celle du profil du projet, puis on rabotte les deux faces, mal compactées.

Les pentes des talus amont du remblai doivent être dimensionnées en fonction de la présence du DEG et de son recouvrement éventuel. Dans le cas d'un DEG recouvert, cette considération est généralement celle qui conduit au choix de la pente amont. En outre, les pentes des deux talus doivent aussi être dimensionnées en fonction des caractéristiques du matériau utilisé en remblai, de la qualité de la fondation, de la hauteur, et de la position de la zone saturée.

Ce dimensionnement s'effectue dans le cadre de l'analyse de stabilité. On peut donner quelques valeurs indicatives de pentes (tableau 1) qui peuvent être utilisées uniquement lors des études d'avant-projet pour établir un prédimensionnement. Ces valeurs doivent être confirmées ensuite au niveau des études de projet sur la base d'essais de laboratoire et de calculs de stabilité.

On note en particulier que les pentes recommandées sont au plus égales à 1/2. Des talus en terre dont la pente est de l'ordre de 2/3 ne sont pas stables à long terme ou sont en stabilité limite.

Certains concepteurs prévoient une risberme sur le talus amont, afin de permettre la mise en place de matériaux de couverture sur la partie supérieure de la géomembrane. Ce parti présente de nombreux inconvénients liés au blocage de couches de glace, à l'entraînement possible de blocs rocheux et à des difficultés pour la continuité du drainage. La mise en place d'une risberme n'est donc pas recommandée. Toutefois, des considérations paysagères peuvent conduire à recouvrir la partie haute par des enrochements, mais placés alors très légèrement au-dessous de la cote normale d'exploitation et jusqu'à la crête (figure 2). Une telle conception est satisfaisante et peut être complétée en fonctionnement en maintenant le niveau d'eau sous les enrochements en exploitation hivernale.

### Attention au drainage du remblai

Le drainage des barrages d'altitude est un aspect essentiel de la sécurité de ces ouvrages étanchés artificiellement. Le dispositif de drainage d'un barrage d'altitude doit permettre :

- la stabilité du DEG,
- la stabilité du remblai proprement dit.

Pour le premier objectif, nous renvoyons le lecteur vers Girard *et al.* (2009). Pour le deuxième objectif, le remblai doit être doté d'un dispositif de drainage permettant d'évacuer d'éventuels écoulements provoqués par des endommagements plus ou moins importants de la géomembrane du talus amont, de manière à protéger le remblai des mécanismes d'érosion interne ou de glissement du talus aval. Les recommandations de conception du drainage du remblai sont les suivantes, selon l'importance de l'ouvrage.

- Pour les retenues d'altitude de classes géométriques A, B et C à forts enjeux, la géomembrane doit être entièrement recouverte. On envisage donc des endommagements ponctuels et localisés de la géomembrane et le concepteur doit faire en sorte que les débits de fuite liés à de telles défaillances puissent être drainés par l'ouvrage. Les barrages d'altitude sont constitués généralement en

matériaux semi-perméables et le concepteur doit alors prévoir un système spécifique de drainage du remblai. Deux types de conception sont envisageables :

- un drain granulaire épais placé en sous-face de la géomembrane et raccordé à l'aval par l'intermédiaire d'un drain tapis ou d'un réseau de collecteurs (figure 3a). Ce drain granulaire, qui constitue également le drain du DEG, doit être dimensionné pour collecter les fuites d'une défaillance localisée de la géomembrane ;

- un drain vertical classique placé au sein du corps du remblai et raccordé à un drain tapis ou d'un réseau de collecteurs (figure 3b). Dans cette configuration, il y a deux drains : un drain du DEG géosynthétique\* (ou granulaire) sous la géomembrane et un drain granulaire vertical dans le remblai.

- Pour les petites retenues d'altitude de classes C et D sans forts enjeux, on peut admettre que le drain du remblai soit celui du DEG. Ce dispositif de drainage est destiné à collecter les fuites liées à la défaillance de la géomembrane :

- lorsque la retenue est conçue avec une géomembrane non recouverte, le dispositif de drainage doit permettre la protection du remblai contre les fuites provoquées par un effacement complet de la géomembrane sur un profil du remblai (déchirure de haut en bas sur le profil considéré). Si ce n'est pas le cas, le dimensionnement de l'ouvrage et sa justification de stabilité doivent prendre en compte cet effacement complet de la géomembrane sur un profil du remblai et la capacité du dispositif de drainage, pour déterminer les conditions de saturation du remblai ;
- lorsque la retenue est conçue avec une géomembrane recouverte, le dispositif de drainage doit permettre la protection du remblai contre les fuites provoquées par des endommagements ponctuels et localisés de la géomembrane.

