



HAL
open science

Risques et impacts environnementaux des retenues d'altitude pour la production de neige de culture dans un contexte de changement climatique

A. Evette, L. Peyras, H. François, S. Gaucherand

► **To cite this version:**

A. Evette, L. Peyras, H. François, S. Gaucherand. Risques et impacts environnementaux des retenues d'altitude pour la production de neige de culture dans un contexte de changement climatique. *Revue de Géographie Alpine / Journal of Alpine Research*, 2011, 99 (3), 13 p. hal-00631571

HAL Id: hal-00631571

<https://hal.science/hal-00631571>

Submitted on 12 Oct 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Risques et impacts environnementaux des retenues d'altitude pour la production de neige de culture dans un contexte de changement climatique

Environmental risks and impacts of mountain reservoirs for artificial snow production under climate change context

Auteurs : André Evette(1), Laurent Peyras(2), Hugues François(3) ; Stéphanie Gaucherand(1)

(1) UR EMGR, Cemagref de Grenoble, (2) UR DTGR, Cemagref de Grenoble, (3) UR OHAX, Cemagref d'Aix en Provence

Résumé

Les retenues d'altitudes sont des ouvrages hydrauliques implantés dans les stations de loisirs de montagne et destinés à créer une réserve d'eau, dédiée principalement à la production de neige de culture. Leur implantation en altitude en fait indubitablement des retenues spécifiques, subissant et induisant des risques et des impacts sur leur environnement anthropique et écologique. Le Cemagref a engagé un projet de recherche sur la sûreté des retenues d'altitude. Le présent article est issu de ces travaux et vise à établir un état des lieux des risques liés aux retenues d'altitude et de leurs impacts sur l'environnement. Il replace le développement des retenues d'altitude dans leurs contextes sociétal, social et environnemental. Il développe ensuite les risques et impacts des retenues d'altitude, en focalisant son analyse sur les différents risques et aléas spécifiques auxquels sont exposés les ouvrages, et sur les différents impacts environnementaux liés à la réalisation et la gestion des retenues.

Mountain reservoirs are hydraulic structures implanted in recreational mountain resorts designed to provide a water reserve mainly used for the production of artificial snow. Their implantation in high-altitude zones makes them highly specific reservoirs subjected to and inducing risks and impacts on their human and ecological environment. Based on in-depth bibliographic and field research, Cemagref has launched a study on mountain reservoirs. The present article aims to establish the current state of the risks related to mountain reservoirs and their impacts on the environment, placing the development of mountain reservoirs in their societal, social, and environmental contexts. It will then develop mountain reservoir risks and impacts, focusing on the specific risks and uncertainties to which these structures are exposed, and the different environmental impacts related to the construction and management of these reservoirs.

Mots clés : retenues d'altitude, neige de culture, stations de sport d'hiver, risques, impacts environnementaux

Introduction

Les retenues d'altitudes sont des ouvrages hydrauliques implantés dans les stations de loisirs de montagne et destinés à créer une réserve d'eau, dédiée principalement à la production de neige de culture. L'implantation de ces ouvrages en montagne, entre 1200 m et 3000 m d'altitude en fait indubitablement des retenues particulières par rapport aux retenues de plaine. En effet, cette situation entraîne des difficultés spécifiques, en raison de contextes géologiques et géotechniques complexes (pente, variété des substrats,...), des aléas spécifiques à la montagne (avalanches, laves torrentielles,...), et des sollicitations intenses dues à la neige et au froid. D'un point de vue écologique, ces retenues sont implantées sur des milieux très riches, mais aussi très fragiles. Compte tenu de leur position dominante au-dessus des installations à forte fréquentation et des fortes pentes des versants susceptibles de générer la formation de phénomènes torrentiels en cas de rupture, les retenues d'altitude génèrent des risques potentiellement importants, et ce malgré des volumes d'eau stockés modestes.

Le parc français des retenues d'altitude a connu un essor important depuis le début des années 2000, atteignant en 2008 quelques 105 ouvrages de capacité supérieure à 10 000 m³. On prévoit au cours des 10 à 20 prochaines années un accroissement considérable du nombre des retenues d'altitude et la tendance constatée est une augmentation sensible de la taille des ouvrages qui passe de 40 000 m³ en moyenne actuellement à 100 000 m³ sur les nouveaux projets (Peyras et al., 2009).

