



Seilbahnen Schweiz
Remontées Mécaniques Suisses
Funivie Svizzere
Pendicularas Svizras

Gestion de l'eau dans les domaines skiabiles

Rapport final de projet 2025



Rolf Weingartner
Prof., Dr. phil.-nat.
ecosfera gmbh

international water affairs

Klaus Lanz
Dr. phil.-nat.
international water affairs

Sommaire

RAPPORT RELATIF	3
EN BREF	4
RÉSUMÉ	6
1 INTRODUCTION	17
1.1 Situation initiale et objectifs	17
1.2 Structure et contenu du rapport final	18
2 FONDEMENTS D'UNE GESTION DURABLE DE L'EAU DANS LES DOMAINES SKIABLES	18
2.1 Bases méthodologiques	18
2.2 Ressources en eau (eau disponible)	20
2.2.1 Analyse de la situation actuelle	20
2.2.2 Analyse des évolutions futures	22
2.3 Facteur de récolte et eau utilisable	25
2.4 Infrastructures (eau accessible)	28
2.5 Besoins en eau (eau nécessaire)	29
2.6 Synthèse	30
3 ENSEIGNEMENTS DE L'ÉTUDE DE CAS DE BIVIO	33
3.1 Brève description de Bivio	33
3.2 Ressources en eau (eau disponible)	33
3.3 Facteur de récolte et eau utilisable	34
3.4 Infrastructures (eau accessible)	36
3.5 Besoins en eau (eau nécessaire)	36
3.6 Évaluation finale Bivio	37
4 ENSEIGNEMENTS DE L'ÉTUDE DE CAS DE BELALP	41
4.1 Brève description de Belalp	41
4.2 Ressources en eau (eau disponible)	41
4.3 Facteur de récolte et eau utilisable	42
4.4 Infrastructures (eau accessible)	43
4.5 Besoins en eau (eau nécessaire)	43
4.6 Évaluation finale Belalp	43
ANNEXE	49

Rapport relatif au projet Gestion de l'eau dans les domaines skiables

Le rapport relatif au projet **Gestion de l'eau dans les domaines skiables** est divisé en trois parties :

1. Rapport final

Le présent rapport final résume les principaux résultats et conclusions de l'ensemble du projet. Il esquisse en outre une potentielle approche méthodologique pour l'analyse de la situation actuelle et future en matière de ressources en eau dans les domaines skiables. Le rapport final repose sur les investigations menées dans les deux cas d'étude de Bivio et Belalp.

2. Rapport technique Bivio

Le domaine skiable de Bivio a été le premier à être étudié dans le cadre de ce projet. L'accent a été mis sur le développement et l'expérimentation d'une méthodologie appropriée pour l'analyse systématique de la disponibilité et des besoins en eau. Par conséquent, le rapport technique sur Bivio est très exhaustif ; il documente en détail l'approche et la méthode et sert de base à d'autres études (Weingartner, Schwanbeck & Lanz 2025b).

3. Rapport technique Belalp

Les analyses réalisées dans le domaine skiable de Belalp s'appuient sur les connaissances et les expériences acquises à Bivio. L'objectif était d'appliquer et de vérifier la méthode développée dans d'autres conditions. Le rapport sur Belalp se veut donc un **Proof of Concept** et est par conséquent essentiellement axé sur les résultats. Pour une description détaillée de la méthodologie, veuillez vous référer au rapport technique sur Bivio ; le rapport technique sur Belalp est orienté vers la pratique et centré sur les résultats (Weingartner, Schwanbeck & Lanz 2025a).

Le présent rapport montre comment les domaines skiables peuvent vérifier de façon systématique si et comment leurs besoins en eau pour l'enneigement technique peuvent être couverts de manière durable et à long terme.

Pour ce faire, il est essentiel de disposer d'une base de données solide sur la disponibilité actuelle en eau et sur sa consommation: plus les données sont complètes, plus les résultats sont fiables. Une collaboration étroite avec les autres domaines impliquant une utilisation de l'eau (p.ex. la distribution d'eau potable, l'agriculture) ainsi que la prise en compte des exigences écologiques relatives aux eaux sont des conditions essentielles à une gestion durable de l'eau dans le cadre de l'enneigement technique. Des solutions consensuelles sont donc de mise.

La température de l'air joue un rôle décisif dans l'utilisation de l'eau pour l'enneigement technique, car elle détermine, avec l'humidité relative de l'air, si l'eau disponible peut être utilisée pour l'enneigement. À cette fin, le concept de **facteur de récolte** a été développé dans le cadre de cette étude: il indique le nombre d'heures durant lesquelles l'enneigement technique est possible dans un intervalle de temps donné, c'est-à-dire la part de l'eau disponible pouvant être utilisée pour l'enneigement (critère: la température de bulbe humide doit être égale ou inférieure à -2°C).

Les scénarios climatiques suisses actuels (CH2018 et CH2025 (à partir de fin 2025)) et les informations hydrologiques qui en découlent constituent une bonne base pour estimer l'évolution future des conditions climatiques. Ils permettent de faire des prévisions fiables en matière de températures, de précipitations et, dans de nombreux cas, de débits des cours d'eau. L'évaluation devient toutefois plus difficile lorsqu'il est également nécessaire de prendre en compte les débits des sources et les eaux souterraines.

La méthode mise au point dans cette étude permet de délimiter, d'évaluer et d'estimer les quantités d'eau qui seront disponibles à l'avenir pour l'enneigement technique. Elle permet également de déterminer si les quantités d'eau supplémentaires nécessaires à une éventuelle extension des infrastructures d'enneigement sont disponibles.



▲ Bivio

▶ Belalp



Les résultats et les recommandations de la présente étude s'appuient sur deux études de cas approfondies menées à **Bivio** et à **Belalp**. Ces deux domaines skiables se distinguent à bien des égards, mais sont tous deux situés à plus de 1800 m d'altitude. Les études de cas :

- démontrent qu'en présence d'une bonne base de données et à travers une coopération étroite avec les groupes d'acteurs concernés (distributeurs d'eau, fournisseurs d'énergie, agriculture, communes), il est possible de tirer des conclusions fondées sur la disponibilité future en eau ;
- montrent les différences fondamentales entre les domaines skiables avec et sans réservoirs d'enneigement ;
- mettent en évidence que l'enneigement technique compte parmi les plus petites consommations d'eau en termes de quantité ;
- soulignent que des solutions spécifiques au site et conçues sur mesure sont nécessaires pour relever avec succès les défis futurs dans le domaine de l'eau.

Les études de cas démontrent qu'une adaptation ciblée aux conséquences des changements climatiques est possible et efficace. Ce qui vaut pour d'autres domaines de la gestion des eaux est également vrai pour les sports de neige :

**l'eau devient un problème surtout
si l'on n'entreprend rien.**

Résumé

Les méthodes disponibles aujourd'hui permettent une estimation fondée de la future situation hydrologique d'un domaine skiable. Cela présuppose toutefois une certaine transparence, la publication des données disponibles et une volonté de dialoguer avec les autres acteurs concernés.

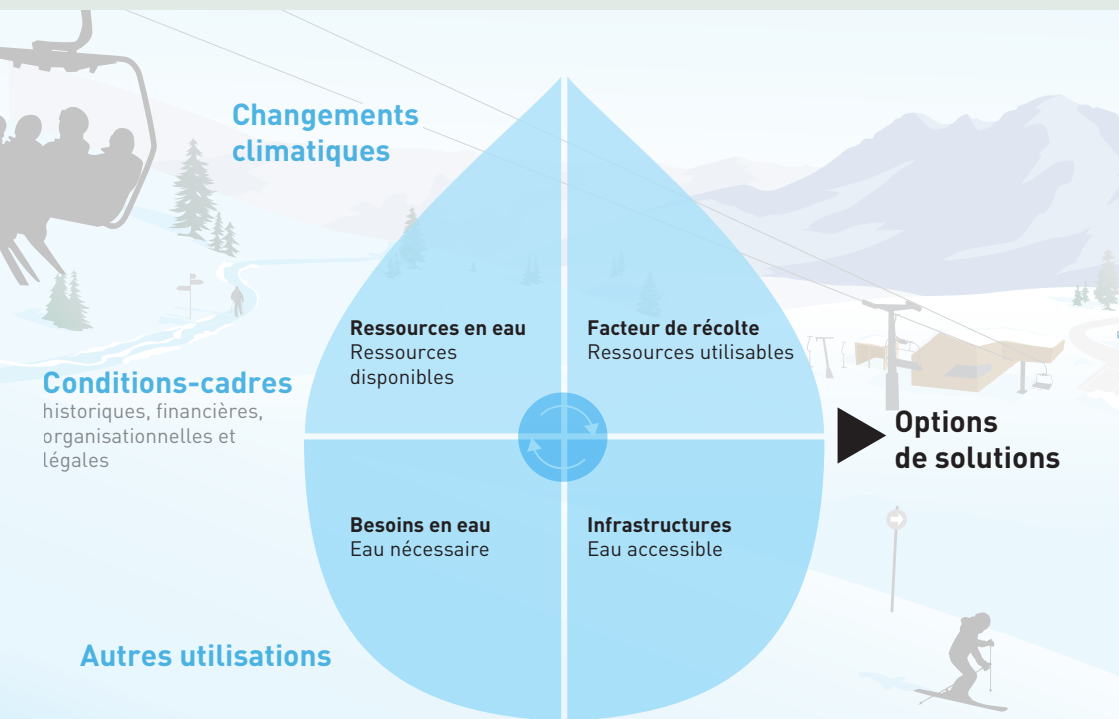
Comparé à d'autres utilisations de l'eau, les besoins en eau pour l'enneigement technique sont faibles en termes de quantité. La consommation d'eau en Suisse s'élève à environ 2100 millions de m³ par année (sans tenir compte de l'énergie hydraulique). La plus grande partie est consacrée à la distribution publique d'eau potable, soit environ 1000 millions de m³ par année, ce qui correspond à environ 47 % de la consommation totale. Cette eau est utilisée d'une part dans les ménages (560 millions de m³) et d'autre part par l'industrie et l'artisanat (440 millions de m³). L'agriculture suisse utilise environ 400 millions de m³ par an, ce qui correspond à environ 20 % de la consommation totale. Le secteur des services est un autre consommateur important, avec une part de 23 %. Les 10 % restants sont imputables au tourisme, y compris l'enneigement technique, et au secteur de la construction. Les besoins annuels en eau pour l'enneigement technique en Suisse s'élèvent à 20 à 25 millions de m³ (Weingartner & Josi 2024), ce qui correspond à environ 1 % de la consommation totale.

Il convient toutefois de noter que ces besoins se concentrent sur quelques courtes périodes aux mois de novembre et de décembre ainsi que sur des zones relativement restreintes. Les besoins en eau sont donc très importants à court terme et à une échelle locale, et peuvent peser considérablement sur les ressources en eau disponibles. Afin d'élaborer des solutions viables, il est donc indispensable d'engager un dialogue avec tous les autres acteurs concernés par la gestion de l'eau. Pour la mise au point de telles solutions, les domaines skiables peuvent s'appuyer dans leurs analyses sur les quatre formes de l'eau :

- l'eau disponible
- l'eau utilisable
- l'eau accessible
- l'eau nécessaire

RÉSUMÉ

L'étude systématique de ces quatre formes de l'eau apporte les connaissances indispensables à l'évaluation de la situation actuelle et future. Elle permet en outre de situer et d'évaluer les extensions prévues d'un domaine skiable sous l'angle de la gestion de l'eau.



Contexte de l'étude

L'enneigement technique des pistes de ski alpin et de ski de fond dans les domaines skiables suisses fait régulièrement l'objet d'articles de presse et de débats publics. Les besoins en eau liés à l'enneigement sont parfois critiqués et mal évalués. Ainsi, l'impression prévaut souvent que d'énormes quantités d'eau sont prélevées dans les eaux naturelles.

