

Colloque CFBR-SHF : «Hydraulique des barrages et des digues, Chambéry, 27-28 septembre 2017 »
Calixte et alia. « Impact du changement climatique sur la production hydroélectrique alpine »

Impacts du changement climatique sur la production hydroélectrique alpine : comment une nouvelle retenue à Oberaletsch pourrait garantir la gestion durable des installations existantes

Emeline CALIXTE⁽¹⁾, Fränz ZEIMETZ⁽²⁾, Pedro MANSO⁽²⁾, Anton SCHLEISS⁽²⁾, Jonathan FAURIEL⁽³⁾

⁽¹⁾ Moret et Associés S.A., 1920 Martigny - e-mail : emeline.calixte@moret-associes.ch

⁽²⁾ Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) - e-mail : franz.zeimetz@epfl.ch, pedro.manso@epfl.ch, anton.schleiss@epfl.ch

⁽³⁾ ALPIQ S.A - e-mail : jonathan.fauriel@alpiq.com

Suite à décision du Conseil Fédéral de sortir du nucléaire, l'hydroélectricité suisse jouera un rôle central pour réussir la transition énergétique. Cependant, le changement climatique semble avoir un impact négatif sur la production hydraulique à long terme. En effet, avec l'accélération de la fonte des glaciers, les apports hydrauliques vont en général augmenter jusqu'en 2050, puis diminuer avec la disparition d'un grand nombre de glaciers. Ce phénomène va laisser place à des sols très érodibles, les moraines, ce qui se traduira par une augmentation globale de l'apport en sédiments aux retenues existantes. La diminution globale des apports en eau va donc impacter la gestion des barrages, comme celui de Gebidem, dans le canton du Valais en Suisse, déjà très concerné par la gestion des sédiments.

Ce barrage est situé en aval du grand glacier d'Aletsch et exploite les eaux de la Massa à la centrale de Bitsch. Le volume de la retenue ne représentant que 2% de l'ensemble des apports de son bassin versant. Le retrait du glacier, et notamment de son bras d'Oberaletsch laisse apparaître un site idéal pour l'implantation d'une nouvelle retenue en amont de Gebidem, ce qui permettrait d'une part d'exploiter une nouvelle hauteur de chute et d'autre part de pouvoir augmenter la capacité de stockage saisonnier permettant une meilleure valorisation de la ressource en eau et une plus grande flexibilité d'exploitation. L'article présente une étude du potentiel du site d'Oberaletsch focalisé sur la possibilité de convertir les futurs impacts du changement climatique en opportunités. La construction d'un nouvel aménagement à Oberaletsch à caractère modulable permettrait de capter l'abondance des apports dans les prochaines décennies et de se préparer pour leur réduction attendue après 2050. Les effets combinés d'une nouvelle retenue et d'un moindre transit des apports en eau en rivière, réduiraient la mobilisation des dépôts de moraine et les apports en sédiments à Gebidem. Une exploitation coordonnée des deux aménagements permettrait des gains d'efficacité dans l'usage de l'ensemble des ressources en eau, du territoire et des infrastructures, tout en réduisant et modulant les investissements en nouvelles installations.

MOTS CLEFS : changement climatique, hydroélectricité avec stockage d'accumulation, retrait des glaciers, gestion intégrée des sédiments dans le bassin versant.

Management of climate change impacts on Alpine hydropower: how a new reservoir at Oberaletsch can guarantee the sustainability of the Gebidem scheme

As a result of the Federal Council's decision to exit nuclear power, Swiss hydroelectricity will play a key role in achieving the energy transition. However, climate change appears to have an overall negative impact on hydropower production. Indeed, with the acceleration of the glacier melting, annual inflows will increase until 2050, and then decrease with the disappearance of several glaciers. Glacier retreat will expose very erodible moraine, which will result in an overall increase in sediment supply to existing reservoirs. The overall decrease in water inflows will therefore have an impact on the management of hydropower schemes, such as the one using the Gebidem dam in the canton of Valais in Switzerland, already an extreme case in terms of sediment management.

The Gebidem dam and hydropower scheme is located downstream of the Grand Aletsch glacier and exploits the inflows of the Massa River at the Bitsch power station. The existing reservoir represents only 2% of the total catchment inflows. The retreat of the glacier and namely of the Oberaletsch branch reveals an ideal site for the construction of a new dam, which would allow the use of a new elevation difference for power generation as well as the creation of new reservoir

increasing the leverage of inflow seasonality and operation flexibility, which are key points of the 2050 energy strategy. The paper presents a study carried on the Oberaletsch sub-catchment focusing on how to convert the future impact of climate change in new opportunities. The study shows that the construction of a new modular hydropower scheme at Oberaletsch can take profit from the increased inflows in the next decades whilst preparing the scheme for reduced inflows after 2050. The combined effects of the future reservoir and of the reduced inflows through the river network would reduce the mobilisation of the exposed moraine and the sediment yield to Gebidem. A coordinated operation of the two hydropower schemes can improve the efficiency in the use of the natural resources as well as of the built infrastructure, whilst reducing and phasing the required investments in new infrastructure.

KEY WORDS: climate change, storage hydropower, glacier retreat, basin-scale sediment management

I INTRODUCTION

Le défi majeur de la stratégie énergétique suisse 2050 est le remplacement de l'électricité nucléaire par une production plus durable et non émettrice de CO₂. La configuration topographique de la Suisse, sa densité de population et sa situation géographique ne permettent pas de remplacer par le solaire et l'éolien les 24 à 26 TWh annuels produits actuellement par les quatre sites nucléaires. De plus, ces deux types d'énergies sont fortement soumis aux aléas météorologiques et seul un stockage complémentaire permettrait une production en lien avec la demande. Le stockage d'énergie est aujourd'hui assuré par les bassins d'accumulation de haute montagne. La Suisse en possède actuellement plus de 200, répartis sur l'ensemble du territoire.

D'après des études récentes [SSHL & CHY, 2011], la gestion des futurs barrages sera impactée par les modifications du climat. Le développement de nouvelles retenues doit donc se faire en adéquation avec les scénarios climatiques et les aménagements hydrauliques existants devront revoir leur mode de gestion.