D'autres pays européens du massif alpin, tels que la Suisse, l'Autriche et l'Italie, connaissent des problématiques analogues en matière de risques et d'impacts de retenues d'altitudes (Ancey C, 2009). Toutefois, il est à noter que les questions soulevées par les retenues d'altitude ont fait l'objet de peu d'études et que les publications scientifiques ou techniques disponibles en France et à l'international sont quasiment inexistantes.

Faisant suite à différentes questions techniques et écologiques posées par des administrations et organismes professionnels de la montagne en France autour des retenues d'altitude, le Cemagref a engagé un projet de recherche et développement visant à capitaliser le retour d'expérience sur ces ouvrages dans les différents champs disciplinaires concernés et à poser des recommandations techniques en matière d'ingénierie technique et de respect de l'environnement. Ce projet de recherche et développement, intitulé BARALTISUR (Sûreté des barrages d'altitude), s'est déroulé sur deux années entre 2007 et 2008. Il a été financé par le ministère de l'Écologie dans le cadre du programme de recherche Risque Décision Territoire (RDT), par le Délégation interministérielle à l'aménagement et à la compétitivité des territoires et par la Région PACA. Ce projet a été mené par une équipe-projet multidisciplinaire qui comprend des ingénieurs et chercheurs du Cemagref, d'EDF et du bureau d'ingénierie ISL. Il a abouti à la rédaction d'un guide de recommandations sur le choix du site, la conception, la réalisation et la gestion des retenues (Peyras et al., 2009).

Ce travail a conduit en 2007 à des enquêtes approfondies, documentaires et de terrain, sur le parc de retenues d'altitude des massifs alpin et pyrénéen (Evette et al., 2009). Les ouvrages examinés ont fait l'objet de différentes investigations : analyse des études de conception du dossier de l'ouvrage (impacts environnementaux, risques pour la sécurité publique, hydrologie, aléas de montagne, dossiers techniques, etc.), visite détaillée et parfois des expertises approfondies. Ce sont au total quelque 65 ouvrages qui ont été ainsi examinés, ce qui a permis de rassembler une importante quantité d'informations sur la conception, l'état, le comportement, les incidents, l'exploitation et la surveillance des retenues d'altitude. L'enquête a également porté sur la prise en compte des impacts environnementaux dans les

notices et études d'impacts réalisées en phase de conception des retenues d'altitude. Elle les a également observé sur site lors des investigations de terrain.

Cet article vise à établir un état des lieux détaillé des risques et des impacts sur l'environnement liés aux retenues d'altitude en France de manière à dresser un panorama complet dans ce domaine. Tout d'abord il replace le développement des retenues d'altitude dans leurs contextes sociétal, social et environnemental : il pose le cadre historique et actuel du développement économique des stations de loisir et il étudie l'influence du changement climatique sur les conditions d'enneigement. L'article développe ensuite les risques et impacts des retenues d'altitude : il établit une présentation technique du parc français des retenues d'altitude, il analyse les différents risques et aléas spécifiques auxquels sont exposés ces ouvrages et développe les différents impacts environnementaux liés à la réalisation et la gestion des retenues.

L'enneigement : une question centrale de l'aménagement des stations

Le fort développement des stations de sports d'hiver françaises s'inscrit dans une dynamique d'aménagement du territoire encourageant la diffusion d'un modèle de station dite de Troisième génération selon la typologie de Cumin (1970). La représentation des générations successives de stations constitue en tant que tel un témoignage de l'approche normative portée par les services de l'Etat, principalement la CIATM et le SEATM¹. En effet, ce que l'on désigne généralement comme le "Plan neige" n'a pas d'existence réelle au sens traditionnel de la planification mais désigne plutôt un effort des pouvoirs publics pour équiper de nouveaux sites d'altitude sur la base d'une véritable doctrine d'aménagement du territoire (Knafou, 1978 ; François, 2007).

La dynamique d'aménagement touristique de la montagne fut, et demeure pour partie, soumise à de fortes tensions et la question de l'enneigement va rapidement prendre une place prépondérante dans les débats. En effet, l'efficacité de l'allocation des crédits publics dans les stations en site vierge constituait un facteur premier de justification d'une politique par ailleurs conflictuelle, comme en témoignaient les conflits locaux résultant des expropriations (entre autres celui qui a opposé une partie de la population d'Hauteville-Gondon et la Société des Montagnes de l'Arc, lors de la construction de la station des Arcs) ou le développement d'une critique environnementale à l'échelle nationale (notamment, "l'Affaire de la Vanoise" qui a éclaté lors de l'aménagement de Val Thorens). Corollairement à l'affirmation de la supériorité des stations de troisième génération, l'apparition de modes de développement alternatifs du tourisme montagnard fut l'objet de nombreuses critiques. Les hivers "sans neige" des saisons 89/90 et 90/91 ont joué un rôle central et mis en évidence les limites générales des stations de sports d'hiver comme outils d'aménagement du territoire.