### La nécessité d'une surveillance et d'une exploitation de qualité

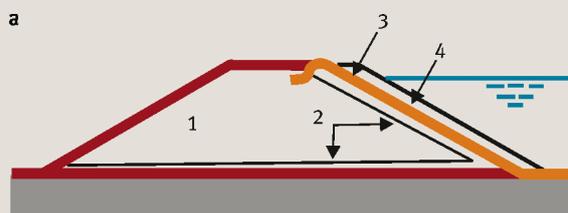
La surveillance d'un barrage comprend l'examen visuel et l'auscultation.

La surveillance des retenues d'altitude est réalisée par les agents d'exploitation qui ont en charge leur gestion. Il s'agit de personnes très sensibilisées aux questions de risques, étant confrontées dans la pratique quotidienne de leur activité en montagne à des situations à risques, et donc très demandeuses de conseils et recommandations pour la surveillance des retenues d'altitude.

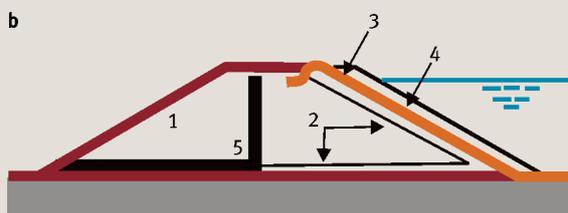
La surveillance visuelle satisfaisante d'une retenue d'altitude comprend des visites tout le long de l'année, à périodicité minimale bimensuelle, concerne tous les ouvrages et équipements de l'installation et doit s'étendre à l'environnement de la retenue (notamment pour les sites soumis à aléas naturels de montagne). Le retour d'expérience montre que seulement 40 % des retenues d'altitude sont correctement surveillées selon ces principes, du fait essentiellement de leur méconnaissance.

Les barrages sont équipés d'instruments d'auscultation permettant leur suivi et l'auscultation prévoit des relevés réguliers des instruments et l'analyse des mesures à travers

### 3 Principes du système de drainage des retenues d'altitude importantes



- 1 Remblai semi perméable
- 2 Drain granulaire épais
- 3 Géomembrane
- 4 Recouvrement



- 1 Remblai semi perméable
- 2 Drain géosynthétique (ou granulaire) et son dispositif d'évacuation
- 3 Géomembrane
- 4 Recouvrement
- 5 Drain granulaire

un rapport d'auscultation. Le retour d'expérience sur les retenues d'altitude montre que la majorité des retenues (60 %) font l'objet d'un suivi d'auscultation adapté (mesure de la cote du plan d'eau et des débits de drainage), laissant néanmoins quelque 40 % sans suivi régulier. Mais, parmi les retenues auscultées régulièrement, seulement 15 % font l'objet d'une analyse et d'un rapport d'auscultation. Le guide « Retenues d'altitude » donne les règles de l'art relatives à la conception du dispositif d'auscultation à prévoir dès la phase projet pour les retenues d'altitude en fonction de leur taille. Il développe également les recommandations concernant la surveillance, l'exploitation et l'entretien des barrages en service, en se conformant à la récente réglementation (décret du 11/12/2007 et arrêté du 29/2/2008) qui a renforcé les obligations des propriétaires sur ces questions. Il donne des conseils pour équiper les retenues d'altitude insuffisamment auscultées par un dispositif adéquat.

Le retour d'expérience a mis en évidence de grandes familles de défauts et de pathologies. Le guide traite ces défauts et pathologies. Il propose des mesures et techniques correctives relevant de la surveillance et de l'exploitation, pouvant conduire à des actions structurelles, dépendant de la nature de la défaillance et, surtout, de la conception de l'ouvrage lui-même. Les principales pathologies et défauts traités concernent les questions d'endommagements de la géomem-

▶ brane, des évacuateurs de crues sous-dimensionnés, la surveillance des instabilités du corps du remblai ou d'érosion interne.

## Conclusion

La montagne est un territoire à part, marqué par de fortes spécificités, d'étroites et complexes imbrications entre un milieu exceptionnel et les activités humaines. En montagne, il faut toujours, non seulement beaucoup d'énergie et des capacités d'adaptation et d'innovation, mais également des réglementations et des modalités d'application particulières. Les retenues d'altitude correspondent pleinement à cette réalité compliquée, et le guide « Retenues d'altitude » de recommandations répond à ce besoin.