Aujourd'hui, les sites potentiels de retenues localisés à l'exutoire de bassin versants glaciers présentent de nouvelles opportunités. En effet, le recul des glaciers laisse place à de nombreux verrous rocheux, permettant la construction de barrages en altitude. La formation de lacs d'altitude pourrait donc permettre le développement de l'hydro-électricité et du tourisme [Haerberli et al., 2013]. Le bassin versant du barrage de Gebidem en Suisse est actuellement recouvert à plus de 60 % de glace (Figure 1). A l'heure actuelle, la retenue du barrage ne représente que 2% des apports du bassin versant, et est utilisé pratiquement au fil de l'eau ou avec un faible volume de stockage intra-journalier. Chaque année le barrage déverse en été ou bien perd quelques dizaines de mètres de chute par abaissement préventif du plan d'eau. Le recul du glacier d'Aletsch, et plus en particulier de son bras d'Oberaletsch présente à la fois des dangers mais aussi des opportunités. D'une part, le recul des glaciers correspond à une augmentation des apports pendant les années de fonte accentuée, mais à terme réduira non seulement la quantité mais aussi la prévisibilité des apports liés à la fonte du glacier en été. D'autre part, le recul du glacier d'Oberaletsch libère une partie du territoire qui se prête très bien pour la création d'une retenue plus importante que celle de Gebidem.

A l'heure actuelle les études sur le potentiel énergétique lié au recul du glacier d'Aletsch sont restées limitées à une utilisation au fil de l'eau de la vallée du glacier d'Obersletsch. Une considération des ressources en prenant en compte des aspects plus globaux comme les nouveaux dangers générés (stabilité des pentes, mobilisation de dépôts morainiques, changements de régime hydrologique) ou encore l'utilisation d'apports de bassins versants adjacents n'a pas été faite à ce jour. Dans le cas du barrage de Gebidem, des purges ou chasses complètes sont prévues chaque année. Le niveau du lac est abaissé et la vanne de fond ouverte pour éliminer les sédiments accumulés dans la retenue. En vue de l'accroissement des apports solides, une nouvelle logique de gestion des sédiments devrait être développée et implémentée à l'avenir. Les implications en termes de gestion du plan d'eau et de production d'électricité devront aussi être révisées pour des raisons hydrologiques, ce qui ajoutera d'avantage d'incertitude dans un contexte déjà très tendu d'instabilité des marchés de vente d'électricité dû aux subventionnements massifs du charbon, soleil et vent en Europe.

Cet article présente une étude du potentiel énergétique d'une nouvelle retenue d'altitude à Oberaletsch ainsi que les synergies possibles avec l'exploitation de l'aménagement de Gebidem. Une palette de solutions est proposée pour exploiter au mieux les ressources naturelles de l'ensemble du bassin versant, dans l'idée d'augmenter la production d'électricité en hiver, déficitaire en Suisse, et en même temps donner une contribution positive à la gestion des sédiments à Gebidem.

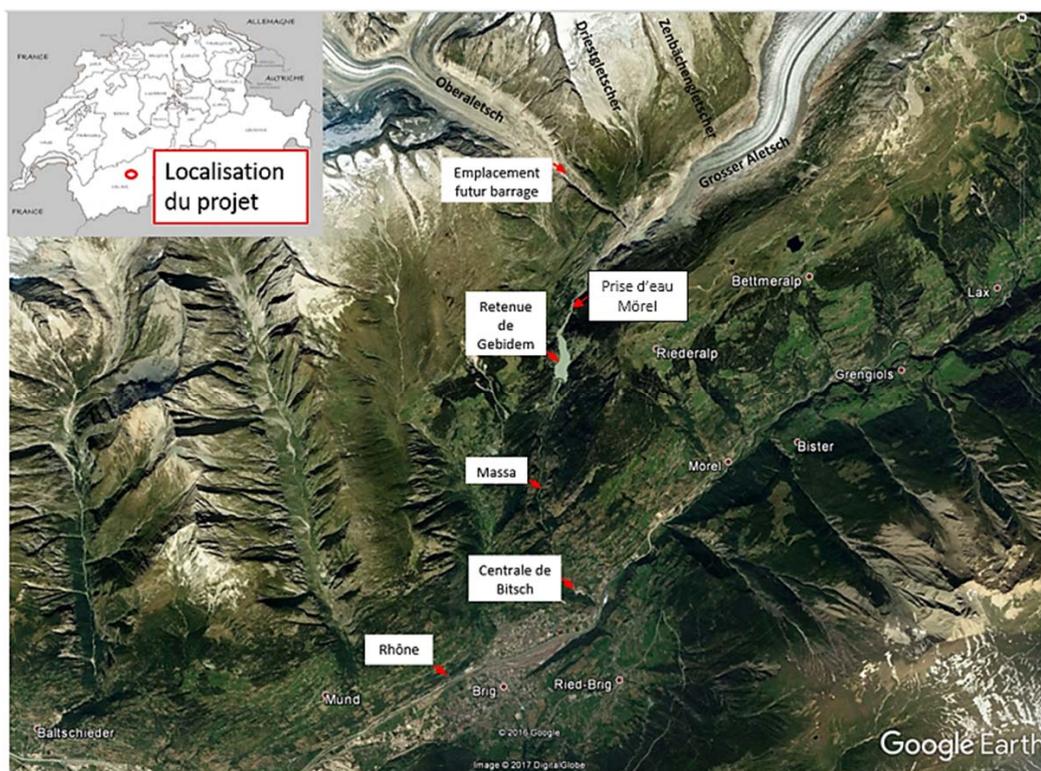


Figure 1 – Situation de l'aménagement hydroélectrique d'Electra-Massa, sur le Haut-Rhône, en Valais, en Suisse. L'aménagement comprend le barrage voûte de Gebidem, 122 m de haut, volume de la retenue 9.2 hm³ (utile 5.8 hm³) mis en service en 1967, qui draine un bassin versant de 198 km² entre 3900 et 1300 m d'altitude environ. La centrale hydroélectrique de 340 MW située à Bitsch exploite une chute brute maximale de 743 m et est équipée de trois groupes Pelton pour 55 m³/s chacune [Fond de plan GoogleEarth].