Dans le contexte du changement climatique, le rapport de l'OCDE (2007) a tiré la sonnette d'alarme en distinguant des sites dont l'enneigement paraît plus pérenne de ceux directement menacés, notamment en fonction de leur altitude. En outre, les hivers sans neige ont contribué à sensibiliser le grand public, potentiellement touristes, à la question de l'ouverture des domaines skiables qui devient un facteur crucial de la fréquentation des stations. Deux trajectoires se dessinent donc distinguant les stations d'altitude tournées principalement vers

¹ Suite à l'expérience de Courchevel à laquelle elle a fortement contribué, les travaux de la cellule chambérienne de l'administration de l'Équipement se voient encadrés, à partir de 1964, par la Commission Interministérielle d'Aménagement Touristique de la Montagne (CIATM) dont elle devient le service technique. Cette cellule sera ensuite institutionnalisée par la création en 1971 du Service d'Études et d'Aménagement Touristique de la Montagne (SEATM, aujourd'hui devenu la DEATM, Direction au sein du GIE Atout France)

le ski alpin qui poursuivent leur logique d'équipement en apportant des réponses techniques aux déficits d'enneigement, et les stations qualifiées de « moyennes » plutôt orientées sur la voie de la diversification de l'offre touristique (politiques successives de contractualisation des stations avec la Région Rhône-Alpes et telles qu'elles se déclinent en Contrat de Développement Diversifié en Isère ou en Plan Tourisme pour ce qui concerne la Savoie). La mise en œuvre du système d'assurance "Nivalliance" mis en place par le SNTF, s'il permet une certaine solidarité inter-stations, reconnaît également la fracture entre les modes de développement des stations.

De fait, il existe bel et bien un écart entre types de stations, ne serait-ce que vis-à-vis de leur capacité à dégager un excédent de la seule exploitation des remontées mécaniques pour le réinvestir, notamment dans des équipements d'enneigement artificiel. Fortes de la rationalité technique qui a présidé à leur conception, les stations d'altitude maintiennent une logique que certains collectifs pour la défense de l'environnement qualifient, de "course à l'or blanc". La croissance des investissements dédiés à la production de neige contribue à relancer le débat quant à l'impact environnemental des stations. Dans un contexte d'affirmation du développement durable auprès du grand public (cf. Eco-guide des stations, et la Charte de développement durable des stations de montagne ou encore, la "guerre des mots" – neige de culture vs neige artificielle, "enneigeurs" vs canon à neiges ou encore la mise en avant des composants naturels de la neige "de production", air et eau, vs la possibilité d'utiliser des adjuvants tels que le Snomax – qui oppose exploitants et écologistes), l'encadrement des pratiques visant à garantir l'ouverture du domaine skiable devient un facteur sensible.

Les pratiques de prélèvements de la ressource en eau sont plus particulièrement pointées du doigt dans la continuité des critiques adressées à l'urbanisation et aux flux concentrés de touristes. Puiser directement dans les cours d'eau peut ainsi donner une image négative de l'activité liée à la station. En outre, cela pose la question de la disponibilité en période d'étiage et renforce les contraintes liées à l'obligation légale de respecter les débits réservés des torrents. Les marges de manœuvre que représente l'usage de l'eau potable peuvent également avoir un impact négatif pour l'image des stations eu égard à la rareté de la ressource. Surtout, cette solution s'avère assez paradoxale en permettant l'ouverture d'un domaine skiable (avec augmentation de la production de neige) dont l'exploitation est tributaire de la capacité d'accueillir des touristes (avec accroissement de la consommation d'eau potable). Au regard de ces pratiques, les exploitants défendent une gestion raisonnée visant à "stocker la ressource quand elle est présente en abondance afin de la restituer quand elle vient à manquer" (ANEM, 2007) et mettent en avant « les talents insoupçonnés de la neige de culture »². Cette logique ne traite qu'une partie de la réalité de l'impact des retenues d'altitude et de leur multiplication.