L'arc alpin est particulièrement exposé au réchauffement climatique et en subit les conséquences de manière disproportionnée. En raison de la diminution de l'enneigement naturel, les entreprises de remontées mécaniques sont donc amenées, si nécessaire, à adapter leur modèle économique et à assurer leur activité hivernale à l'aide de l'enneigement technique. Compte tenu du débat public, l'approvisionnement en eau supplémentaire nécessaire à cet effet est souvent source de conflits. Afin d'éviter les débats controversés, la plupart des entreprises de remontées mécaniques ne communiquent donc qu'avec retenue sur les besoins en eau pour l'enneigement.

Remontées Mécaniques Suisses souhaitait donc approfondir les questions relatives à l'eau en lien avec l'enneigement technique. L'objectif était de créer des bases permettant de soutenir les domaines skiables dans leurs réflexions sur les défis actuels et futurs de la gestion de l'eau. Les conclusions doivent permettre de développer des solutions viables et adaptées au site. Cette démarche vise à améliorer la sécurité de planification, à prévenir les conflits avec d'autres usages de l'eau et à faciliter la communication avec le grand public.

Les auteurs du rapport ont été chargés par Remontées Mécaniques Suisses de procéder à une analyse approfondie de la situation hydrologique actuelle et future dans deux domaines skiables choisis (Bivio (GR), Belalp (VS)). À cette fin, une méthode permettant de comparer – en tenant compte du réchauffement climatique – de manière systématique les besoins futurs en eau pour l'enneigement technique et les ressources en eau disponibles au niveau local a été développée. Cette méthode est désormais également à la disposition d'autres entreprises de remontées mécaniques. Elle permet d'adapter rapidement le système d'enneigement aux changements des conditions cadres et de l'intégrer dans la gestion régionale de l'eau. Il est ainsi possible de concevoir une utilisation durable de l'eau pour l'enneigement technique et d'éviter les conflits d'utilisation.

Questions clés

Les questions clés suivantes étaient au centre de l'étude :

- Quelles sont les ressources en eau actuellement disponibles dans les domaines skiables et sont-elles suffisantes pour l'enneigement actuel ?
- Comment la disponibilité et les besoins en eau évolueront-ils à l'avenir, compte tenu de la hausse des températures et des éventuels projets d'extension des infrastructures des pistes ?
- Comment les entreprises de remontées mécaniques peuvent-elles s'y adapter ?
- Comment exploiter les synergies avec d'autres utilisations de l'eau et éviter les conflits ?

De l'eau pour l'enneigement

Le point de départ de toute analyse approfondie de la situation hydrologique d'un domaine skiable est l'étude systématique de la disponibilité des ressources en eau. Celle-ci décrit, d'un point de vue hydrologique, les quantités d'eau disponibles aujourd'hui et à l'avenir pour l'enneigement technique. Dans ce contexte, il convient également de tenir compte des exigences légales, notamment en matière de débits résiduels, ainsi que des besoins liés à d'autres utilisations de l'eau.

Cependant, l'eau disponible ne peut être utilisée pour l'enneigement que si la température de bulbe humide (TBH), qui résulte de la température de l'air et de l'humidité relative, permet la production de neige. Ce n'est que lorsque la condition suivante est remplie :

$$TBH \leq -2^{\circ}C$$

que l'eau disponible peut effectivement être utilisée pour la production de neige. Pour déterminer cette part utilisable, on utilise ce qu'on appelle le facteur de récolte. Celui-ci décrit, pour une période définie (par exemple le mois de novembre), la part du temps au cours de laquelle les conditions météorologiques permettent l'enneigement. Si c'est le cas pendant la moitié d'une période donnée (par exemple le mois de novembre ; facteur de récolte : 0,5), la moitié de l'eau disponible peut alors être utilisée. La relation entre l'eau disponible et l'eau utilisable peut donc être formulée comme suit :

$$\text{Eau utilisable} = \text{facteur de récolte} \cdot \text{eau disponible}$$

RÉSUMÉ

L'utilisation effective des ressources en eau utilisables pour la production de neige dépend également des infrastructures d'enneigement du domaine skiable. Les infrastructures (puissance de pompage, capacité de stockage, conduites) déterminent en effet si, dans quelle ampleur et à quel endroit l'eau utilisable peut être transformée en neige (eau accessible).

La dernière étape de l'analyse de la situation hydrologique d'un domaine skiable consiste à comparer l'eau utilisable ou accessible avec les besoins réels en eau. Ces derniers comprennent la quantité d'eau nécessaire pour l'enneigement technique aujourd'hui et à l'avenir.

La méthode développée ici permet d'effectuer cette comparaison pour différentes périodes, par exemple pour le futur proche ou le futur moyen. Elle permet en outre de prendre en compte de manière systématique différents scénarios climatiques, altitudes et phases d'extension prévues d'un domaine skiable.

Une gestion durable de l'eau comme objectif

La méthode élaborée pour le présent rapport fournit désormais aux entreprises de remontées mécaniques les bases nécessaires à l'analyse de leur situation hydrologique dans le but de mettre en place une gestion durable de l'eau.

Une gestion durable de l'eau implique de concilier les besoins en eau et l'eau accessible, aujourd'hui et à l'avenir. Deux paramètres essentiels doivent être pris en compte : d'une part, les changements au niveau de l'eau disponible et utilisable résultants des changements climatiques, d'autre part, l'équilibre entre les besoins en eau pour l'enneigement technique et les autres utilisations telles que l'approvisionnement en eau potable, l'agriculture ou les besoins des écosystèmes aquatiques.

Déroulement de l'analyse

La démarche proposée pour l'évaluation de la situation hydrologique actuelle et future est résumée ci-dessous.

	Données et informations requises	Démarche	Sources de données
Ressources en eau (eau disponible)	Aujourd'hui quelles sont les quantités d'eau disponibles dans les ruisseaux, les rivières et en provenance des sources ? Existe-t-il des réservoirs d'enneigement ? Quelles sont les dispositions à respecter en matière de débit résiduel ? Quels sont les besoins en eau des autres utilisations et de l'écosystème aquatique ?	Collecte et évaluation systématiques des informations existantes en coordination avec les autres usages de l'eau, dans le but d'obtenir une compréhension commune de la situation hydrologique actuelle.	Atlas hydrologique de la Suisse, données cantonales et nationales, données locales (communes, distributeurs d'eau, entreprises hydroélectriques, remontées mécaniques)
	Avenir à quels changements faut-il s'attendre en matière de disponibilité en eau ?	Transposition et application des projections de débit existantes à la zone étudiée.	Atlas hydrologique de la Suisse
Facteur de récolte et eau utilisable	Aujourd'hui pour calculer le facteur de récolte, des données à haute résolution (valeurs horaires) sur la température de l'air et l'humidité relative sont nécessaires. Le facteur de récolte permet de calculer la quantité d'eau utilisable.	Calcul de la température de bulbe humide (TBH) et détermination de la part d'heures par unité de temps (p. ex. mois) avec une TBH inférieure à une valeur seuil, qui indique si un enneigement technique est possible.	IMIS (SLF), MétéoSuisse, analyses spatiales à haute résolution du climat
	Avenir scénarios d'évolution de la température et de l'humidité de l'air	Bonne base de données pour la température ; informations limitées sur l'évolution de l'humidité – hypothèses nécessaires.	Scénarios CH2018/CH2025, atlas web, Atlas hydrologique de la Suisse

	Données et informations requises	Démarche	Sources de données
Infrastructures (eau accessible)	Aujourd'hui les infrastructures d'enneigement suffisent-elles pour répartir efficacement l'eau utilisable dans le domaine skiable ?	Analyse SWOT des infrastructures	Informations fournies par le domaine skiable
	Avenir quelles adaptations sont nécessaires pour assurer l'enneigement ? Des réservoirs sont-ils nécessaires et pourraient-ils également couvrir les besoins en eau d'autres usagers ?	Planification des infrastructures	Informations fournies par le domaine skiable, le cas échéant en collaboration avec d'autres acteurs concernés
Besoins en eau (eau nécessaire)	Aujourd'hui quels sont les besoins en eau pour l'enneigement technique ? Quelle est l'ampleur des fluctuations des besoins d'une année à l'autre ? Les besoins en eau ont-ils toujours pu être couverts jusqu'à présent ?	Analyse SWOT des infrastructures	Informations fournies par le domaine skiable
	Avenir quel sera l'impact des éventuels projets d'extension sur les besoins en eau ?	Planification des infrastructures	Informations fournies par le domaine skiable

Informations à fournir par les remontées mécaniques pour l'analyse

Toute analyse fiable de la gestion de l'eau par les exploitants de remontées mécaniques repose sur des données et des faits concernant le système d'enneigement existant et les éventuels projets d'extension. Conformément aux tableaux ci-dessus, les informations suivantes à fournir par les exploitants des remontées mécaniques sont indispensables (voir encadré).

Informations nécessaires pour une analyse et des prévisions fiables et fondées

Enneigement

- Sources d'approvisionnement en eau (eaux souterraines, eau potable, sources, ruisseaux) – quantités autorisées et, le cas échéant, quantités supplémentaires potentielles
- Pistes : superficie (y compris les tracés), altitude, proportion enneigée, hauteur de neige souhaitée
- Le cas échéant, plans d'extension avec superficie supplémentaire future
- Utilisation de l'eau : quantité totale, quantité par hectare, période d'enneigement, capacité d'enneigement (litres par seconde)
- Réservoirs (réservoirs d'enneigement, utilisation conjointe d'autres lacs de rétention)

Autres usages de l'eau dans la région

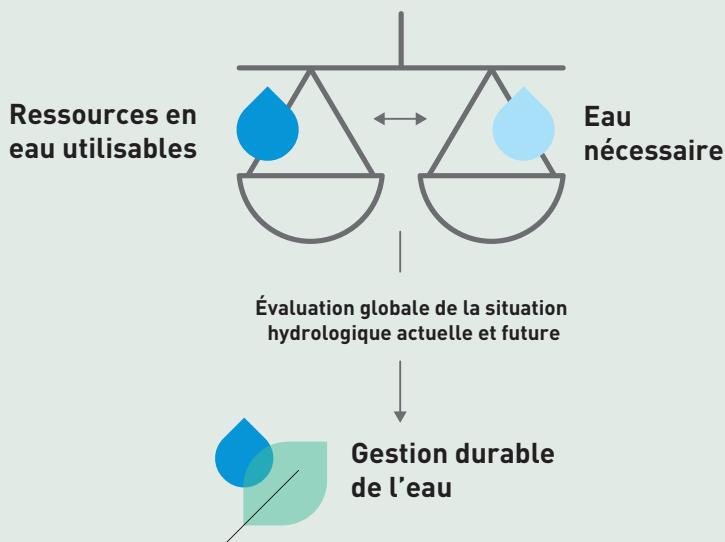
- Autres usages de l'eau dans la région faisant appel aux mêmes ressources (p.ex. eau potable, irrigation, énergie hydraulique)
- Besoins en eau pour l'écologie et bilan hydrique du paysage

Présentation générale du système technique

- Une compréhension générale du système d'enneigement est nécessaire pour une analyse pertinente
-

Synthèse

Le graphique suivant illustre la façon de réunir les différents modules d'analyse en vue de permettre une évaluation globale fondée et de poser les bases d'une gestion durable de l'eau.



Comparaison des domaines skiables de Bivio et Belalp

Le tableau suivant présente une comparaison et une évaluation des deux domaines skiables de Bivio et Belalp sur la base de la méthode développée ci-dessus.