Ce guide a été réalisé, sur une période de deux années, par une équipe pluridisciplinaire composée de plusieurs ingénieurs-chercheurs du Cemagref, relevant de différentes unités de recherche, et d'experts d'EDF\* (Électricité de France) et du bureau d'études ISL. Les différentes disciplines et champs de compétence rentrant dans ce travail collectif sont l'écologie, l'hydrologie, l'hydraulique, les risques naturels de montagne, la géologie, la géotechnique et le génie civil.

Ce guide a bénéficié de nombreuses expertises extérieures, relevant de l'administration, de bureaux spécialisés ou encore d'experts indépendants. Il a associé étroitement les professionnels de cette activité : l'ingénierie des barrages à travers la participation du Comité français des barrages et réservoirs au comité de pilotage, l'ingénierie des barrages d'altitude à travers la contribution du bureau ABEST et l'expertise technique approfondie du Syndicat national des téléphériques de France. En ce sens, nous avons eu la volonté d'associer aux différentes étapes du projet les professionnels du domaine, de manière à ce que ce guide ait un rayonnement optimal.

L'élaboration de ce guide a bénéficié du concours financier du ministère chargé de l'écologie et du développement durable, de la délégation interministérielle à l'aménagement et à la compétitivité des territoires et du conseil régional Provence-Alpes-Côte d'Azur.

En s'adressant principalement aux propriétaires et exploitants ainsi qu'aux bureaux d'études intervenant dans les différents domaines des retenues d'altitude, ce guide de recommandations replace les retenues d'altitudes dans leur contexte montagnard, avec tout ce que cela implique en terme de conséquences dans le choix du site, la réalisation, la surveillance ou l'identification de pro-

blèmes dans les ouvrages déjà en service qui pourraient générer des risques importants, ainsi que dans l'impact sur l'environnement souvent très sensible de ces zones et dans le cadre de la prévention des risques. ■

## Les auteurs

### Laurent Peyras

Cemagref, centre d'Aix-en-Provence,  
GR OHAX, Ouvrages hydrauliques,  
3275 route de Cézanne, CS 40061, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5  
laurent.peyras@cemagref.fr

### Patrice Mériaux

Cemagref, centre d'Aix-en-Provence,  
GR OHAX, Ouvrages hydrauliques,  
3275 route de Cézanne, CS 40061, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5  
patrice.meriaux@cemagref.fr

### Gérard Degoutte

Cemagref, centre d'Aix-en-Provence,  
GR OHAX, Ouvrages hydrauliques,  
3275 route de Cézanne, CS 40061, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5  
gerard.degoutte@cemagref.fr

### Luc Deroo

ISL, Bureau d'ingénieurs conseil,  
75 bd MacDonald, 75019 Paris  
deroo@isl.fr

### André Évette

Cemagref, centre de Grenoble, UR EMGR,  
Écosystèmes montagnards,  
2 rue de la Papeterie, BP 76, 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex  
andre.evette@cemagref.fr

### Hugues Girard

Cemagref, centre de Bordeaux,  
UR REBX, Réseaux, épuration et qualité des eaux,  
50 avenue de Verdun, Gazinet, 33612 Cestas Cedex  
hugues.girard@cemagref.fr

### Dominique Laigle

Cemagref, centre de Grenoble,  
UR ETGR, Érosion torrentielle, neige et avalanches,  
2 rue de la Papeterie, BP 76, 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex  
dominique.laigle@cemagref.fr

### Marc Lefranc

Électricité de France,  
CIH, Centre d'ingénierie hydraulique,  
15 avenue du Lac du Bourget,  
Savoie Technolac,  
73373 Le Bourget le Lac Cedex  
marc.lefranc@edf.fr

## QUELQUES RÉFÉRENCES CLÉS...

- 📖 GIRARD, H., PEYRAS, L., MERIAUX, P., DEGOUTTE, G., DEROO, L., LEFRANC, M., 2009, Dispositifs d'étanchéité par géomembrane des retenues d'altitude : retour d'expérience et recommandations, *in : Rencontres Géosynthétiques 2009*, Nantes 2 et 3 avril 2009, 10 p.
- 📖 AFSSET, 2008, *Évaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation d'adjuvants pour la fabrication de la neige de culture*, Rapport « Risques sanitaires neige de culture – Snomax® », avril 2008.
- 📖 MERIAUX, P., DEGOUTTE, G., GIRARD, H., PEYRAS, L., 2006, Sécurité et pathologie des barrages pour la production de neige de culture : premiers retours d'expérience, *Ingénieries-EAT*, numéro spécial Géosynthétiques, p. 69-76.