Un enneigement de plus en plus incertain avec le changement climatique

Les conditions d'enneigement dans les stations d'altitude apparaissent de plus en plus incertaines en raison du changement climatique. Ainsi, certains auteurs prédisent que sous un climat plus chaud, la limite des neiges, ainsi que la limite de la fiabilité de l'enneigement naturel, monteraient de 150 mètres par degré Celsius gagné (IPCC, 2007; OECD, 2007).

Une équipe de chercheurs suisses a étudié l'impact probable d'un réchauffement moyen de 4°C sur la couverture neigeuse. Un tel réchauffement de 4°C se situe plutôt dans la fourchette haute des prédictions pour 2100 des modèles présentés par le GIEC (IPCC, 2007). Cette étude

² Cf la campagne du SNTF : <http://www.lamontagneenmouvement.com/>

suisse conclut que ce réchauffement entraînerait une diminution du volume de la neige dans les Alpes de 90 % à 1000 mètres, de 50 % à 2000 mètres et de 35 % à 3000 mètres. De plus, la durée d'enneigement serait sévèrement réduite, se terminant 50 à 60 jours plus tôt à haute altitude (au dessus de 2000/2500 mètres) et de 100 à 130 jours plus tôt à des altitudes moyennes proches de 1000 mètres (Beniston et al., 2003).

Enfin, en ce qui concerne l'activité ski, une étude de l'OCDE prévoit qu'une augmentation de la température de 2°C ramènerait le nombre de domaines skiables disposant d'un enneigement naturel fiable à seulement 80 % environ du total actuel dans les départements de Savoie, des Hautes Alpes et des Alpes de Haute Provence (départements où se trouvent les domaines les plus élevés). Toutefois si la température augmentait de 4°C, ce pourcentage tomberait à 71 % en Savoie, 33 % dans les Hautes Alpes et 10 % dans les Alpes de Haute Provence (OECD, 2007).

La réduction probable des durées d'enneigement avec le changement climatique, leur impact important sur l'activité ski et sur une augmentation de la production de neige de culture sont également relevés sur d'autres parties du globe, qu'il s'agisse par exemple des Etats Unis (Scott et al., 2006) ou de l'Australie (Good, 1995).

Le parc des retenues d'altitude en France et ses principales caractéristiques techniques

Le parc des retenues d'altitude en France est composé en 2008 de quelque 105 ouvrages de plus de 10 000 m³ sur les massifs Alpin (85 %) et Pyrénéen (15 %), sachant que les autres massifs montagneux français (Jura, Vosges et Massif Central) comptent environ une dizaine de retenues d'altitude. Ce parc est en pleine expansion puisqu'on compte en 2008 environ 30 retenues en projet ou en cours d'instruction administrative (Peyras et al., 2009).

Les retenues d'altitude sont pour la quasi-totalité des barrages en remblai. Elles présentent des spécificités techniques propres, dont les deux principales suivantes. Tout d'abord, compte tenu des conditions topographiques de la montagne, elles sont implantées sur des zones de replat et le plus souvent ne ferment pas un talweg ; en conséquence, elles sont en général conçues en déblai-remblai, comme un bassin, avec un remblai les ceinturant partiellement.