Critère	Bivio	Belalp
Situation géographique du domaine skiable	Canton des Grisons. 1800 à 2600m d'altitude	Canton du Valais. 2000 à 3100m d'altitude
Températures moyennes	Nov. : -4.6 °C, Déc. : -6.4 °C (à 2430m d'altitude)	Nov. : -2.7 °C, Déc. : -5.5 °C (à 2550m d'altitude)
Longueur des pistes, dont enneigées techniquement	27 km, environ 10 %	44.8 km, environ 25 %
Société exploitante	Bivio Sportanlagen AG	Bergbahnen Belalp AG
Lac de rétention existant ; volume utile	Non	Oui, 100 000 m³
Bassin versant	Valletta : 10.5 km² ; Julia : 46.8 km²	Très petit, car le domaine skiable se trouve dans la partie supérieure d'un bassin versant
Prélèvement d'eau	Captage du ruisseau de Valletta (30 l/s), trop-plein de la source d'approvisionnement en eau potable (20 l/s), captage Julia (60 l/s, au bénéfice d'une concession, mais non utilisé). Total : 110 l/s	Lac de rétention de Hohbiel, rempli pendant la saison estivale principalement par la fonte des neiges (100 000 m³). Ressources supplémentaires (80 000 m³) provenant des affluents hivernaux du lac de rétention, de l'eau du bisse de Riederer et de l'eau de source
Disponibilité des données	Très bonne	Minimale
Coopération entre les acteurs	Très bonne	Que partiellement coordonnés
Eau disponible aujourd'hui	50 000 m³. Eau disponible en quantité suffisante ; la quantité concédée est largement supérieure aux besoins	150 000–200 000 m³. Tout juste suffisante pour couvrir les besoins actuels
Eau disponible dans un futur proche, RCP 8.5	Nov. : moins de 5 % ; Déc. : env. +16 %	Nov. : inchangée ; Déc. : +5 à +10 %

Critère	Bivio	Belalp
Eau disponible dans un futur moyen, RCP 8.5	Nov. : env. +12% ; Déc. : env. +28 %	Nov. : inchangée ; Déc. : +5 à +10 %
Facteurs de récolte médians aujourd'hui	Nov. : 0.50 ; Déc. : presque 1	Nov. : 0.70 ; Déc. : 0.90
Facteurs de récolte médians dans un futur proche, RCP 8.5	Nov. : 0.30 ; Déc. : 0.90	Nov. : 0.64 ; Déc. : 0.78
Facteurs de récolte médians dans un futur moyen, RCP 8.5	Nov. : 0.10 ; Déc. : 0.70 .	Nov. : 0.56 ; Déc. : 0.85
Eau accessible	Infrastructures existantes : enneigement max. 30 l/s	Infrastructures optimisées pour l'exploitation actuelle
Eau nécessaire aujourd'hui	25 000–30 000 m ³	180 000–200 000 m ³
Eau nécessaire, extension	36 000–67 000 m ³	360 000–400 000 m ³
Consommation d'eau spécifique	4150 m ³ /(ha·année)	4800 m ³ /(ha·année)
Évaluation de la situation	Bonnes conditions préalables pour un enneigement durable. Lac de rétention non nécessaire ; investissements ciblés dans les infrastructures requis	Enneigement également possible à l'avenir. Fenêtres météorologiques favorables plus rares à basse altitude. Extension uniquement réalisable avec un réservoir supplémentaire

Comparaison des conditions générales pour l'enneigement technique à Bivio et Belalp

Remarques

Futur proche : période 2020–2049 Futur moyen : période 2045–2074

RCP8.5 : scénario d'émissions d'un monde dans lequel aucune mesure d'atténuation des changements climatiques n'est mise en œuvre. Il s'agit du pire scénario parmi les trois scénarios les plus couramment utilisés dans ce type d'études (RCP2.6 : avec atténuation conséquente des changements climatiques ; RCP4.5 : atténuation limitée des changements climatiques). Il s'agit donc d'une estimation plutôt pessimiste. Cependant, nous nous trouvons actuellement sur une trajectoire d'émissions qui se situe entre RCP4.5 et RCP8.5. Le scénario RCP8.5 ne peut donc pas être considéré comme irréaliste.

1 Introduction

1.1 Situation initiale et objectifs

Le réchauffement climatique pose des défis considérables aux domaines skiables suisses. Les quantités de neige naturelle diminuent, rendant de plus en plus incertaines les recettes de la période de Noël, si importantes pour ce secteur économique. En conséquence, la part des pistes enneigées techniquement a considérablement augmenté, passant de 1 % en 1990 à 20 % en 2005, puis à 54 % en 2024. Aujourd'hui, environ 13 000 hectares de pistes sont enneigés techniquement (Remontées Mécaniques Suisses 2024). Les exploitants des domaines skiables qualifient cette évolution d'« indispensable » et de « vitale » (Abegg 2023).

Compte tenu du réchauffement climatique et de l'importance croissante de l'enneigement technique, l'eau devient de plus en plus une ressource clé pour le tourisme hivernal. La question se pose donc de savoir si les ressources en eau disponibles actuelles et futures sont suffisantes pour assurer l'enneigement technique. En outre, la hausse des températures réduit les périodes au cours desquelles les conditions sont favorables à la production technique de neige. De grandes quantités d'eau doivent ainsi être disponibles en peu de temps.

C'est dans ce contexte que Remontées Mécaniques Suisses a lancé le projet **Gestion de l'eau dans les domaines skiables**. Celui-ci a pour objectif principal de déterminer si les ressources en eau disponibles sont suffisantes, aujourd'hui et à l'avenir, pour assurer l'enneigement technique. Deux questions subsidiaires sont au centre de cette réflexion :

- Le réchauffement climatique, associé aux besoins en eau croissants des domaines skiables, entraîne-t-il des conflits d'utilisation, que ce soit avec d'autres usages de l'eau ou en lien avec les exigences écologiques ?
- Quelles approches et stratégies permettent de relever ces défis et d'éviter les conflits ?

1.2 Structure et contenu du rapport final

Le projet **Gestion de l'eau dans les domaines skiables** a pour objectif de montrer comment les besoins en eau des domaines skiables peuvent être couverts à long terme, de manière durable et en tenant compte de toutes les utilisations de l'eau. Afin d'analyser la question de l'eau dans une optique pratique, deux cas concrets ont été étudiés. Ce faisant, la situation actuelle, les évolutions climatiques futures et les projets d'extension des domaines skiables ont été pris en compte. Les domaines skiables de Bivio et Belalp, choisis sur la base d'une enquête menée par Remontées Mécaniques Suisses, ont servi de cas d'étude.

Le présent rapport compile d'une part les principaux résultats et conclusions de ces études de cas. D'autre part, ceux-ci sont synthétisés dans la partie introductive sous forme de considérations générales. Ces considérations générales ont pour but d'aider les entreprises de remontées mécaniques à mettre en place une gestion durable de l'eau. Les fondements d'une telle gestion sont décrits dans le chapitre suivant.

2 Fondements d'une gestion durable de l'eau dans les domaines skiables

2.1 Bases méthodologiques

L'objectif d'une gestion durable de l'eau est de garantir la satisfaction des besoins en eau à long terme, dans le respect de l'environnement et en tenant compte des besoins de tous les usages de l'eau. L'approche est donc holistique et globale. Même si dans le cas présent, l'accent est mis sur les sports de neige, les autres usages de l'eau sont toujours pris en considération.

Comme le montre la [figure 1](#), quatre aspects liés à l'eau doivent être pris en compte en vue d'évaluer de manière fondée la situation hydrologique actuelle et future et de développer des solutions viables pour une gestion durable de l'eau.

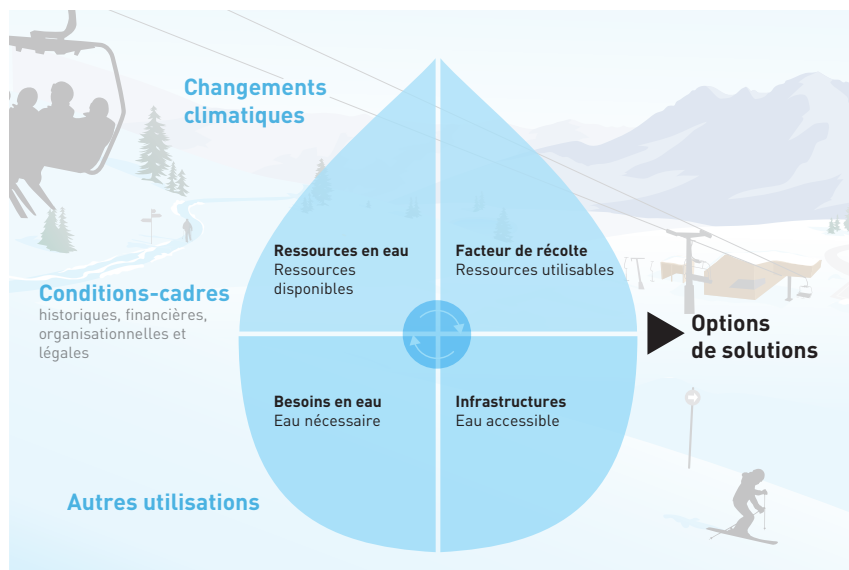


Fig. 1 : Éléments de l'analyse

1. Les **Ressources disponibles** décrivent la quantité d'eau disponible aujourd'hui et à l'avenir pour l'enneigement technique. La littérature spécialisée parle à cet égard de ressources en eau.
2. Cependant, au cours de la période durant laquelle l'enneigement technique est généralement pratiqué, c'est-à-dire principalement en novembre et en décembre, l'eau disponible ne peut être utilisée que si les conditions de température et d'humidité permettent la production de neige ou, autrement dit, si les conditions météorologiques permettent une « récolte » de l'eau. Pour décrire ce rapport et déterminer les **ressources en eau utilisables**, la notion de « facteur de récolte » a été développée.
3. Toutefois, la capacité à utiliser réellement les ressources en eau disponibles pour la production de neige dépend des infrastructures d'enneigement du domaine skiable. Celles-ci déterminent si, dans quelle mesure et à quel endroit l'eau utilisable est accessible (→ **eau accessible**).
4. Enfin, les **besoins** réels **en eau**, c'est-à-dire la quantité d'eau nécessaire à l'enneigement technique, doivent être connus, tant pour le présent que pour l'avenir, en fonction des projets d'extension du domaine skiable.

Une gestion durable de l'eau met en adéquation les besoins en eau avec l'eau disponible, utilisable et accessible. Deux conditions cadres essentielles sont à prendre explicitement en compte : d'une part, les fluctuations des quantités d'eau disponibles et utilisables dues aux changements climatiques, et d'autre part, l'équilibre entre les besoins en eau pour l'enneigement technique et les autres utilisations telles que l'approvisionnement en eau potable, l'agriculture ou les besoins des écosystèmes aquatiques.

Le développement d'une telle gestion de l'eau nécessite une analyse globale du système. Pour ce faire, il est important de connaître l'évolution historique du domaine skiable (dans l'espace et dans le temps) ainsi que le contexte financier, organisationnel et juridique de son développement.

2.2 Ressources en eau (eau disponible)

2.2.1 Analyse de la situation actuelle

En matière d'eau disponible, on distingue l'eau provenant des eaux superficielles – c'est-à-dire des ruisseaux, des rivières et, dans certains cas, de lacs naturels – et l'eau provenant des eaux souterraines ou de sources. À Bivio et Belalp, plus de 80 % de l'eau utilisée pour l'enneigement technique provient des eaux superficielles. À la différence de Belalp, le domaine de Bivio ne dispose d'aucun réservoir permettant de stocker temporairement l'eau.

Les données quantitatives sont la clé pour une appréhension précise de la situation actuelle. Plus l'eau disponible aujourd'hui dans une région est quantifiée avec précision, plus les prévisions pour l'avenir sont fiables. Diverses études montrent toutefois que la disponibilité en eau au niveau local et régional est souvent insuffisamment documentée. Les raisons en sont multiples :

- Absence de mesures ;
- Nombre limité de points de mesure dans l'espace et/ou dans le temps, dont la représentativité n'est pas garantie ou n'est pas claire ;
- Les mesures existantes ne sont pas documentées ou archivées de manière systématique, ce qui rend l'accès aux données difficile ou laborieux ;
- Les mesures existantes couvrent des séries chronologiques trop courtes et/ou présentent une résolution temporelle insuffisante.