II MÉTHODES

II.1 Méthodologie d'analyse

L'étude est divisée en trois étapes, la première étant l'évaluation de l'évolution future des apports en eau et en sédiments au barrage de Gebidem ainsi qu'à une section du torrent Oberaletschbach. La deuxième étape correspond à une procédure de génération systématique d'alternatives d'aménagement du bassin versant de la Massa en amont du barrage de Gebidem, permettant d'analyser un large spectre de concepts et de synergies possibles entre plusieurs aménagements en cascade. Finalement, la troisième étape consiste à définir les critères de comparaison entre les diverses alternatives d'aménagement, afin de mettre en avant la qualité des réflexions et les mérites de concepts plus innovateurs.

II.2 Apports en eau futurs

En amont de la retenue de Gebidem situé à environ 1400 m d'altitude, les apports hydrauliques sont gouvernés par les débits de fonte des glaciers du bassin versant. Le retrait des glaciers influence fortement la valeur des écoulements annuels ainsi que leur distribution sur l'année. La prolongation de la saison de fonte ainsi que l'augmentation des températures vont engendrer une augmentation des écoulements en hiver, normalement faibles. Il y aura plus de pluies et moins de neige sur l'année.

D'après Farinotti (2011), les apports annuels moyens du bassin versant de Gebidem devraient augmenter de 13%, par rapport à 2010, d'ici l'année 2040. Cette augmentation sera suivie d'une diminution des apports

de 30% pour la fin de siècle (toujours par rapport à 2010). De plus, le débit de pointe augmentera de 11% en 2040 et diminuera de 51% en 2100. Enfin, ces débits survenant actuellement vers la fin juillet, se décaleront progressivement pour survenir début juin en 2100.

L'estimation des apports en eau du glacier d'Oberaletsch se base sur des mesures in-situ. En effet, les débits de l'Oberaletschbach (nom du ruisseau) ont été relevés pour la période allant du 17/06/2015 au 11/09/2015. Grâce à plus de 1800 mesures, un coefficient de proportionnalité a été mis en évidence entre les apports de la Massa et ceux de son affluent, l'Oberaletschbach. Par ailleurs, les débits de la Massa sont mesurés dans une station hydrométrique fédérale situé immédiatement en amont de la retenue du barrage de Gebidem. Concernant les apports futurs, il est admis, que le coefficient de proportionnalité entre débits d'Oberaletschbach et débits de la Massa reste inchangé à l'échelle annuelle, malgré les différences attendues de régime hydrologique de chaque cours d'eau. Ceci implique pour l'Oberaletschbach une augmentation similaire des apports en eau jusqu'en 2050 environ, puis une diminution les années suivantes. La prévision des hydrogrammes annuels de débit du bassin versant de l'Oberaletschbach est résumée dans la Figure 3.

II.3 Analyse des apports en transport solide

La présence du glacier conditionne les apports en sédiments. Trois méthodes empiriques ont permis d'évaluer l'évolution de ces apports dans le cadre du changement climatique. Le Tableau 1 résume les caractéristiques des trois méthodes ainsi que les principales conclusions de leur application.

La première méthode appliquée est celle développée par Beyer-Portner (1998) qui propose un modèle pour l'estimation du volume spécifique de l'apport annuel en sédiments pour des bassins versants alpins (V_A en $m^3 km^{-2} an^{-1}$). L'expression ci-après a été basée sur l'analyse de l'alluvionnement de 19 retenues en Suisse :

$$V_A = 93 \cdot 10^{-15} \cdot H_{été}^{0,052} \cdot SE^{0,091} \cdot SV^{8,108} \cdot \Delta LG^{0,0802} + 274, \quad (1)$$

avec $H_{été}$ la hauteur des précipitations moyennes tombées entre juin et septembre [mm], SE le pourcentage de la surface du bassin versant constitué de sols érodibles sans prise en compte des glaciers [%], SV le pourcentage de la surface du bassin versant sans couvert végétal y compris la surface des glaciers [%] et ΔLG le changement annuel de la longueur des glaciers par rapport à leur longueur totale [%]. Pour chaque année, il faut exprimer les coefficients SV, SE et ΔLG . Au fur et à mesure que le glacier recule, le coefficient SE va augmenter, tandis que le SV restera constant. En effet, les sols libérés par le glacier seront sans couverture végétale. Les résultats obtenus coïncident avec les quantités en sédiments connus pour les années 1992 à 2013, issus de l'historique des purges à Gebidem [Meile et al. 2014]. De plus, la forte corrélation entre le coefficient SE et le volume en sédiments V_A , démontre une augmentation des sédiments avec le recul du glacier. En conséquence, un glacier en retrait est à l'origine d'un débit glacier plus important, et donc d'une capacité de transport qui augmente. Les apports sédimentaires deviennent donc plus importants et leur granulométrie augmente. Pour connaître l'évolution précise des apports sédimentaires, il faudrait connaître le taux de sédiments glaciers, afin de calculer le potentiel futur d'érosion.

La deuxième méthode appliquée est celle de l'érosion spécifique. Elle se base sur l'hypothèse selon laquelle le recul des glaciers va laisser place à des sols particulièrement érodibles, les moraines. Ainsi, au fur et à mesure de la fonte, les apports en sédiments vont augmenter. Le volume annuel spécifique de l'apport en sédiments ou des sédiments érodés, noté α [$m^3 km^{-2} an^{-1}$] est alors donné par:

$$V_{Sédiments} = (A_{BV} - A_{GL}) \cdot \alpha \quad (2)$$

- $V_{Sédiments}$ Volume annuel des sédiments érodés [m^3/an]
- A_{BV} Aire du bassin versant [km^2]
- A_{GL} Aire recouverte par les glaciers du bassin versant [km^2].