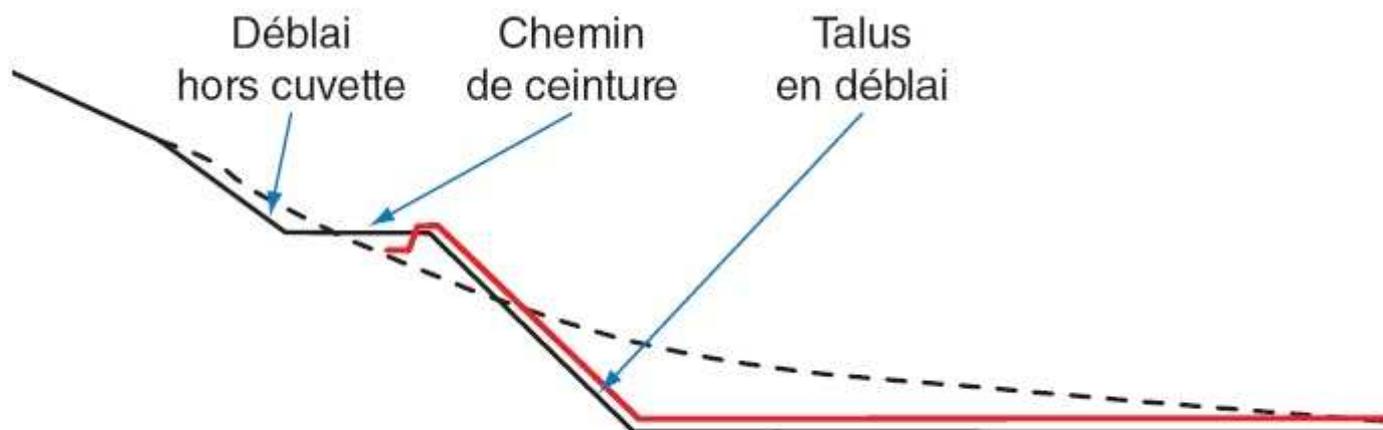


Figure 1 : Principe de la conception en déblai-remblai d'une retenue d'altitude avec une étanchéité d'ensemble de la cuvette avec géomembrane

Ensuite, la géologie des sites de montagne conduit à 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 %). De fait, elles sont très souvent étanchées artificiellement par géomembrane sur l'ensemble de leur cuvette (85 %).

Ces barrages ont majoritairement (65 %) des hauteurs modestes de remblai comprises entre 5 et 10 m au-dessus du terrain naturel et 20 % des retenues sont de très petits ouvrages inférieurs à 5 m de hauteur. On note toutefois que 15 % de ces ouvrages sont des remblais de grandes hauteurs supérieures à 10 m.

Les remblais sont réalisés avec les gisements de matériaux disponibles et extraits sur le site d'implantation. Ils sont constitués majoritairement (60 %) de moraines et de schistes. A un moindre niveau, on rencontre des remblais en matériaux limoneux et en enrochements issus principalement de quartzites, de gneiss et de calcaires.

Le volume d'eau moyen stocké est d'environ 40 000 m³, avec toutefois une forte augmentation des volumes sur les ouvrages en projet ou en cours d'instruction, pour lesquels la moyenne s'élève à environ 100 000 m³.

Au regard de leur situation administrative (décret sur la sécurité hydraulique du 11/12/2007), les retenues d'altitude se répartissent équitablement entre les classes D et C et une minorité (10 %) se situe en classe B. Les futures retenues en projet devraient infléchir sensiblement cette répartition entre les classes.

50 % de ces retenues sont implantés entre 1500 et 2000 m d'altitude, 30 % sous la cote de 1500 m et 20 % au-dessus de 2000 m. Les futurs projets montrent une forte diminution des implantations à altitude modérée inférieure à 1500 m.

Des ouvrages soumis à des aléas spécifiques à la montagne et des risques sur la sécurité publique 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, 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.

Dans le détail, les expositions aux avalanches, aux aléas torrentiels et aux aléas géologiques se répartissent de la façon suivante :

- environ 20 % des retenues sont implantés sur des sites à aléa avalancheux avéré. La moitié d'entre elles est soumise à un aléa fort. Pour certaines de ces retenues, des ouvrages de protection contre ces aléas (tourne, étrave, etc.) ont été prévus et prennent généralement en compte les événements courants à modérément puissants.



Figure 2 – Retenue d'altitude impactée par une avalanche (crédit : Cemagref)

- une retenue sur deux est soumise à un aléa torrentiel, et environ une sur trois est soumise à un aléa fort.



Figure 3 – Retenue soumise à un risque torrentiel avéré (crédit : Cemagref)

- un quart des retenues est soumis à un aléa géologique modéré à fort, se répartissant dans l'ordre de fréquence entre les risques de chutes de blocs, les instabilités souterraines, les écoulements de masse et les glissements de terrain.

En cas d'impact de la retenue par l'un de ces phénomènes, une expulsion très rapide du volume d'eau stocké dans la retenue peut se produire et provoquer une onde de submersion se propageant vers les zones en aval. En définitive, l'enquête a montré 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 (Peyras et al., 2009) : (i) leur position dominante au-dessus d'installations à forte fréquentation touristique ou des zones résidentielles de station de ski ; (ii) les pentes fortes et des formations géologiques de versant qui sont susceptibles de générer des phénomènes torrentiels (charriages ou laves torrentiels) en cas de largage de débits importants, pouvant aggraver sensiblement le pouvoir destructeur de l'accident ; (iii) la proximité entre retenue et enjeux aval et des délais d'arrivée d'une onde de rupture extrêmement réduits.