Une collecte de données fiable constitue donc une première étape décisive pour assurer l'approvisionnement en eau nécessaire à l'enneigement technique. En effet, plus les séries de mesures sont longues, plus elles sont utiles. Ainsi, elles permettent de mieux cerner la variabilité interannuelle du volume d'eau disponible ainsi que de mieux évaluer la disponibilité en eau au cours d'années particulièrement sèches. Le passé, en particulier les années sèches dans une série de mesures, offre toujours une bonne approximation (proxy) des développements futurs.

Les deux domaines examinés dans les études de cas se distinguent clairement en termes de disponibilité des données : pour Bivio, de nombreuses données sont disponibles. Le gros du travail a consisté à rassembler ces données, qui étaient stockées à différents endroits et dans différents formats, et à les transposer dans un format comparable. Le soutien important des spécialistes sur place a considérablement facilité cette étape chronophage.

À Belalp, en revanche, les données disponibles étaient dans l'ensemble plutôt pauvres. Il existait certes des données sur les débits de source, mais celles-ci ne permettaient qu'une estimation approximative des conditions moyennes. Ces données ont été complétées par des mesures provenant d'une source située dans la vallée voisine à l'ouest (source de Mund dans la vallée de Gredetsch), notamment afin de tenter d'estimer la saisonnalité des débits de source.

Aucune donnée n'était disponible sur les débits des eaux superficielles à Belalp. Il était donc impossible de développer un modèle hydrologique fiable permettant de simuler le régime d'écoulement. Des analyses hydrologiques ont toutefois révélé que les données de débit provenant d'un bassin versant voisin – la Saltina au-dessus de Brigue – pouvaient être utilisées pour effectuer une première estimation des ressources en eau disponibles.

La transparence, c'est-à-dire la divulgation et la mise à disposition des données, est un principe fondamental de la collecte de données. Pourtant, des lacunes importantes subsistent dans ce domaine. Le présent rapport illustre bien à quel point la collecte et la transparence des données sont importantes de façon générale. Il convient donc à l'avenir de sensibiliser davantage à cette question. Seule une base de données commune et transparente – non seulement en ce qui concerne l'eau disponible, mais aussi l'eau utilisable et l'eau nécessaire – permettra d'assurer la couverture des besoins en eau à long terme.

2.2.2 Analyse des évolutions futures

Nous pouvons partir du principe que des changements interviendront à l'avenir dans le régime hydrologique de l'espace alpin. La principale cause en est l'augmentation des températures, qui devrait très probablement se poursuivre. Cette augmentation a essentiellement deux effets sur l'évolution de débits. Une hausse des températures de 1 °C entraîne une élévation de l'isotherme du zéro degré d'environ 200 mètres, de sorte qu'en hiver, la pluie remplace la neige à des altitudes de plus en plus élevées. Ces précipitations s'écoulent directement, ce qui entraîne une augmentation des débits hivernaux. Dans le même temps, tous les modèles climatiques indiquent que les précipitations hivernales continueront d'augmenter (Climate Services (NCCS) 2018). Au printemps, la fonte des neiges plus précoce due à la hausse des températures, combinée à l'augmentation des précipitations, entraîne une augmentation des débits. La diminution des débits estivaux est importante et également due à la hausse des températures : les débits liés à la fonte des neiges prennent fin plus tôt qu'auparavant, tandis que l'évapotranspiration augmente et « retire » de l'eau aux débits. Qui plus est, les précipitations estivales diminuent. La baisse marquée des débits se poursuit également au cours des mois d'automne.

Dans une analyse portant sur l'ensemble de la Suisse, Mülchi et al. (2021) ont étudié les effets des changements climatiques sur les débits. La [figure 2](#) est tirée de cette étude. Elle montre comment les débits mensuels moyens évolueront d'ici la fin du siècle par rapport à la période de référence (1981–2010), selon les deux scénarios d'émissions RCP2.6 (atténuation conséquente des changements climatiques) et RCP8.5 (sans atténuation des changements climatiques). Il en ressort une nette « opposition » entre une diminution des débits estivaux et une augmentation des débits hivernaux.

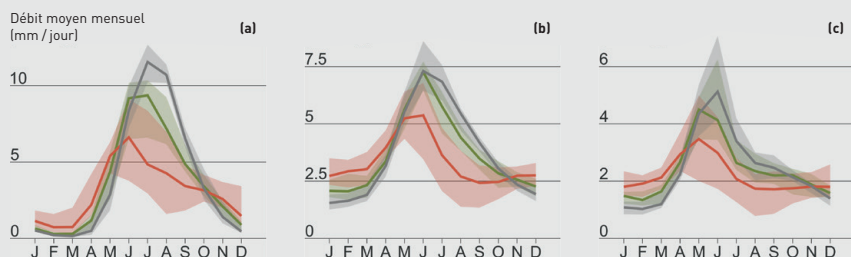


Fig. 2: Évolution des débits moyens mensuels dans les bassins versants du Rosegbach (a), de la Kander (b) et de la Plessur (c). Les lignes épaisses indiquent la médiane de tous les modèles pour la période de référence (gris), pour 2085 sous RCP2.6 (vert) et pour 2085 sous RCP8.5 (rouge). La zone ombrée montre la fourchette de valeurs pour tous les modèles (source : Mülchi et al. (2021)).

La [figure 2](#) illustre en outre le rôle des scénarios d'émissions dans l'évolution des débits. On distingue généralement trois scénarios :

RCP2.6 – Atténuation conséquente des changements climatiques

Des mesures d'atténuation des changements climatiques sont prises. Une baisse immédiate des émissions entraîne un arrêt de la hausse des gaz à effet de serre dans l'atmosphère d'ici 20 ans environ. Les objectifs de l'Accord de Paris de 2016 sont atteints.

RCP4.5 – Atténuation limitée des changements climatiques

Les émissions de gaz à effet de serre sont endiguées, mais leur teneur dans l'atmosphère augmente encore pendant 50 ans. L'objectif de 2°C n'est pas atteint.

RCP8.5 – Pas d'atténuation des changements climatiques

aucune mesure d'atténuation des changements climatiques n'est prise. Les émissions de gaz à effet de serre sont en constante augmentation.

Les effets sur l'évolution des débits sont considérables (cf. Mülchi et al. 2021). À noter que l'évolution globale actuelle correspond à une trajectoire d'émissions comprise entre RCP4.5 et RCP8.5. En nous concentrant ci-après sur le scénario RCP8.5, nous délimitons pour ainsi dire la limite supérieure du développement possible.

Afin d'illustrer l'ampleur des changements attendus en matière de débits dans la région alpine, nous avons sélectionné et évalué les bassins versants situés dans les Alpes à partir de l'étude de Mülchi et al. (2021) (cf. [figure 3](#)). En guise d'horizon temporel, nous avons choisi la période 2045-2074 (futur moyen). Les résultats sont présentés dans la [figure 3](#) ci-dessous.

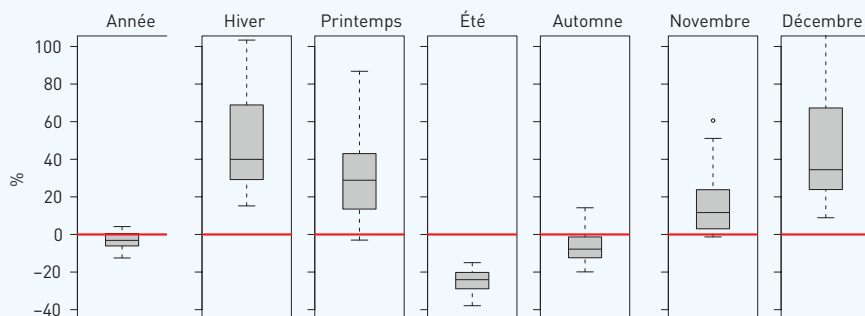


Fig. 3: Amplitude (boxplots)¹ des changements de débits mensuels en pourcentage pour le futur moyen (2045–2074) par rapport à la période de référence 1991–2010 sous RCP8.5, sur la base de 19 bassins versants alpins [source des données : Mülchi et al. (2021)].

En ce qui concerne l'eau disponible pour l'enneigement technique, les points suivants peuvent être déduits de la [figure 3](#) :

1. Au cours des mois de novembre et de décembre, particulièrement importants pour l'enneigement technique, on peut s'attendre à une amélioration de la situation actuelle en termes d'eau disponible. En moyenne, il y aura plus d'eau disponible pendant ces deux mois qu'aujourd'hui.
2. Les domaines skiables équipés de réservoirs d'enneigement disposeront d'une plus grande quantité d'eau provenant de la fonte des neiges au printemps pour les remplir. Cela est d'autant plus important que les apports dans ces réservoirs diminueront fortement en été et en automne en raison de la fonte des neiges anticipée.

Il est difficile de transposer ces résultats au comportement des eaux souterraines ou des sources, car le volume de stockage et le temps de séjour dans le sous-sol peuvent modifier ces schémas. L'impact de l'augmentation des sécheresses estivales sur les débits des sources sera déterminant.

À noter également que le réchauffement climatique entraînera une augmentation de la température de l'eau, ce qui pourrait rendre nécessaire le refroidissement de l'eau utilisée pour l'enneigement technique.

¹ Un boxplot est une représentation graphique qui montre la distribution d'une variable numérique en un coup d'œil. La ligne horizontale noire indique la moyenne. La boîte grise contient 50% des valeurs.

2.3 Facteur de récolte et eau utilisable

Afin de déterminer la quantité d'eau effectivement utilisable, cette étude propose l'introduction de la notion de «facteur de récolte». Ce facteur décrit la part de l'eau disponible du point de vue hydrologique qui peut être utilisée pour l'enneigement. Cette utilisation n'est toutefois possible que lorsque la température du bulbe humide est inférieure ou égale à -2°C . La température de l'eau d'enneigement elle-même n'est pas prise en compte.

Le facteur de récolte joue un rôle essentiel compte tenu du réchauffement climatique. Pour le calculer, la part des heures par unité de temps (jour, mois) pendant lesquelles la température de bulbe humide est $\leq -2^{\circ}\text{C}$ est déterminée. Le facteur de récolte peut prendre des valeurs comprises entre 0 (l'eau disponible ne peut pas être utilisée pour la production de neige) et 1 (toute l'eau disponible peut être utilisée).

En multipliant la quantité d'eau disponible par le facteur de récolte, on obtient le volume d'eau utilisable pour l'enneigement technique :

$$V_{\text{util}} = \varepsilon \cdot V_{\text{dispo}}$$

Légende

V_{util} Volume d'eau utilisable

ε Facteur de récolte (valeur comprise entre 0 et 1)

V_{dispo} Volume d'eau disponible

Les données disponibles pour déterminer le facteur de récolte sont bonnes à très bonnes. Les stations IMIS du SLF (WSL – Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF 2025) forment un réseau dense de stations de mesure qui enregistrent les indicateurs nécessaires au calcul de la température de bulbe humide (température de l'air et humidité relative) avec une haute résolution temporelle depuis l'an 2000 environ (figure 4). Cela vaut aussi bien pour les stations de mesure du vent que pour celles mesurant la hauteur de neige.