L'historique des purges à Gebidem pour les années 1992 à 2013 a permis d'estimer le volume V_s à 400 000 m^3/an , ce qui, pour une surface A_{BV} de 200 km^2 , permet d'estimer la valeur de α à 4 641 [$m^3/an/km^2$]. Cette valeur tient compte de la diminution de surface des glaciers du bassin versant de Gebidem pendant cette période. Ce coefficient est supposé constant, et permet le calcul de $V_{Sédiments}$ en fonction de la diminution de l'aire des glaciers A_{GL} future, estimée selon Jouvét (2010) qui a modélisé le recul des glaciers de ce bassin versant.

Finalement, une troisième méthode a aussi été utilisée, celle de Gravilovic [1972]. Contrairement aux méthodes précédentes, la température y est explicitement considérée. L'expression adaptée aux milieux montagneux est la suivante, tirée de la thèse de Beyer Portner [Beyer Portner, 1998] :

$$V_S = \xi \cdot G, \quad (3)$$

- V_S Volume annuel moyen des apports en sédiments du bassin versant [m^3/an]
- ξ Coefficient de rétention du bassin versant [-]
- G Volume annuel moyen des sédiments érodés [m^3/an]

Le coefficient de rétention du bassin versant se calcule en fonction des caractéristiques de ce dernier : superficie, type de couverture et lithologie du sol, ou encore type et ampleur d'érosion observé. Enfin, le volume annuel moyen des sédiments érodés dépend de la température moyenne annuelle du bassin versant, et de la hauteur de pluie annuelle moyenne. La superficie et la pente du bassin versant interviennent également. Malgré le fait que Jouvét (2010) ait considéré trois scénarios climatiques, l'étude présente considère seulement le scénario climatique médian d'évolution des températures pour l'estimation du volume de sédiments apportés annuellement à Gebidem.

Tableau 1 – Synthèse de l'application de différentes méthodes d'estimation des apports en sédiments à la retenue du barrage de Gebidem pour les horizons 2050, 2070 et 2090

Méthodes de calcul	Beyer-Portner (1998)	Érosion spécifique	Potentiel d'érosion selon Gravilovic (1972)
Description	Calcul du volume spécifique de l'apport annuel en sédiment V_A [$m^3 km^{-2} an^{-1}$]	Calcul des apports sédimentaires annuels en fonction du coefficient spécifique d'érosion α [$m^3 km^{-2} an^{-1}$].	Calcul du volume annuel moyen des apports en sédiments, V_S [$m^3 an^{-1}$].
Utilisation	Comparaison des résultats obtenus avec les volumes de sédiments apportés au barrage de Gebidem de 1992 à 2013 [Meile et al. 2014]. Ces formules prennent en compte l'évolution du glacier et des pluies sur le bassin versant.	Le coefficient spécifique d'érosion varie dans le temps. Afin de le rendre stable, la formule est modifiée en supposant que seules les surfaces de sols érodibles (donc non recouvertes par le glacier) participent aux apports sédimentaires.	Prise en compte de la température du bassin versant, des variations de précipitation et des caractéristiques du bassin versant (pente, superficie, etc.).
Conclusion	Résultats en accord avec les données mais il faut connaître le changement annuel de la longueur du glacier par rapport à la longueur totale.	Le coefficient obtenu vaut $4\,641\ m^3 km^{-2} an^{-1}$. Il a été calculé sur la base des données de volume des sédiments de 1992 à 2013 et sur l'évolution de l'air des glaciers du bassin versant.	Le volume des sédiments est obtenu selon différents scénarios climatiques.
Points faibles	De nombreux paramètres à calculer pour obtenir le résultat. Faible évolution des apports sédimentaire malgré un fort recul du glacier.	Ne considère pas directement l'influence des pluies ou de la température du bassin versant.	Tendance à surestimer le volume de sédiments.

II.4 Variantes d'aménagement

Plusieurs concepts d'intervention sur le bassin versant en amont de Gebidem permettent à la fois de contribuer à l'exploitation durable de celui-ci et d'apporter une contribution positive à la stratégie énergétique 2050 ; ils sont résumés dans le Tableau 2

La génération de variantes d'aménagement correspond à la considération des concepts d'intervention de manière isolé, ou bien à la combinaison de plusieurs concepts, pour atteindre un ou plusieurs objectifs précis.

Il s'agit d'être à la fois systématique dans l'identification des objectifs, dans la fixation des concepts, dans l'esquisse des tracés reliant les points de captage et les points de restitution de débits et, finalement, dans le croisement des diverses sources d'information d'ordre cadastral, topographique, géologique et de protection du paysage ou d'autres valeurs culturels. La position des ouvrages principaux est modifiée afin de trouver des emplacements qui permettent d'obtenir de plus grandes chutes, tout en cherchant à limiter la longueur des galeries hydrauliques.

Tableau 2 – Objectifs d'intervention sur le bassin versant du barrage de Gebidem et concepts permettant de mettre en œuvre des solutions afin d'améliorer la durabilité de l'aménagement de Gebidem.

Objectifs	Concepts pour atteindre les objectifs
Garantir la dilution des purges de Gebidem	Garantir un apport en eau claire supplémentaire lors des purges de Gebidem afin d'augmenter la capacité de chasse de sédiments dans le canal de fuite.
Limiter les déversements du barrage de Gebidem (déversoir en crête)	Augmenter la capacité de stockage, soit au barrage de Gebidem (rehaussement), soit en amont.
Réduire l'usure des turbines due au transit de sédiments et aux purges régulières (solicitation de la vidange de fond).	Créer une nouvelle retenue en amont de Gebidem pour stocker une partie des sédiments dans la nouvelle retenue. Le turbinage d'une partie des apports en eau dans un nouveau palier amont réduirait les écoulements en rivière et ainsi la mobilisation de dépôts fluviaux.
Augmenter la production de pointe ⁺	L'augmentation de la capacité de stockage en amont augmenterait la flexibilité d'exploitation.
Augmenter la maîtrise sur la variabilité intra-annuelle des apports	Augmenter la capacité de stockage en amont de Gebidem pour faire du transfert saisonnier, stockant de l'eau pour production d'électricité en hiver (ce dont manque la Suisse).
Augmenter la résilience des aménagements sur la Massa à la variabilité hydrologique interannuelle (années humides, sèches)	Augmenter la capacité de stockage en amont de Gebidem, tout en garantissant les apports à la prise de Môrel situé en amont du barrage (captage de l'ordre de 82 hm ³ /an). Le rehaussement du barrage de Gebidem n'est donc pas possible car il engendrerait l'inondation de la prise d'eau Môrel (voir Figure 1).
Limiter les dangers naturels	Construction d'un barrage capable de contribuer à la protection contre les crues, à la gestion des risques de génération de vagues d'impulsion dans de nouveaux lacs glaciaires (par glissement de terrains devenus instables par la montée du pergélisol, par des avalanches, par la chute de blocs de rocher ou de glace).