Figure 4 – Retenue d’altitude surplombant des enjeux (crédit : F. Dinger, Cemagref)

Impacts sur l’environnement des retenues d’altitude

L’implantation et la gestion des retenues d’altitude génèrent des impacts sur les milieux alpins et subalpins, qu’ils soient terrestres ou aquatiques. Ces milieux présentent une richesse spécifique très élevée ; ainsi, dans un carré de 100 km de côté, les Alpes recèlent notamment 2 à 3 000 espèces de plantes vasculaires (fougères, conifères et plantes à fleurs) (Aeschmann et al., 2004). Ces milieux présentent une fragilité particulière notamment liée à leur dynamique très lente. Ainsi toute dégradation va s’inscrire dans une durée plus longue qu’à de plus faibles altitudes et les dynamiques naturelles de reconstitution des sols et de recolonisation végétale peuvent s’étaler sur des décennies. Par ailleurs les espèces d’altitude font déjà face à une pression liée au changement climatique, par exemple, dans une étude menée sur 171 espèces forestières il a été montré une remontée des espèces d’environ 30 mètres par décennie (Lenoir et al., 2008).

Impacts sur les écoulements superficiels

Le besoin en eau pour la neige de culture est d’environ 3 à 4 000 m³ par hectare de piste, et les surfaces enneigées sont en augmentation (Marnezy, 2008). En 2008, 23 % des pistes étaient équipées en neige de culture, pour un prélèvement annuel dans le milieu estimé à 15 millions de mètres cubes d’eau (Paccard 2010). A titre de comparaison, cette proportion est de 70 % en Italie, de 59 % en Autriche et de 23 % en Suisse (Paccard 2010). Or en hiver, la ressource en eau est déjà fortement sollicitée par la demande en eau potable (De Jong et al.,

2008). L'exploitation classique des retenues d'altitude consiste généralement à constituer une réserve d'eau en été et en automne, à une période où l'impact des prélèvements sur les milieux aquatiques est le moins dommageable. Cependant, certaines retenues d'altitude sont remplies en continu en hiver, ou encore font l'objet de multiples remplissages en cours de saison. Dans ces situations, les impacts quantitatifs sur les torrents et écoulements superficiels peuvent être importants. En effet, les impacts les plus aigus correspondent aux prélèvements réalisés en période d'étiage hivernal, au cours de laquelle des prélèvements notables 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). Dans une étude présentée en 2002 par l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée- Corse, il était estimé que 61 % des prises d'eau pour l'enneigement automatique prélevaient moins de 10 % du débit d'étiage et 31 % prélevaient entre 10 et 50 % du débit d'étiage (Dugleux, 2002).

Impacts sur les zones humides et tourbières

Les retenues sont parfois directement construites sur des zones humides, l'enquête menée par le Cemagref a permis d'estimer qu'environ un tiers de ces ouvrages ont été installés sur des zones humides. Par ailleurs lors de la phase travaux, la circulation d'engins ou le stockage de matériaux sont également des impacts potentiels sur ces milieux. Mais au-delà de ces impacts directs sur ces milieux à très forte valeur patrimoniale, les retenues peuvent aussi agir indirectement. En effet, les tourbières et zones humides sont sous le contrôle naturel des conditions d'alimentation en eau, tant sur le plan qualitatif que quantitatif. La diminution des bassins versants d'alimentation est ainsi susceptible de conduire à des assèchements, ou encore des travaux de terrassement à l'amont de ces zones peuvent conduire au départ de fines et au colmatage des zones humides. On peut également noter le risque éventuel constitué par les fertilisants ou composts lors de la revégétalisation de talus ou piste en amont, ces derniers pouvant induire une modification des qualités physico-chimiques des eaux traversant les zones humides d'altitude qui sont généralement oligotrophes.



Figure 5 – Retenue partiellement construite sur une zone humide (crédit : Cemagref)

Impacts sur les eaux souterraines

Les réserves en eau des milieux d'altitude sont faibles et généralement limitées à des roches fracturées (De Jong et al., 2008). Par ailleurs, la forte perméabilité générale des sols de montagne et le caractère progressif du ruissellement à la fonte des neiges rendent les aquifères et donc les captages d'eau potable relativement vulnérables. L'eau qui alimente les retenues est issue d'eaux de surface et est ainsi plus minéralisée que les eaux météoriques. Ces eaux peuvent parfois être contaminées par des polluants issus d'activités humaines (assainissement, élevage...) (Dinger et al., 1995; Wipf et al., 2005). L'AFSSET considère ainsi que les pollutions de captages d'eau potable par une neige de culture issue d'une eau de mauvaise qualité microbiologique constituent un risque à ne pas écarter (AFSSET, 2008).