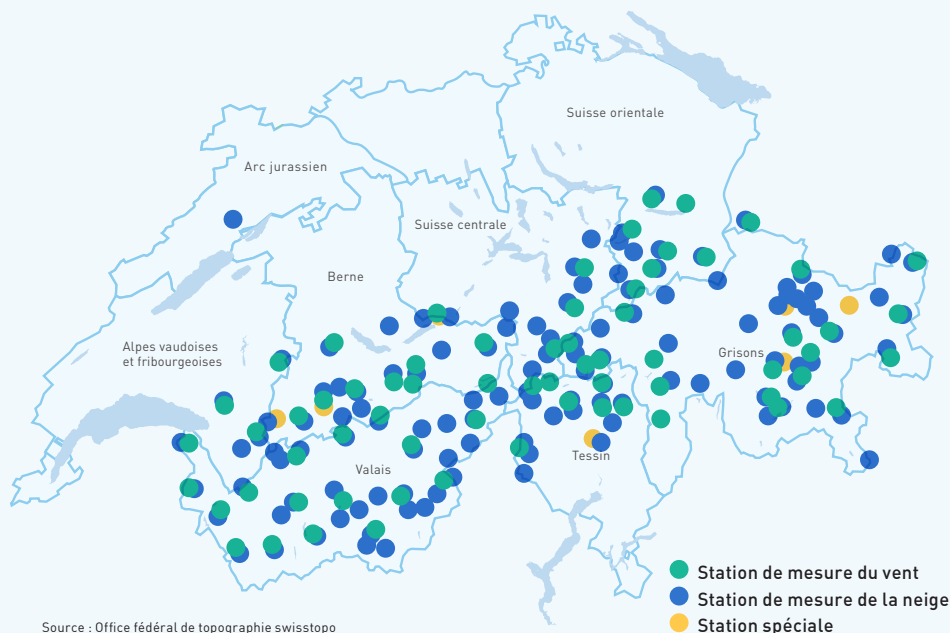


Fig. 4: Réseau des stations de mesure IMIS (source : WSL - Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF (2025))

Par définition, le facteur de récolte dépend de l'altitude. Pour déterminer le facteur de récolte pour une certaine plage d'altitude dans le domaine skiable, il faut donc convertir les températures de bulbe humide des stations de mesure (qui ne se rapportent qu'à l'altitude de la station) à d'autres niveaux d'altitude. La [figure 5](#) suivante en donne un exemple.

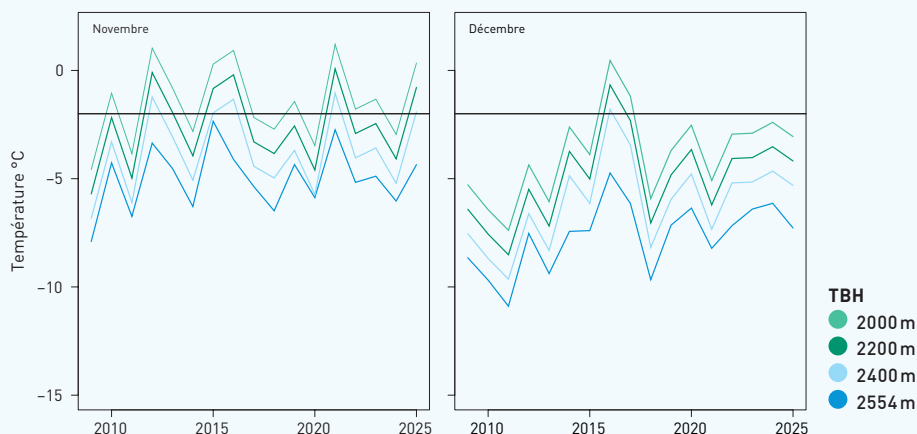


Fig. 5: Températures de bulbe humide (TBH) moyennes mensuelles converties à partir de la station BEL 2 située à 2554 m d'altitude pour les différents niveaux d'altitude du domaine skiable de Belalp.

Une approche pragmatique a été choisie pour la conversion de la température de bulbe humide : chaque valeur de température a été extrapolée à l'altitude correspondante en appliquant un gradient de $-0,6^{\circ}\text{C}$ par 100 m d'augmentation d'altitude resp. de $+0,6^{\circ}\text{C}$ par 100 m de diminution d'altitude.² La variation de l'humidité relative de l'air est difficile à estimer et n'est donc pas prise en compte dans la conversion. De cette manière, la température de bulbe humide a été déterminée à partir de la série chronologique ainsi obtenue pour une altitude donnée.

Une approche tout aussi pragmatique peut être adoptée pour estimer les effets des changements climatiques : les valeurs initiales de l'état de référence sont augmentées par paliers de $0,5^{\circ}\text{C}$. Cela permet d'estimer les facteurs de récolte pour des températures moyennes de l'air plus élevées (voir l'exemple du domaine skiable de Bivio dans la [figure 8](#)). Une telle analyse de sensibilité permet de déterminer la sensibilité du facteur de récolte à la température. Si l'on connaît en outre l'augmentation moyenne attendue de la température, le facteur de récolte peut également être estimé de manière plus spécifique (à titre d'exemple, voir le [tableau 3](#) pour le domaine skiable de Bivio).

² $0,6^{\circ}\text{C}$ par 100 mètres d'altitude correspondent au gradient de température vertical moyen en atmosphère libre.

2.4 Infrastructures (eau accessible)

Le niveau de développement technique d'un domaine skiable détermine quelles quantités d'eau sont accessibles à quel moment et sur quelles pistes et peuvent donc être transformées en neige. Il varie fortement d'un domaine skiable à l'autre et ne sera pas abordé plus en détail ici.

Un aspect décisif est de savoir si l'eau utilisable ne peut être prélevée que directement dans un cours d'eau ou si elle peut être stockée. À Bivio, les eaux superficielles et l'eau de source utilisables doivent être utilisées directement, car aucun réservoir intermédiaire (réservoir d'enneigement) n'est disponible. L'accessibilité de l'eau est donc limitée par la capacité de pompage (30 l/s).

Les réservoirs d'eau (réservoirs d'enneigement, lacs naturels, lacs de barrage, réservoirs multifonctionnels) modifient considérablement la disponibilité, l'utilisabilité et l'accessibilité de l'eau. Si l'eau accumulée entre la fonte des neiges et l'automne peut être stockée, sa disponibilité augmente considérablement. L'eau peut alors être utilisée en grandes quantités lorsque les conditions sont particulièrement favorables à l'enneigement (p.ex. températures de bulbe humide très basses). Si ces réservoirs sont construits à haute altitude, au-dessus du domaine skiable ou dans sa partie supérieure, l'eau qu'ils contiennent est aisément accessible par gravité. Cependant, plus un réservoir est situé en altitude, plus son bassin versant naturel est petit, de sorte que dans de telles situations, l'eau doit souvent être pompée à partir de régions plus basses pour remplir le réservoir.

De manière générale, les réservoirs augmentent la flexibilité de l'enneigement technique. Il n'est donc pas surprenant qu'un grand nombre de ces réservoirs aient été construits ces dernières années. Thomas Kissling, Rolf Weingartner & Günther Vogt (2023) ont réalisé une analyse poussée des réservoirs d'enneigement. Cette étude examine les réservoirs sous différents angles et constitue une excellente base pour aborder les questions liées à la planification, la construction, l'entretien et l'utilisation multifonctionnelle des réservoirs d'enneigement. À l'avenir, l'importance des réservoirs est appelée à augmenter encore, car leur eau peut être utilisée de manière flexible et à des fins diverses (réservoirs multifonctionnels).

2.5 Besoins en eau (eau nécessaire)

Le volume d'eau nécessaire à l'enneigement technique résulte de la superficie de piste enneigée (en hectares) et des besoins spécifiques en eau (en mètres cubes par hectare). Ces paramètres sont généralement connus et constituent la base d'une estimation fiable de la consommation future. Pour le domaine skiable de Bivio, des informations détaillées sont disponibles, qui permettent une appréciation détaillée des besoins en eau (figure 6). En revanche, pour le domaine de Belalp, seule la moyenne pluriannuelle de la consommation annuelle d'eau est documentée, mais aucune donnée n'était disponible concernant le volume d'eau utilisé sur une base journalière, ni sur les variations de la consommation d'eau d'une année à l'autre.

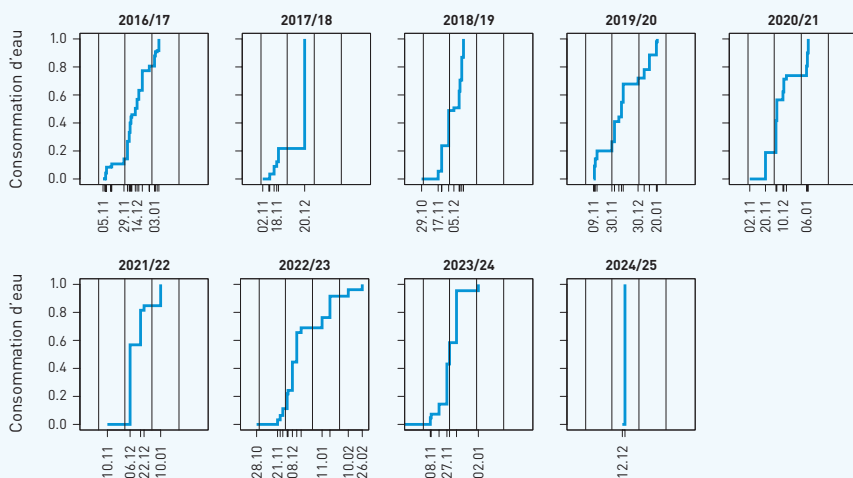


Fig. 6: Profils saisonniers de la consommation d'eau relative pour l'enneigement technique à Bivio, 1.0 : consommation totale.

Grâce aux équipements de mesure de haute qualité dont sont dotées les installations d'enneigement récentes, la plupart des domaines skiables disposent aujourd'hui de données précises sur leur consommation d'eau. Ces informations permettent une analyse différenciée et rendent possible l'estimation des quantités d'eau qui seront nécessaires à l'avenir sur la base des extensions planifiées. Il est ainsi possible de tenir compte de la variabilité interannuelle afin de garantir une planification durable et proche de la réalité.

2.6 Synthèse

L'analyse étendue prenant en compte toutes les formes pertinentes de l'eau (eau disponible, utilisable, accessible et nécessaire, cf. [figure 1](#)) constitue la base d'une évaluation finale des possibilités d'enneigement technique actuelles et futures, ainsi que de l'élaboration de pistes de solutions. Cette analyse repose sur une comparaison de la disponibilité en eau et de la quantité d'eau nécessaire, permettant ainsi une évaluation finale de la situation hydrologique en lien avec l'enneigement technique.

Eau disponible · facteur de récolte <—> eau nécessaire

Cette comparaison peut être effectuée en variant la période considérée (aujourd'hui, avenir) et le degré de développement de l'enneigement technique (aujourd'hui, projets d'extension). Le rapport entre eau utilisable et eau nécessaire montre dans quelle mesure les besoins en eau de l'enneigement technique peuvent potentiellement être couverts par l'eau utilisable. Le [chapitre 3.6](#) illustre le potentiel de cette comparaison à l'aide de l'exemple de l'étude de cas de Bivio. Elle permet une évaluation quantitative fondamentale de la situation actuelle et, en même temps, une évaluation des possibilités d'extension.

Enfin, le [chapitre 4.6](#) montre, à l'aide de l'exemple de l'étude de cas de Belalp, quelles options découlent de cette évaluation de la gestion de l'eau. Dans le cas présent, la construction d'un nouveau réservoir joue un rôle primordial. Sans un tel réservoir, l'extension de l'enneigement technique dans le domaine skiable de Belalp est fortement limitée en termes de ressources en eau.

Contrairement à Bivio, l'enneigement technique à Belalp est en concurrence avec d'autres usages de l'eau. Les autres usages présents dans le bassin versant du Chelchbach ont donc été explicitement pris en compte dans les analyses afin d'identifier les conflits d'objectifs et de les résoudre en se fondant sur une gestion durable de l'eau.

Dans le cadre du bilan global (geoformer igp SA&ecosfera 2025), un bilan de gestion de l'eau du bassin versant du Chelchbach a été établi pour chaque mois, c'est-à-dire que l'eau utilisable a été comparée à l'eau nécessaire sur une base mensuelle. Les besoins actuels et futurs ainsi que l'évolution future des ressources en eau ont été pris en compte. La [figure 7](#) en donne un exemple. La comparaison des valeurs moyennes des ressources et des besoins en eau permet d'évaluer la situation en matière de gestion de l'eau pour différentes périodes futures et différents scénarios.