⁺ Le mode de production de la centrale de Bitsch oscille entre une accumulation hebdomadaire (printemps), journalière (début été, fin automne) et au fil de l'eau (été et début automne).

Afin de respecter ces objectifs, trois concepts d'aménagement ont été retenus, tous comprenant la construction d'un nouveau barrage sur l'Oberaletschbach (Figure 2). En faisant varier la hauteur du barrage (et le volume utile de la retenue) plusieurs variantes sont définies. Le volume utile a d'abord été fixé à la moitié des apports annuels du bassin versant (c'est le cas pour la plupart des barrages en Suisse). Il a ensuite été augmenté progressivement jusqu'à correspondre aux apports annuels actuels. Pour chaque volume utile, le choix du débit équipé de la centrale est réalisé de manière à turbiner environ 1000 h/an, ce qui correspond à la charge de pointe. Le turbinage se fera donc exclusivement en hiver et notamment aux heures de pointe.

Chaque variante correspond alors à au moins un concept d'intervention, à une hauteur de barrage (et volume utile de la retenue) et à un débit d'équipement. Pour comparer les variantes, leur exploitation est simulée à pas de temps mensuel, y compris le bilan de masse de la nouvelle retenue d'Oberaletsch seule ou couplée en cascade à celle de Gebidem. Les simulations d'exploitation sont effectuées en fixant une clef de turbinage et en considérant des apports hydrauliques aux horizons 2050, 2070 et 2090.

Les variantes en bypass de Gebidem (A1 et A2) permettraient d'exploiter des chutes brutes de l'ordre de 1400 m. Il s'agit d'un concept de turbinage des eaux du glacier d'Oberaletsch en aval de Gebidem, avec différents points de relâche. Ainsi, deux options de restitution ont été étudiées : vers le Rhône (A1) ou vers Bitsch (A2). Le concept A2 permet en plus la dilution des purges dans le canal de chasse de la centrale de Bitsch. Elles garantissent un fort approvisionnement en énergie de pointe. La variante appelée « dilution » (B) est aussi un bypass à Gebidem, mais d'environ 800 m de chute brute, avec restitution dans les gorges de la Massa en aval du barrage. Par rapport aux variantes A1 et A2 cette variante permettrait de diminuer la concentration en sédiments de la Massa lors des purges du barrage, par mélange des eaux claires turbinées avec les débits de purge.

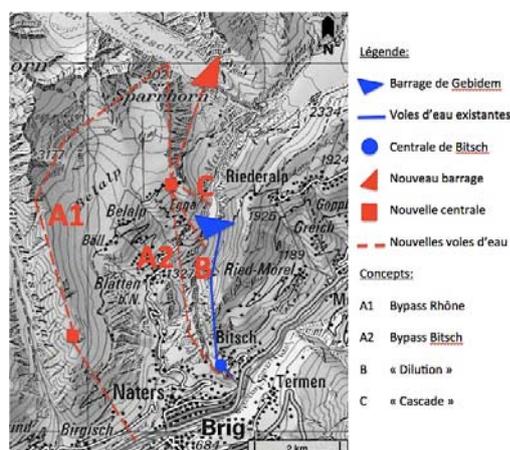


Figure 2 - Plan de situation de l'aménagement de Gebidem, sur la rivière Massa, située à proximité de la ville de Brig (Valais/Suisse), avec l'illustration des trois concepts d'intervention sélectionnés. **A)** Faire un bypass de l'aménagement de Gebidem par turbinage des apports retenus à Oberaletsch vers le Rhône (A1) ou vers Bitsch (A2). **B)** Restitution des débits turbinés directement au pied du barrage de Gebidem (permet la dilution des purges), en by-pass de Gebidem. **C)** Restitution des débits turbinés dans la retenue de Gebidem – fonctionnement « en cascade ».

Enfin, la variante de fonctionnement en cascade évite de pénaliser l'exploitation du palier Gebidem-Bitsch. La nouvelle retenue d'Oberaletsch permet ainsi de soulager Gebidem en été tout en garantissant une partie de l'approvisionnement hivernal. La hauteur de chute brute est de l'ordre de 700 m, actuellement non-exploitée.

II.5 Critères de comparaison

Les critères d'évaluation des alternatives d'aménagements sont définis comme présentés dans le Tableau 3

Tableau 3 – Définition des critères utilisés pour l'analyse comparative des variantes d'aménagement