Impacts sur les milieux terrestres

Outre les impacts directs des retenues lors de leur implantation ou des travaux afférents, ces ouvrages ont également un effet indirect sur les milieux terrestres en ce qui concerne l'épandage de la neige de culture. En effet, comme on l'a vu, les eaux utilisées pour la neige de culture sont généralement plus chargées que les eaux météoriques ; ainsi, l'eau apporte des nutriments au milieu, lesquels peuvent être présents en quantité suffisante pour modifier à moyen terme la composition de la végétation sur les zones concernées. Pour illustrer ces propos, une étude menée par des scientifiques suisses a montré des modifications de la composition floristique des communautés végétales, une augmentation des espèces nitrophiles et des espèces des combes à neige et une diminution des poacées (Wipf et al., 2005). Cette même étude a montré que la diversité végétale était inférieure sur les pistes préparées que sur les prés avoisinants. On a par ailleurs parfois observé une pollution par hydrocarbures apportées par les canons à neige eux mêmes, principalement pour les canons de type « haute

pression » (Dinger et al., 1995). « Si l'on considère que la quantité de neige produite correspond à 300 litres d'eau par mètre carré et par saison, soit près d'un mètre de neige, on dépose sur la piste en même temps que la neige 0,1 gramme d'hydrocarbure par mètre carré ». Cette pollution aux hydrocarbures, lorsqu'elle a lieu, vient s'ajouter à celle apportée par les engins de damage.

Impacts paysagers

L'impact paysager peut être important, notamment en raison des terrassements et ouvrages qui peuvent apparaître comme des cicatrices sur les versants montagneux. Toutefois ces impacts peuvent être moindres notamment lorsque les retenues sont positionnées sur des terrains plats, (dans la mesure où ils ne sont pas occupés par des zones humides), que leur forme s'approche de celles de lacs naturels et que les talus sont revégétalisés (Peyras et al., 2009).

Impacts sur les activités humaines

Les impacts peuvent également affecter les activités pastorales et de loisirs notamment lors de la phase chantier en raison de la limitation des accès ou des poussières générées.

Conclusion

Cet article présente les risques et les impacts environnementaux liés à la construction de retenues d'altitude ainsi que les problèmes de gestion qu'elles soulèvent. Il souligne le contexte social originel et actuel du développement de l'activité de loisir en montagne. Il présente également quelques pistes de réflexion sur les conséquences possibles du réchauffement climatique en montagne (réduction probable des durées d'enneigement avec un impact important sur l'activité ski et une augmentation de la production de neige de culture).

Les retenues d'altitude sont des barrages de petites tailles (65 % des retenues ont une hauteur comprise entre 5 et 10 m) et stockant des volumes d'eau limités (volume moyen 40 000 m³). Malgré des dimensions modestes, l'enquête de retour d'expérience réalisée sur le parc de retenues d'altitude en France a montré qu'une retenue sur deux « intéresse la sécurité publique » au sens où la rupture ou l'expulsion brutale du volume d'eau stocké aurait des conséquences graves pour les personnes et les biens situés en aval. Cela est dû à leur position dominante au-dessus des installations et aux fortes pentes des versants susceptibles de générer des phénomènes torrentiels. En outre, les retenues d'altitude sont susceptibles d'être impactées par des aléas spécifiques à la montagne : les avalanches, les aléas géologiques, les aléas torrentiels. Le retour d'expérience montre que près d'une retenue sur deux est exposée à au moins un aléa de montagne ; en cas d'impact de la retenue par un de ces phénomènes, il peut se produire une expulsion très rapide du volume d'eau stocké dans la retenue.

Les milieux écologiques de montagne sont à la fois riches, mais aussi fragiles du fait de leur dynamique très lente. Les retenues d'altitude induisent des impacts importants sur ces milieux au moment de la construction des ouvrages, mais aussi lors de leur exploitation. Ainsi, en phase de construction, le retour d'expérience a montré qu'un tiers de ces ouvrages a été installé sur des zones humides, d'autres milieux à fort intérêt écologique sont également concernés avec des impacts sur des espèces protégées (animales ou végétales). En sus de ces impacts directs, des impacts indirects liés à la mise en suspension de sédiments ou à des modifications hydrologiques ont également été observés. En phase d'exploitation, les impacts potentiels concernent principalement les cours d'eau lors d'éventuels prélèvements en période d'étiage, ou de rejet de culot de vidange dans le milieu.