Au mois de mai, les ressources en eau dans le bassin versant du Chelchbach (eau disponible) sont appelées à augmenter en raison des changements climatiques. L'une des principales raisons de cette augmentation est le début anticipé de la fonte des neiges. Les valeurs représentées dans la [figure 7](#) prennent également en compte les fluctuations des ressources en eau autour de la moyenne pluriannuelle observées aujourd'hui. En mai, l'enneigement technique est actuellement l'usage présentant le deuxième plus grand besoin en eau, après les besoins écologiques et avant l'irrigation. Cela s'explique par la nécessité de remplir le réservoir d'enneigement pendant la fonte des neiges. Les besoins futurs sont plus élevés que les besoins actuels (référence), car ils tiennent compte d'une extension de l'enneigement technique et donc d'une augmentation du volume de stockage.

Dans l'ensemble, la situation hydrologique moyenne actuelle et future au mois de mai est favorable. Les ressources en eau moyennes à long terme dépassent les besoins pour toutes les périodes considérées. La situation actuelle, pour laquelle des données à haute résolution temporelle sont disponibles, permet toutefois de constater que des pénuries peuvent survenir certaines années. Cela s'explique par les écarts plus ou moins importants entre les valeurs annuelles et la moyenne pluriannuelle. De telles fluctuations sont également à prévoir pour les périodes futures.

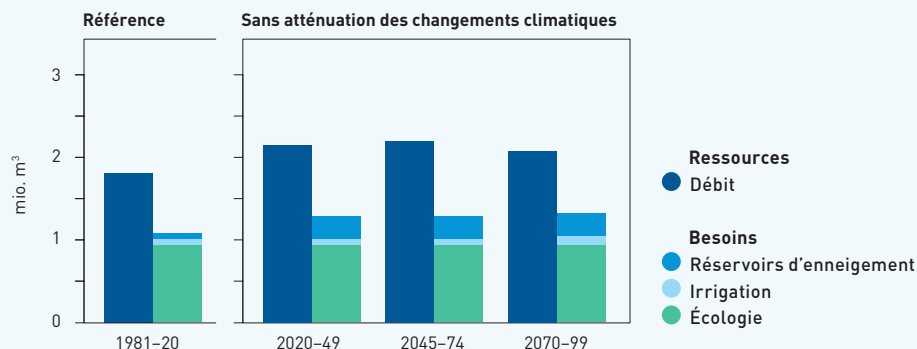


Fig. 7: Ressources en eau et besoins en eau dans le bassin versant du Chelchbach pour le mois de mai pour la période de référence [1981-2020] ainsi que pour le futur proche, moyen et lointain sur la base d'un scénario d'émissions sans atténuation des changements climatiques (RCP 8.5). Les ressources en eau correspondent au débit du Chelchbach. Les besoins en eau comprennent les prélèvements d'eau d'irrigation acheminée dans les bisses, la quantité d'eau nécessaire du point de vue écologique et les besoins pour l'enneigement technique. Au mois de mai, l'eau est utilisée pour remplir le réservoir existant de Hohbiel et – en cas d'extension – les futurs réservoirs.

3 Enseignements de l'étude de cas de Bivio

3.1 Brève description de Bivio

Bivio est situé dans l'Oberhalbstein (Surses) à environ 1800 m d'altitude. Le domaine skiable de Bivio est relativement élevé. Il s'étend entre 1800 et 2600 m d'altitude. L'essentiel du domaine est constitué de trois remontées mécaniques qui desservent environ 27 km de pistes. Sur le plan climatique, Bivio bénéficie d'une situation favorable avec un ensoleillement relativement important et des précipitations annuelles plutôt faibles pour des conditions alpines. Du point de vue de l'enneigement technique, il convient de souligner les faibles températures de l'air, avec des moyennes actuelles de -3°C en novembre et $-5,6^{\circ}\text{C}$ en décembre.

3.2 Ressources en eau (eau disponible)

Trois ressources en eau sont disponibles pour l'enneigement technique à Bivio : les prélèvements dans le ruisseau de Valletta (superficie du bassin versant jusqu'au point de prélèvement : $10,5\text{ km}^2$), dans la rivière Julia (47 km^2) et dans le réseau d'approvisionnement en eau potable de Bivio. Le domaine skiable détient une concession pour un débit total de 110 litres par seconde. Pour déterminer la quantité d'eau disponible pour l'enneigement technique dans les deux cours d'eau, il faut tenir compte du débit résiduel minimal prévu à l'article 31 de la loi sur la protection des eaux (loi sur la protection des eaux 2024)³. Même après déduction de ces débits résiduels, le débit effectivement disponible est généralement supérieur au volume de prélèvement autorisé par la concession. L'eau potable provient du trop-plein du réseau d'approvisionnement en eau potable (appelé ci-après « Rons ») et ne concurrence donc pas directement les besoins en eau potable de la population. Compte tenu des quantités importantes disponibles, cela ne devrait pas être le cas non plus à l'avenir. L'eau utilisée pour l'enneigement technique est normalement exploitée pour produire de l'électricité dans une turbine. La production d'électricité doit donc être temporairement réduite pendant l'enneigement technique. Ce conflit d'objectifs est toutefois de moindre importance, car il ne concerne que quelques heures par an. Comme le montre une analyse des données portant sur l'eau potable, le système d'approvisionnement en eau potable connaît des pertes considérables, probablement dues à des fuites. Bivio dispose donc actuellement d'un très grand potentiel en eau disponible. Celui-ci est même

³ L'art. 31 LEaux régit la manière de calculer le débit résiduel d'un cours d'eau.

appelé à augmenter à l'avenir pendant les mois de novembre et décembre. Des changements de débit moyens de l'ordre de grandeur suivant sont à prévoir en raison des changements climatiques (Mülchi et al. (2021) et Freudiger, Vis & Seibert (2021)) :

- **Débit en novembre**

- futur proche (2020-2049) : augmentation inférieure à 5 %,
- futur moyen (2045-2074) : augmentation de 12 %

- **Débit en décembre**

- futur proche (2020-2049) : augmentation de 16 %
- futur moyen (2045-2074) : augmentation de 28 %

3.3 Facteur de récolte et eau utilisable

Lorsque la température de bulbe humide est inférieure à -2°C , l'eau disponible peut être utilisée pour l'enneigement technique. Les analyses de tendance (basées sur des valeurs horaires) pour la période 1998–2024 montrent certes une augmentation significative de la température de bulbe humide à Bivio pendant les mois de novembre et décembre. Néanmoins, les valeurs restent jusqu'à présent inférieures au seuil de -2°C .

La [figure 8](#) montre la sensibilité du facteur de récolte au réchauffement climatique. Deux choses sont frappantes : la diminution du facteur de récolte à mesure que la température augmente et les différences entre novembre et décembre. En novembre, les effets du réchauffement climatique sont en outre beaucoup plus importants. Ainsi, pour une augmentation de la température de 3°C , le facteur de récolte passe d'environ 0,47 (valeur médiane de la période de référence) à moins de 0,1. Alors que dans les conditions actuelles, l'enneigement technique est possible pendant 47 % des heures de novembre, une augmentation de la température de 3°C ne permettrait plus de l'utiliser que pendant à peine 10 % des heures de novembre. Cela représenterait donc moins de 72 heures, contre 338 heures actuellement. Pour produire la quantité de neige nécessaire à Bivio, on table sur environ 100 à 120 heures d'enneigement. A l'avenir, il faudra donc exploiter efficacement les heures favorables au mois de novembre. Pour y parvenir, l'infrastructure d'enneigement devra être en mesure de transporter de grandes quantités d'eau vers les enneigeurs en peu de temps. Cela nécessitera une importante disponibilité en eau à court terme ainsi qu'une infrastructure adaptée.⁴ En décembre également, le facteur de récolte diminue avec le réchauffement climatique, mais la valeur médiane reste nettement supérieure à 0,5 même avec un réchauffement de $+3^{\circ}\text{C}$.

⁴ Pour replacer les résultats de l'analyse de sensibilité dans le contexte du réchauffement climatique et des scénarios d'émissions, veuillez vous reporter au chapitre final.

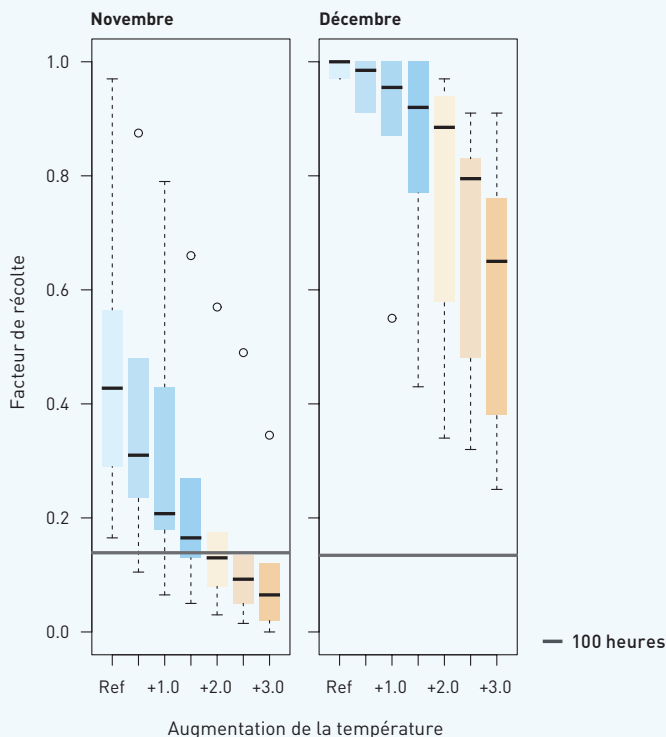


Fig. 8: Répartition des facteurs de récolte (boxplots) sur la période 2015 à 2020 dans le domaine skiable de Bivio pour la période de référence (Réf) et pour une augmentation de la température supposée de 0,5 à 3°C. Le facteur de récolte varie entre 0 et 1. Un facteur de récolte de 1 signifie que toute l'eau disponible au cours d'un mois peut être utilisée pour l'enneigement technique. La ligne horizontale noire indique la valeur médiane. La hauteur de la colonne colorée indique l'écart inter-quartile. Cette plage correspond aux 50 % des valeurs situées autour de la médiane. Les lignes pointillées couvrent le reste de la plage de dispersion des données. Les points signalent les valeurs extrêmes situées bien en dehors de cette plage. À Bivio, une durée d'enneigement de 100 heures permet de produire suffisamment de neige artificielle. Pour atteindre ce nombre d'heures, le facteur de récolte doit atteindre une valeur d'au moins 0,138 en novembre et d'au moins 0,134 en décembre. Les 100 heures sont représentées par une ligne horizontale dans le graphique.

Exemple de lecture pour le mois de novembre:

Avec une augmentation de la température de +1,0°C (3^e colonne), le facteur de récolte médian est de 0,21; les 50 % centraux des valeurs se situent entre 0,18 et 0,37. Il est donc possible de recourir à l'enneigement artificiel pendant plus de 100 heures presque chaque année.

3.4 Infrastructures (eau accessible)

À Bivio, la quantité d'eau disponible pour l'enneigement technique est actuellement limitée à 30 litres par seconde au maximum en raison de la capacité de la pompe d'enneigement. Le système actuel est uniquement conçu pour utiliser l'eau de la Valletta en combinaison avec le trop-plein de l'approvisionnement en eau potable. Pour pouvoir exploiter tout le potentiel de l'eau utilisable, et notamment pour pouvoir utiliser l'eau de la Julia, il faudrait considérablement développer les infrastructures. Un avantage inestimable réside dans le fait qu'aucun réservoir ne soit nécessaire à Bivio, car une quantité suffisante d'eau est directement utilisable ou peut être directement rendue disponible.