Critère	Définition	Méthode d'évaluation
Energie productible en GWh	Production attendue au palier Oberaletsch Production attendue au palier Gebidem	Calcul de la quantité d'énergie productible à l'aide de la simulation du fonctionnement de la retenue, par bilan de masse, à pas de temps mensuel, pour les apports aux horizons 2050, 2070 et 2090.
Part d'énergie hivernale totale	Pourcentage de l'énergie produite lors des mois d'hiver.	Plus la production hivernale est élevée, meilleure est la variante. Pour rappel, les mois d'été s'étendent d'avril à septembre, tandis que l'hiver d'octobre à mars.
Protection contre les crues	Capacité de la variante à garantir une protection contre les crues	La présence d'une retenue en amont ou d'une possibilité de pompage est un avantage pour la gestion des crues
Flexibilité de la gestion	Capacité de l'aménagement à s'adapter aux aléas climatiques et économiques.	La multiplication des adductions, ainsi que l'utilisation du pompage turbinage sont des atouts.
Favoriser la production d'énergie de pointe	Production en accord avec la demande.	Calcul des recettes d'exploitation. La modélisation des prix de l'électricité se base sur trois types de prix (la charge de pointe, moyenne et basse). Pour chaque mois de l'année, le nombre d'heures par type de charge et par jour a été comptabilisé, jusqu'à totaliser les meilleures 1000 heures de l'année. Les charges varient entre hiver et été, mais aussi selon le jour de la semaine (pas de charge de pointe le week-end par exemple). La

		structure des prix correspond à celle d'un marché régulé.
Prix de revient	Investissements annualisés / nouvelle production [CHF/kWh]	Estimation des coûts d'investissement annualisés suite au pré-dimensionnement des ouvrages principaux et équipements [Calixte et al. 2016]. Taux d'actualisation de 4%, annualisation linéaire sur 50 années. Seule la production d'électricité supplémentaire est comptabilisée, par rapport à celle qui serait produite par l'aménagement de Gebidem seul.
Dilution	Concentration en sédiments dans le temps, pendant la purge.	Calcul de la variation de la concentration en sédiments des débits de purge d'opérations historiques mélangés avec de l'eau claire restitué par le nouvel aménagement [Calixte 2016].

III RÉSULTATS

III.1 Apports hydrauliques

La prévision des apports en eau à la future retenue du barrage d'Oberaletsch est présentée dans la Figure 3 pour différentes échéances. Comme le décrivent les flèches représentées sur la figure, les apports en eau vont dans un premier temps augmenter jusqu'en 2050, puis se réduire jusqu'à la disparition totale du glacier d'Oberaletsch. Pour le dimensionnement de l'aménagement hydroélectrique, les apports en eau aux horizons 2050, 2070 et 2090 sont considérés. Cela correspond à une baisse des volumes des apports du bassin versant naturel sur 40 ans d'exploitation. L'allure des courbes reste presque inchangée au fil des années à part la période août –septembre. Comme pour le régime glaciaire actuel, les débits restent plus importants en été et très faibles en hiver. En réalité, la disparition du glacier devrait conduire à un régime plutôt nival, dont l'hydrogramme serait plus plat. Si ce phénomène se produit, il faudra alors réaliser des adductions supplémentaires au niveau des glaciers environnants, dont la fonte sera plus lente. De telles adductions peuvent être construites afin d'amener l'eau de fonte des glaciers environnants dans la retenue d'Oberaletsch. Trois potentielles adductions ont été étudiées : Driestgletscher, Zenbächgletscher et Mittlealetschgletscher (Figure 4). Les débits naturels (moyennes mensuelles et annuelles) des torrents Driestgletscher et Zenbächgletscher sont issus de la base de données GEWISS de l'Office Fédérale de l'environnement. Cette base de données est constituée des résultats de la modélisation à grande échelle des processus hydrologiques permettant l'obtention de séries historiques de ruissellement pour l'ensemble du réseau hydrographique de Suisse, calés sur un réseau dense de stations de mesures, y compris hydrométriques. Pour les débits du bassin versant du Mittlealetschgletscher, un calcul au prorata des aires fournit les apports annuels.

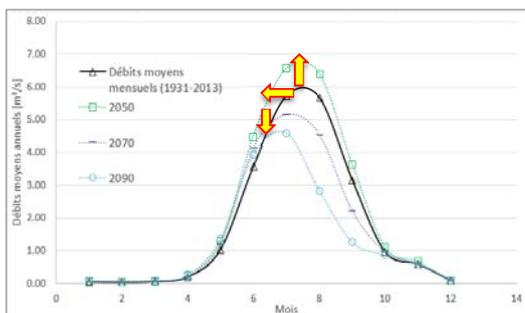


Figure 3 - Prévision des variations annuelles des débits du torrent d'Oberaletschbach pour les horizons 2050, 2070 et 2090 obtenus à partir de mesures hydrométriques effectués sur la Massa (station OFEV) et de mesures réalisés en 2016 sur l'Oberaletschbach de juin à septembre (données Alpiq).

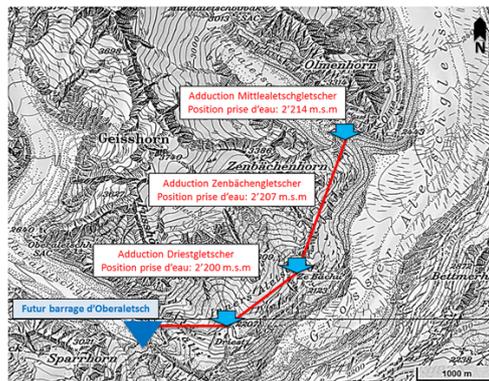


Figure 4 - Principales adductions possibles pour alimenter la retenue d'Oberaletsch, connectées par un collecteur à la cote 2'200 msm (sur base de carte Swisstopo). Trois prises d'eau (flèches bleues) sont placées à l'exutoire des trois bassins versant glaciers, et permettent un approvisionnement en eau

supplémentaire.

Concernant les apports aux horizons 2050, 2070 et 2090, les mêmes hypothèses que pour les glaciers d'Oberaletsch et de Grosseraletsch sont réalisées. En plus de ces adductions supplémentaires à Oberaletsch, la présence du plus grand glacier d'Europe garantit l'existence à proximité d'apports en eau suffisants jusqu'en 2100 avec un régime hydrologique glaciaire. Du pompage-turbinage entre Gebidem et le futur barrage d'Oberaletsch permettrait donc de remplir la retenue si les apports naturels ne correspondent pas à ceux calculés dans le cadre de cette étude.

III.2 Apports sédimentaires

Les apports sédimentaires futurs ont été estimés grâce à deux méthodes de calcul : celle de l'érosion spécifique pour tenir compte de l'évolution future de la surface découverte par le retrait des glaciers, et celle de Gravičovic. Finalement les deux méthodes ont fourni une conclusion unique (Figure 5) : les apports sédimentaires risquent d'augmenter avec le recul des glaciers, allant probablement être multipliés par deux, voire trois, en volume d'apports annuels.