Des solutions existent pour minimiser les impacts environnementaux et les risques et sont décrites dans le livre « retenues d'altitude ». Sur les aspects des risques technologiques, les règles de l'art sont dorénavant établies dans ce guide de référence. En particulier, pour limiter les risques naturels, il est important de choisir des sites d'implantation présentant un niveau d'aléa très faible. Pour limiter les impacts environnementaux, le choix préalable du site d'implantation est également primordial, les principes en sont détaillés dans « Retenue d'altitude ». Il doit reposer sur une analyse comparative approfondie des différents sites potentiels, en prenant en compte tous les impacts potentiels, qu'il s'agisse des milieux terrestres, aquatiques, du paysage ou de l'occupation humaine. Enfin, il est important que les porteurs de projet consultent et associent, dès la phase des études préliminaires et du choix du site, les différents acteurs, les professionnels de la montagne, les bureaux d'études qualifiés et les administrations.

Bibliographie

AESCHIMANN D., LAUBER K., MOSER D.M., THEURILLAT J.P., 2004. - *Flora alpina*. Bern.

AFSSET, 2008. - *Evaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation d'adjuvants pour la fabrication de la neige de culture*. RAPPORT « risques sanitaires neige de culture - Snomax® ». Comité d'Experts Spécialisés « Evaluation des risques liés aux eaux et aux agents biologiques ».

ANCEY C. 2009. – *Rupture de barrage à forte pente* [en ligne], septembre 2009, disponible sur : <http://lhc.epfl.ch> (consulté le 19 mai 2011)

ANEM, 2007. - *Au-delà du changement climatique, les défis de l'avenir de la montagne*. le 23ème Congrès de l'ANEM, Paris.

BENISTON M., KELLER F., KOFFI B., GOYETTE S., 2003. – «Estimates of snow accumulation and volume in the Swiss Alps under changing climatic conditions». *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 76, n° 3-4, pp 125-140.

CUMIN G., 1970. - Les stations intégrées. *Urbanisme*, n° 116, pp 50-53.

DE JONG C., MASURE P., BARTH T., 2008. – «Challenges of alpine catchment management under changing climatic and anthropogenic pressures». In: *Technology for Environmental Assessment and Decision Making 4th Biennial Meeting of iEMSs*, (ed M. Sánchez-Marrè J.B., J. Comas, A. Rizzoli and G. Guariso), International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs).

DINGER F., DUBOS S., 1995. - *Impacts des installations de neige de culture sur l'environnement*. Cemagref, Grenoble.

DUGLEUX E., 2002. - *Impact de la production de neige de culture sur la ressource en eau*. Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, Lyon.

EVETTE A., LAIGLE D., PEYRAS L., 2009. - *Risques et impacts des retenues d'altitude*. Quae, Paris.

GOOD R., 1995. – «Ecologically Sustainable Development in the Australian Alps». *Mountain Research and Development*, vol. 15, n° 3, pp 251-258.

IPCC, 2007. - Fourth Assessment Report - contribution of working group I - summary for policymakers - «the physical science basis". Intergovernmental Panel on Climate Change, Genève.

KNAFOU R., 1978, *Les stations intégrées de sports d'hiver des Alpes françaises*, Masson, Paris, 319 p.

LENOIR J., GEGOUT J.C., MARQUET P.A. , DE RUFFRAY P., BRISSE H., 2008. – «A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century». *Science*, vol. 320, n° 5884, pp 1768-1771.

MARNEZY A., 2008. – «Alpine dams : From hydroelectric power to artificial snow». *Journal of Alpine Research*, vol. 96, n° 1, pp 103-112.

OECD, 2007. - *Climate Change in the European Alps: Adapting Winter Tourism and Natural Hazards Management* Organisation for Economic Co-operation and Development.

PACCARD P., 2010. – *Gestion durable de l'eau en montagne : le cas de la production de neige en stations de sports d'hiver*. Thèse de doctorat de géographie, Université de Savoie, 482 p.

PEYRAS L., MERIAUX P., 2009. - *Retenues d'altitude*. Quae, Versailles.

SCOTT D., MCBOYLE G., MINOGUE A., MILLS B., 2006. – «Climate Change and the Sustainability of Ski-based Tourism in Eastern North America: A Reassessment». *Journal of Sustainable Tourism*, vol. 14, n° 4, pp 376 - 398.

WIPF S., RIXEN C., FISCHER M., SCHMID B., STOECKLI V., 2005. – «Effects of ski piste preparation on alpine vegetation». *Journal of Applied Ecology*, vol. 42, n° 2, pp 306-316.