3.5 Besoins en eau (eau nécessaire)

Selon les informations fournies par les remontées mécaniques de Bivio, les besoins annuels en eau pour l'enneigement technique se situent actuellement entre 25 000 et 30 000 m³. Avec une consommation spécifique moyenne de 4150 m³ par hectare, Bivio affiche une consommation spécifique élevée par rapport à d'autres domaines skiables. L'objectif visé est une hauteur de neige de 50 cm. L'une des raisons de cette consommation spécifique élevée réside dans les pertes dues au vent qui, selon Marco Pontiggia, responsable de l'enneigement technique, représentent jusqu'à 40 % de la consommation d'eau.

Bivio possède des plans d'extension concrets pour l'enneigement de son domaine skiable avec des zones d'enneigement clairement définies. Ces zones ont permis de calculer les potentiels besoins en eau totaux pour chaque étape d'extension sur la base des besoins spécifiques actuels.

Étape	Superficie [ha]	Besoins en eau [m ³]
Aujourd'hui	6.44	26 384
Extension 3	8.88	36 380
Extension 4	11.30	46 295
Extension 5	16.55	67 804

Tab. 1: Extension planifiée et besoins en eau pour l'enneigement technique. La désignation des étapes d'extension reprend la terminologie choisie par Sportanlagen Bivio AG.

3.6 Évaluation finale Bivio

La comparaison entre la disponibilité en eau et les besoins en eau permet une évaluation finale de la situation hydrologique pour l'enneigement technique et sert de base à l'élaboration de solutions pour une gestion durable de l'eau. Pour ce faire, l'eau nécessaire est confrontée à l'eau utilisable.

Le [tableau 2](#) donne un aperçu de la situation hydrologique au 24 décembre, c'est-à-dire au début de la haute saison. Il présente les ressources en eau utilisables cumulées jusqu'à cette date (cf. colonne Ressources), différenciées d'une part selon les différentes sources d'eau et leurs combinaisons et d'autre part selon l'état actuel (+0°C) et différentes conditions climatiques futures en fonction de l'ampleur du réchauffement climatique. L'eau utilisable est comparée aux besoins en eau des différentes étapes d'extension (cf. colonnes Extension). L'extension 2 correspond à l'état actuel. Les ressources en eau sont exprimées en pourcentage des besoins en eau. Une valeur positive indique que l'eau utilisable dépasse en moyenne les besoins. Pour faciliter la lecture et l'interprétation du tableau, les résultats sont mis en évidence par des couleurs (voir ci-dessous). Les valeurs présentées dans ce tableau ne tiennent pas compte de l'aspect de l'eau accessible, c'est-à-dire de la question de savoir si les infrastructures techniques sont suffisantes pour acheminer l'eau utilisable vers les installations d'enneigement.

Le tableau présente donc les résultats d'une analyse de sensibilité intégrant des températures moyennes modifiées et différentes étapes d'extension des installations d'enneigement des pistes. Sur la base des connaissances actuelles, nous anticipons le réchauffement moyen suivant à Bivio :

- Futur proche (2020–2049): +1 °C
- Futur moyen (2045–2074): +2 °C
- Futur lointain (2070–2099): +3 °C

Ces valeurs permettent une appréciation encore plus précise du contenu du [tableau 2](#). Ci-dessous, le contenu du [tableau 2](#) est interprété du point de vue de l'eau utilisable provenant des différentes ressources.

3 ENSEIGNEMENTS DE L'ÉTUDE DE CAS DE BIVIO

Scénario	Ressources	Extension			
		2	3	4	5
Valletta +0°C	63407	140.0	74.0	37.0	-6.0
Valletta +0.5°C	58230	121.0	60.0	26.0	-14.0
Valletta +1.0°C	52900	101.0	45.0	14.0	-22.0
Valletta +1.5°C	49089	86.0	35.0	6.0	-28.0
Valletta +2.0°C	45227	71.0	24.0	-2.0	-33.0
Valletta +2.5°C	42151	60.0	16.0	-9.0	-38.0
Valletta +3.0°C	39010	48.0	7.0	-16.0	-42.0
Valletta et Rons +0°C	112829	328.0	210.0	144.0	66.0
Valletta et Rons +0.5°C	103256	291.0	184.0	123.0	52.0
Valletta et Rons +1.0°C	93728	255.0	158.0	102.0	38.0
Valletta et Rons +1.5°C	86550	228.0	138.0	87.0	28.0
Valletta et Rons +2.0°C	79562	202.0	119.0	72.0	17.0
Valletta et Rons +2.5°C	73758	180.0	103.0	59.0	9.0
Valletta et Rons +3.0°C	67949	158.0	87.0	47.0	0.0
Valletta et Julia +0°C	170070	545.0	367.0	267.0	151.0
Valletta et Julia +0.5°C	154950	487.0	326.0	235.0	129.0
Valletta et Julia +1.0°C	140435	432.0	286.0	203.0	107.0
Valletta et Julia +1.5°C	128883	388.0	254.0	178.0	90.0
Valletta et Julia +2.0°C	118117	348.0	225.0	155.0	74.0
Valletta et Julia +2.5°C	108743	312.0	199.0	135.0	60.0
Valletta et Julia +3.0°C	98582	274.0	171.0	113.0	45.0
Valletta, Rons et Julia +0°C	267252	913.0	635.0	477.0	294.0
Valletta, Rons et Julia +0.5°C	243492	823.0	569.0	426.0	259.0
Valletta, Rons et Julia +1.0°C	220683	736.0	507.0	377.0	225.0
Valletta, Rons et Julia +1.5°C	202530	668.0	457.0	337.0	199.0
Valletta, Rons et Julia +2.0°C	185613	604.0	410.0	301.0	174.0
Valletta, Rons et Julia +2.5°C	170882	548.0	370.0	269.0	152.0
Valletta, Rons et Julia +3.0°C	154915	487.0	326.0	235.0	128.0

Conditions ...

- **très favorables** : dans la grande majorité des cas, l'eau utilisable permet chaque année de couvrir les besoins en eau.
- **plutôt favorables** : l'eau utilisable est généralement suffisante pour couvrir les besoins. La situation peut toutefois devenir critique certaines années.
- **critiques** : pour une année moyenne, les besoins en eau et l'eau utilisable sont du même ordre de grandeur.
- **insuffisantes** : les besoins ne peuvent en général pas être couverts.

Tab. 2: Situation au 24 décembre. Ressources en m³; autres colonnes en%. Pour le code couleur, voir dans le texte.

Exemple de lecture : dans la situation actuelle (Valletta +0°C, extension 2), l'eau de la Valletta (63407 m³) suffit largement (●) pour couvrir les besoins en eau de l'enneigement technique.

Valletta

La situation actuelle est décrite par la combinaison Valletta +0°C/extension 2. L'eau utilisable est aujourd'hui largement suffisante pour couvrir les besoins de l'enneigement technique. Si l'on renonçait à une nouvelle extension de l'enneigement technique, celui-ci pourrait être maintenu malgré le réchauffement climatique, avec un approvisionnement en eau utilisable toujours suffisant dans un futur proche. Même dans un futur moyen et lointain, la quantité d'eau utilisable sera en moyenne supérieure aux besoins en eau de l'enneigement technique. Il faut toutefois s'attendre à certaines années critiques. Une extension supplémentaire de l'enneigement technique du domaine skiable reposant uniquement sur l'utilisation de l'eau de la Valletta n'est possible que dans une mesure limitée. Pour le futur proche, la quantité d'eau disponible est toutefois encore suffisante pour permettre une extension supplémentaire correspondant à l'étape 3.

Valletta et Rons

Cette combinaison consiste à utiliser l'eau provenant de la Valletta et du trop-plein de l'approvisionnement en eau potable (Rons). Comme le montre le [tableau 2](#), cette augmentation modérée des ressources en eau par rapport à aujourd'hui suffit déjà à assurer l'enneigement technique, du moins à moyen terme, même en cas d'extension supplémentaire des surfaces enneigées. La combinaison Valletta et Rons est non seulement la solution la plus évidente d'un point de vue technique, mais aussi la plus judicieuse d'un point de vue stratégique. Cette combinaison permettra, dans un futur moyen, de disposer d'une quantité d'eau utilisable suffisante pour permettre la mise en œuvre de l'étape 3 et, dans une large mesure, également de l'étape 4. Néanmoins, et cela n'a pas été examiné en détail ici, la situation devrait être réévaluée en cas d'augmentation importante des besoins en eau potable.

Valletta et Julia

Avec cette combinaison, la quantité d'eau utilisable est suffisante également à long terme. Bien que cette combinaison fournisse suffisamment d'eau à long terme, la variante suivante est à privilégier en raison de l'intégration technique existante de l'eau potable de Rons.

Valletta, Rons et Julia

Les lignes inférieures du tableau (Valletta, Rons et Julia) décrivent la situation dans laquelle le domaine skiable utiliserait la totalité du volume d'eau concédé. Fait remarquable, toutes les cases présentent des conditions ● «très favorables». En d'autres termes, avec des prélèvements dans la Valletta et la Julia ainsi que dans l'eau potable de Rons, l'avenir du domaine skiable de Bivio est assuré à long terme, même dans le contexte du réchauffement climatique, à condition que les adaptations infrastructurelles nécessaires soient réalisées.

Évaluation

Aujourd'hui comme à l'avenir, le domaine skiable de Bivio bénéficie de très bonnes conditions et de la flexibilité nécessaire permettant d'assurer l'enneigement technique dans le cadre d'une gestion durable de l'eau. Des investissements ciblés dans les infrastructures d'enneigement sont toutefois nécessaires en vue de rendre l'eau utilisable accessible et donc de pouvoir l'utiliser de manière optimale pour l'enneigement. Concrètement, il s'agit d'étendre le réseau de conduites afin de pouvoir acheminer de plus grandes quantités d'eau vers le domaine skiable. En revanche, l'aménagement d'un réservoir d'enneigement n'est pas nécessaire.

4 Enseignements de l'étude de cas de Belalp

4.1 Brève description de Belalp

Le domaine skiable de Belalp est situé dans la commune de Naters, dans le canton du Valais, à une altitude comprise entre 2000 et 3100 m. La zone concernée aujourd'hui par l'enneigement technique s'étend entre 2000 et 2600 m d'altitude.

4.2 Ressources en eau (eau disponible)

Le réservoir de Hohbiel, achevé en 2010, constitue l'élément central de l'approvisionnement en eau pour l'enneigement technique. Il a une capacité de stockage de près de 100 000 m³ et est alimenté par des affluents naturels. En moyenne, il est déjà complètement rempli début juin. Le bassin versant correspondant couvre environ 0,65 km². En plus de l'eau provenant du réservoir, l'enneigement technique est assuré par l'eau de source provenant de l'approvisionnement en eau potable de Belalp et l'eau superficielle du bisse de Riederi. Selon les informations fournies par les remontées mécaniques de Belalp, ce volume supplémentaire s'élève à 50 000 m³, dont environ 40 000 m³ proviennent du Riederi. L'eau disponible provient donc principalement des eaux superficielles. Les changements suivants sont à attendre en raison des changements climatiques.

- **Réservoir de Hohbiel :** le remplissage du réservoir suite à la fonte des neiges sera également garanti à l'avenir.
- **Affluents Hohbiel et débit Riederi :** pendant la période concernée, de mi-novembre à Noël, les débits
 - diminueront légèrement en moyenne en novembre (de l'ordre de quelques pourcents) et
 - augmenteront en moyenne de 5 à 10 % en décembre jusqu'au milieu du siècle, et de jusqu'à 10 % vers la fin du siècle.
- **Eau de source :** aucun changement significatif n'est à prévoir par rapport à aujourd'hui en ce qui concerne les ressources en eau de source. En raison de la forte interaction entre les eaux superficielles et les eaux de source, il est probable que les changements observés au niveau des eaux superficielles se répercutent de manière atténuée sur les eaux de source.