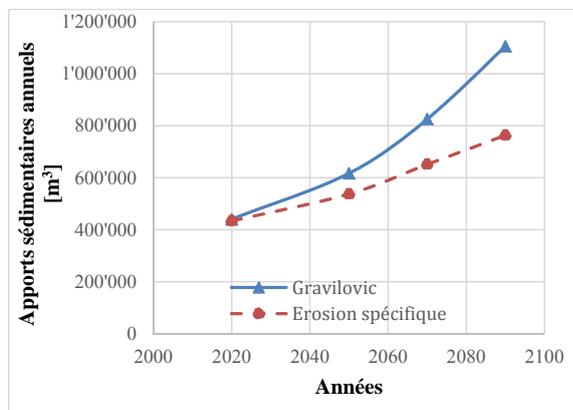


Figure 5 – Prévision des apports en sédiments au barrage de Gebidem d'ici 2100 selon deux méthodes de calcul : celui de Beyer-Portner (1998) modifié dans la présente étude pour tenir compte de l'évolution de la surface du bassin versant découverte par le retrait du glacier (méthode de l'érosion spécifique) et celui de Gravičovic (1972), dans les deux cas tenant compte d'une évolution de la température selon le scénario climatique "médian" selon Jouvét (2010).

III.3 Comparaison des variantes

Les résultats obtenus pour comparaison des différentes variantes sont présentés dans le Tableau 4 et dans la Figure 6. Plusieurs sous-variantes d'aménagement ont été analysées pour la variante 3, en termes d'hauteur du barrage, de débit équipé, ainsi que d'adductions éventuelles à construire. Même si c'est la variante 3a (couronnement à 2180 m.s.m, sans adduction) qui possède le prix de revient le plus bas, il serait dommage de se limiter à une telle hauteur. En effet, son volume utile atteint 28 hm³ tandis que les apports du bassin versant seront de 65.3, 50.7 et 42.2 hm³ aux échéances 2050, 2070 et 2090. Il serait dommage de ne pas profiter de la fonte du glacier et des apports maximaux de 2050.

Finalement, le choix s'est porté sur un couronnement de barrage fixé à 2'200 m.s.m. Cela correspond à une hauteur de barrage de 70 m pour un volume utile de 52 millions de m³. Des adductions pourront être construites pendant l'exploitation de ce barrage afin de remplir la retenue. Le débit équipé est donc fixé à 15m³/s pour une puissance installée de 90 MW.

Tableau 4 – Comparaison des variantes d'aménagement selon les critères sélectionnés

Critères	Variante 1	Variante 2	Variante 3 (hors pompage)	Variante 3 (pompage)
Quantité d'énergie produisible	≈ 100 GWh pour le palier d'Oberaletsch ≈ 440 GWh pour le palier Gebidem	≈ 165-320 GWh pour le palier d'Oberaletsch (selon adductions) ≈ 380-440 GWh pour le palier Gebidem (selon adductions)	≈ 80- 160 GWh pour le palier d'Oberaletsch (selon adductions) ≈ 530 GWh pour le palier Gebidem	≈ 165 - 220 GWh pour le palier d'Oberaletsch (selon adductions) ≈ 530 GWh pour le palier Gebidem
Part d'énergie hivernale totale	≈ 25 %	≈ 25 - 31 %	≈ 25 - 37 %	≈ 39 - 47 %
Protection contre les crues	Grâce au barrage	Grâce au barrage	Grâce aux deux barrages	Grâce aux deux barrages et à la possibilité de pompage
Flexibilité de la gestion	Moyenne	Moyenne	Assez forte	Forte
Augmentation de la dilution	Durant toute l'année	Durant toute l'année dans le canal de Bitsch	Pendant les purges	Pendant les purges

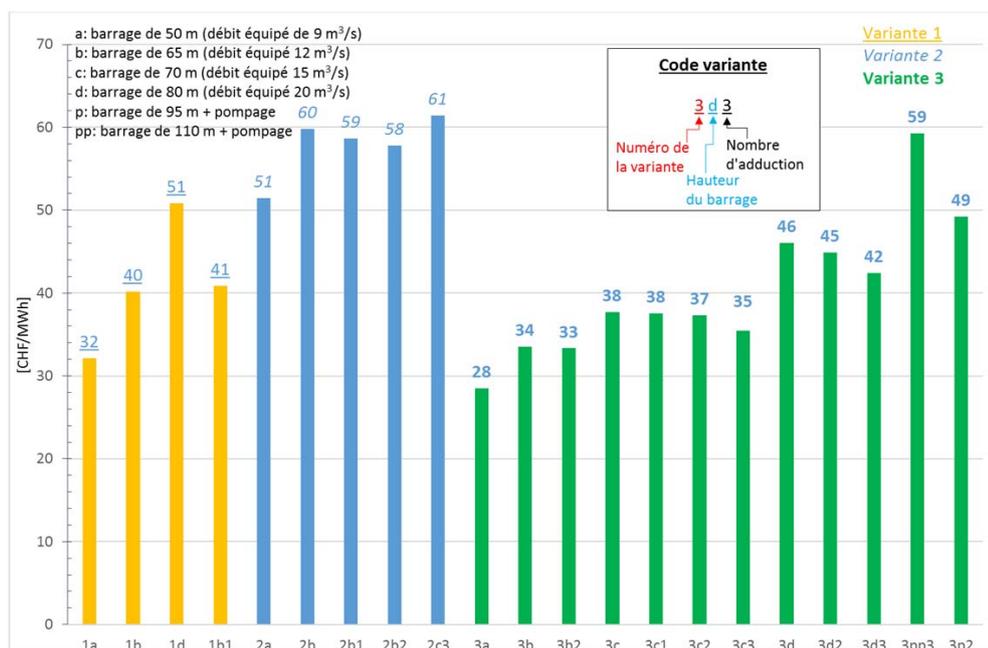


Figure 6 - Prix de revient pour chaque variante d'aménagement étudiée, considérant des concepts alternatifs (1 à 3), différents hauteurs de barrage à Oberaletsch (et volume utile, et débit d'équipement), avec ou sans pompage, avec ou

sans adductions (1 à 3 possibles), sur la base des devis budgétaires permettant le calcul comparatif des coûts sur une base de pré-dimensionnement des ouvrages principaux et équipements d'usine.

IV CONCLUSION

Causé par le réchauffement climatique, le retrait du glacier d'Aletsch constitue à la fois une menace et une opportunité pour l'aménagement hydroélectrique de Gebidem. D'un côté, la mise à découvert de moraines et la montée du pergélisol conduisent à une augmentation des apports en sédiment au niveau des installations existantes, dont l'exploitation est déjà actuellement très impactée par la gestion des sédiments. D'autre part, la fonte du glacier de l'Oberaletsch, bras sud-ouest du premier, a pour conséquence une augmentation des apports en eaux ainsi que la mise à découvert d'un verrou rocheux et d'un lac naturel. Ces premières conclusions sont appuyées sur l'interprétation de données d'exploitation, des mesures de débits effectués sur l'Oberaletschbach en 2015 ainsi que l'application de plusieurs méthodes d'estimation des apports en sédiments tenant compte du retrait prévu des glaciers locaux.

Plusieurs concept d'aménagement du bassin versant de l'Oberaletschbach ont été identifiés et comparés, dans l'objectif d'assurer la durabilité de l'exploitation de Gebidem en aval, ainsi que contribuer aux objectifs sociétaux de la transition énergétique 2050 en Suisse.

La surélévation du lac naturel par la construction d'un barrage de 70 m de haut avec un volume total de stockage de l'ordre des 60 hm³ et d'un palier de turbinage sur 700 m avec restitution dans la retenue de Gebidem permet d'augmenter la production d'énergie de l'ensemble de la cascade d'environ 25%, ainsi que la quote-part de production hivernale (octobre-mars) de 37%. Le concept retenu a aussi l'avantage d'être modulaire, pouvant s'ajuster à l'évolution climatique future avérée des apports en eau à l'aide de la construction d'adductions supplémentaire qui peuvent suppléer à la réduction des apports en eau du bassin direct du nouveau barrage. Ce projet concilie ainsi la production d'électricité renouvelable et endogène, avec la protection contre les crues et la stabilisation de moraines et de torrents.

La réalisation d'un aménagement de pompage – turbinage entre les retenues d'Oberaletsch et Gebidem, quoique fortement limité par la taille modeste du bassin inférieur, a été brièvement étudiée mais reste moins rentable que la réalisation d'adductions supplémentaires pour capter les eaux de fonte des glaciers environnants.

V RÉFÉRENCES

- Beyer Portner, N. (1998) - Erosion des bassins versants alpins suisses par ruissellement de surface. Thèse PhD, *Communication 6*, Laboratoire de Constructions Hydraulique (LCH), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.
- Beyer Portner, N. et Schleiss, A. J. (2000) - Bodenerosion in alpinen Einzugsgebieten in der Schweiz. *Wasserwirtschaft*, 90(3), p 88-92.
- Boillat, J.-L., Pougatsch, H. (2000) - State of the art of sediment managment in Switzerland. *Proceedings International Workshop and Symposium on Reservoir Sedimentation Management, Tokyo, Japan*, pp 143-153.
- Calixte, E. (2016) - Aménagement hydroélectrique et barrage d'Oberaletsch. *Projet de Diplôme Master à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*, 58 pp.
- Calixte, E., Zeimet F., Manso P., Schleiss A. (2016) - Mitigation des effets négatifs du changement climatique sur l'aménagement de Gebidem grâce à un nouveau volume de stockage à Oberaletsch. *Conférence Annuelle du Centre Suisse de Compétences en Energie (SCCER-SoE)*, Sion. Poster.
- Farinotti D., Bauder A., Boes R. M., Huss M., Jouvét G., Widmer F. (2011) - Future Glacier evolution and impact on the runoff regime in the catchment of Alpine reservoirs: The Aletsch area, Switzerland, *Dams and Reservoirs under Changings Challenges*.
- Gavrilović, S. (1972) - Inženjering o bujičnim tokovima i eroziji. *Izgradnja (special issue)*, pp 1-292.

- Haeberli, W., Bütler, M., Huggel, C., Müller, H., & Schleiss, A. (2013). Neue Seen als Folge des Gletscherschwundes im Hochgebirge – Chancen und Risiken / Formation de nouveaux lacs suite au recul des glaciers en haute montagne – Chances et risques. *Rapport de recherche NFP 61*, Zürich, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 300 S.
- Jouvet, G. (2010) - Modélisation, analyse mathématique et simulation numérique de la dynamique des glaciers. *Thèse École polytechnique fédérale de Lausanne EPFL, n° 4677*. doi:10.5075/epfl-thesis-4677
- LCH-EPFL (2002) – Gestion du transport solide lors de la purge annuelle du barrage de Gebidem. Modélisation physique et numérique des écoulements et du transport solide dans le chenal de chasse de la Massa à Bitsch. *Internal Report n°8*, Laboratoire de Constructions Hydraulique (LCH), EPFL, Suisse.
- Meile T., Bretz N. V., Imboden B., , Boillat J.-L. (2014) - Reservoir sedimentation management at Gebidem Dam. *Reservoir and Sedimentation – Schleiss and al. (Eds)*, p. 245-255. 2014 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02675-9
- Office fédérale de l'économie hydraulique. (1996). *Gesamtbeurteilung der Pumpspeicherung*. Berne.
- Société suisse d'hydrologie et de limnologie (SSHL) et Commission d'hydrologie (CHy) (éd.) (2011) - *Les effets du changement climatique sur l'utilisation de la force hydraulique – Rapport de Synthèse*. Matériaux pour l'Hydrologie de la Suisse, N° 38, 28 p., Bern. ISSN 1421-1130.