4.3 Facteur de récolte et eau utilisable

À proximité immédiate de la station de Hohbiel se trouve la station SLF BEL2. Les mesures effectuées à cette station ont servi de base au calcul du facteur de récolte pour le domaine skiable de Belalp. Les résultats sont présentés dans le [tableau 3](#). Celui-ci montre comment les facteurs de récolte mensuels évolueront à l'avenir en fonction des différents scénarios d'émissions. Il démontre que les facteurs de récolte resteront suffisamment élevés à la fin du siècle et ne constitueront donc pas un facteur limitant. Strictement parlant, cette affirmation ne vaut toutefois que pour les altitudes comprises entre 2500 et 2600 m. Aux alentours de 2000 m d'altitude, c'est-à-dire à la limite inférieure du domaine skiable, le facteur de récolte est inférieur d'environ 30 points de pourcentage en novembre et décembre par rapport à celui observé entre 2500 et 2600 m d'altitude. Des conditions favorables à l'enneigement technique persisteront néanmoins pendant environ 150 à 200 heures au cours du mois critique de novembre dans un futur moyen.

Mois	qq	RF26	NZ26	MZ26	FZ26	RF45	NZ45	MZ45	FZ45	RF85	NZ85	MZ85	FZ85
11	0.10	52	44	41	49	53	50	41	38	52	44	34	26
11	0.25	62	50	51	55	62	58	50	46	62	53	44	35
11	0.50	70	66	63	66	70	69	63	59	70	64	56	46
11	0.75	78	78	75	77	78	76	75	70	80	74	66	56
11	0.90	85	86	87	84	88	86	84	78	88	84	73	62
12	0.10	82	71	71	66	74	70	63	60	76	68	60	48
12	0.25	85	79	76	80	82	76	74	70	82	76	69	58
12	0.50	91	86	86	86	89	84	82	80	90	85	78	68
12	0.75	95	94	91	93	95	90	89	88	94	90	86	77
12	0.90	99	98	96	97	98	94	95	93	97	96	90	81

Tab. 3: Facteurs de récolte mensuels dans le domaine skiable de Belalp pour la période 2008–2024 : pourcentage moyen des heures d'enneigement possibles (température de bulbe humide $\leq -2^{\circ}\text{C}$) à la hauteur de la station SLF BEL2, à environ 2554 m d'altitude. Légende : qq : quantiles des valeurs mensuelles (0,5 : valeur médiane), RF : période de référence ; FP, FM, FL : futur proche (2020–2049), futur moyen (2045–2074), futur lointain (2070–2099) ; 26, 45, 85 : scénarios d'émissions RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5. Exemple de lecture : FP26 : La colonne indique les valeurs pour le futur proche et le scénario d'émissions RCP2.6. En novembre (11), le facteur de récolte médian (qq 0,50) est de 70. La période de référence a été modélisée séparément et indépendamment pour chaque scénario d'émissions, de sorte que de légers écarts sont possibles.

4.4 Infrastructures (eau accessible)

Les infrastructures existantes dans le domaine skiable de Belalp sont parfaitement adaptées à la quantité d'eau utilisable. Cependant, en raison de l'altitude élevée et de la petite superficie des bassins versants qui en découle, l'eau disponible en novembre et en décembre ne suffit pas à couvrir directement les besoins de l'enneigement technique. Il est donc nécessaire de stocker de l'eau dès la fonte des neiges. Ce stockage est actuellement assuré par le lac de rétention de Hohbiel. Les possibilités d'extension de ce dernier sont toutefois très limitées, tant sur les plans paysager, technique que juridique. Si le volume de stockage était porté à plus de 100 000 m³, le lac serait soumis à l'ordonnance sur les ouvrages d'accumulation, ce qui entraînerait des exigences légales beaucoup plus strictes. Ainsi, même si davantage d'eau utilisable était disponible à l'avenir, ces quantités ne pourraient guère être exploitées de manière suffisante en raison des possibilités limitées de création de volumes de stockage supplémentaires.

4.5 Besoins en eau (eau nécessaire)

Selon les informations fournies par Belalp Bahnen AG, la consommation d'eau actuelle pour l'enneigement technique s'élève à environ 186 000 m³ par saison. Ces besoins surviennent entre mi-novembre et Noël environ, dans le but de garantir des conditions optimales sur les pistes pour les vacances de Noël. Aucune autre information, par exemple sur la variabilité de la consommation d'une année à l'autre, n'est disponible. L'eau est utilisée pour l'enneigement d'environ 39 hectares de pistes. La consommation spécifique d'eau peut donc être estimée à environ 4800 m³ par hectare. Malheureusement, il n'existe pas de plans concrets pour l'extension des installations d'enneigement technique. Selon Belalp Bahnen AG, les exploitants souhaitent toutefois en principe pouvoir enneiger techniquement environ 40 % des pistes à l'avenir. Par rapport à la situation actuelle, cela correspondrait à un doublement des surfaces enneigées et donc de la consommation d'eau.

4.6 Évaluation finale Belalp

Actuellement, les ressources en eau et les besoins en eau pour l'enneigement technique sont équilibrés, de sorte qu'aucune situation de pénurie n'a eu lieu jusqu'à présent et que de telles situations ne sont pas non plus à prévoir. Toutefois, le potentiel d'extension est très limité du point de vue des ressources en eau, et ce pour les raisons suivantes :

1. Le réservoir d'enneigement existant, d'un volume de 100 000 m³, constitue l'élément central des infrastructures actuelles. Cependant, son volume est trop faible et ne suffit pas pour assurer l'enneigement de surfaces supplémentaires dans le cadre d'une éventuelle extension.
2. Les débits dans la zone d'alimentation du lac de rétention existant et dans le bassin versant du captage de Riederi ne connaîtront que des changements insignifiants par rapport à aujourd'hui pendant la période déterminante pour l'enneigement, à savoir les mois de novembre et décembre (cf. [chapitre 4.2](#)).
3. L'approvisionnement actuel en eau potable atteint déjà ses limites de capacité en hiver (communication orale de Diego Wellig, conseiller municipal de Naters). L'utilisation d'eau potable (supplémentaire) pour l'enneigement technique n'est donc ni durable ni viable à long terme.

La commune de Naters planifie un système d'approvisionnement en eau résilient

Le bassin versant du Chelchbach constitue l'épine dorsale de la gestion de l'eau de la commune de Naters. Il fournit l'eau potable, alimente les prairies irriguées et constitue la source d'eau pour l'enneigement technique du domaine skiable de Belalp. Une étude (geoformer igp SA & ecosfera (2025)) a été réalisée afin d'examiner les modalités d'une gestion durable des ressources en eau du Chelchbach dans le but de renforcer la résilience du bassin versant. Un bassin versant est résilient lorsque ses fonctions hydrologiques sont préservées à long terme malgré les multiples pressions et perturbations, telles que les changements climatiques et la fréquence accrue des événements extrêmes (sécheresses, inondations). La mise en réseau des habitats aquatiques ainsi que des cours d'eau proches de l'état naturel sont des éléments essentiels pour favoriser la résilience. Un Chelchbach résilient constitue en outre la base d'un approvisionnement en eau de qualité et assuré à long terme, tant pour la population que pour l'agriculture.

Les résultats montrent que la situation hydrologique actuelle peut être considérée comme favorable. Les ressources disponibles dépassent généralement la demande. À moyen et long terme, cependant, la disponibilité en eau ne sera souvent plus suffisante en été. Afin de disposer à l'avenir de suffisamment d'eau pour l'enneigement technique tout en préservant la résilience du bassin versant, de ses eaux et du paysage, des mesures ciblées sont nécessaires. L'une des mesures importantes consiste à créer des réservoirs supplémentaires afin de stocker l'eau des mois à fort débit pour les périodes de sécheresse.

Un développement durable de l'enneigement technique dans le domaine skiable de Belalp ne serait donc possible qu'en créant des volumes de stockage supplémentaires. La marge de manœuvre à Belalp et dans le bassin versant du Chelchbach est toutefois limitée: d'une part, il n'existe que peu d'emplacements appropriés pour des réservoirs supplémentaires, d'autre part, ceux-ci et les infrastructures nécessaires devraient être conçus de manière à s'intégrer dans le paysage. De plus, une coordination étroite avec les autres usages de l'eau est nécessaire pour déterminer si un réservoir pourrait être utilisé de manière multifonctionnelle, ce qui augmente encore la complexité de la planification au moment du choix de l'emplacement.

Enfin, se pose la question des coûts. Thomas Kissling, Rolf Weingartner & Günther Vogt (2023) ont démontré dans une étude que les coûts moyens pour la création d'une capacité de stockage de 1 m^3 s'élèvent à environ CHF 50 pour les réservoirs d'enneigement. Au chapitre 4.5, les besoins futurs en eau pour l'enneigement ont été estimés à $400\,000\text{ m}^3$. Sur ce total, $130\,000\text{ m}^3$ peuvent être couverts par le réservoir existant de Hohbiel⁵, ce qui implique un besoin supplémentaire de stockage de l'ordre de $270\,000\text{ m}^3$. Ceci représenterait donc des coûts de construction d'environ CHF 15 millions⁶.

Compte tenu de cette situation de départ complexe, une extension de l'enneigement technique de Belalp Bahnen AG n'est pas possible, ou seulement de manière très limitée, avec des mesures internes au domaine skiable. C'est pourquoi l'accent est mis sur des mesures externes au domaine skiable.

Parmi ces mesures, le projet du lac d'Oberaletsch occupe une place centrale. Des possibilités d'utilisation multifonctionnelle ont été étudiées dans le cadre d'une planification générale de la gestion des eaux du bassin versant du Chelchbach (geoformer igp SA & ecosfera (2025), voir [page 44](#)). Cette approche intégrée présente différentes options permettant de créer un système global résilient tenant compte de tous les usages de l'eau. Dans ce contexte, il a également été examiné si et dans quelle mesure l'eau du nouveau lac d'Oberaletsch pourrait contribuer à l'enneigement du domaine skiable de Belalp. Il est envisagé d'acheminer l'eau par gravité à travers un tunnel jusqu'à l'Aletschbord. De là, elle sera

⁵ Volume de stockage et apports hivernaux

⁶ Arrondi

acheminée vers la centrale hydraulique pour produire de l'électricité et pourra également être utilisée, si nécessaire, pour couvrir les besoins en eau du bassin versant du Chelchbach et donc aussi pour l'enneigement technique. Les analyses de geoformer igp SA & ecosfera (2025) montrent que les besoins en eau de tous les usages au sein du bassin versant du Chelchbach ne représentent qu'un très faible pourcentage de la quantité d'eau disponible dans le futur lac d'Oberaletsch.

Du point de vue de l'enneigement technique, l'approvisionnement en eau à partir du lac d'Oberaletsch présenterait de grands avantages :

1. Aucun espace de stockage supplémentaire ne serait nécessaire à Belalp, car il serait possible de prélever suffisamment d'eau à tout moment pendant la période d'enneigement en novembre et en décembre (grande flexibilité au niveau du prélèvement d'eau).
2. L'eau du lac d'Oberaletsch peut facilement alimenter le réseau de conduites existant et être utilisée pour l'enneigement technique.
3. La faible température de l'eau du lac d'Oberaletsch, qui est alimenté par l'eau du glacier, est favorable à l'enneigement.
4. Le prélèvement d'eau pour l'enneigement technique peut être dissocié de l'approvisionnement en eau potable. Ceci permettrait d'éviter les conflits d'utilisation.

Du point de vue de la gestion de l'eau, cette approche présente en outre l'avantage que l'enneigement technique deviendrait alors partie intégrante de la gestion des ressources en eau dans le bassin versant du Chelchbach. Ceci faciliterait également la réglementation des aspects financiers de l'approvisionnement en eau, c'est-à-dire l'élaboration d'une approche de tarification qui tiendrait compte de manière comparative des conditions cadres des différentes utilisations.

Belalp - Project Oberaletsch

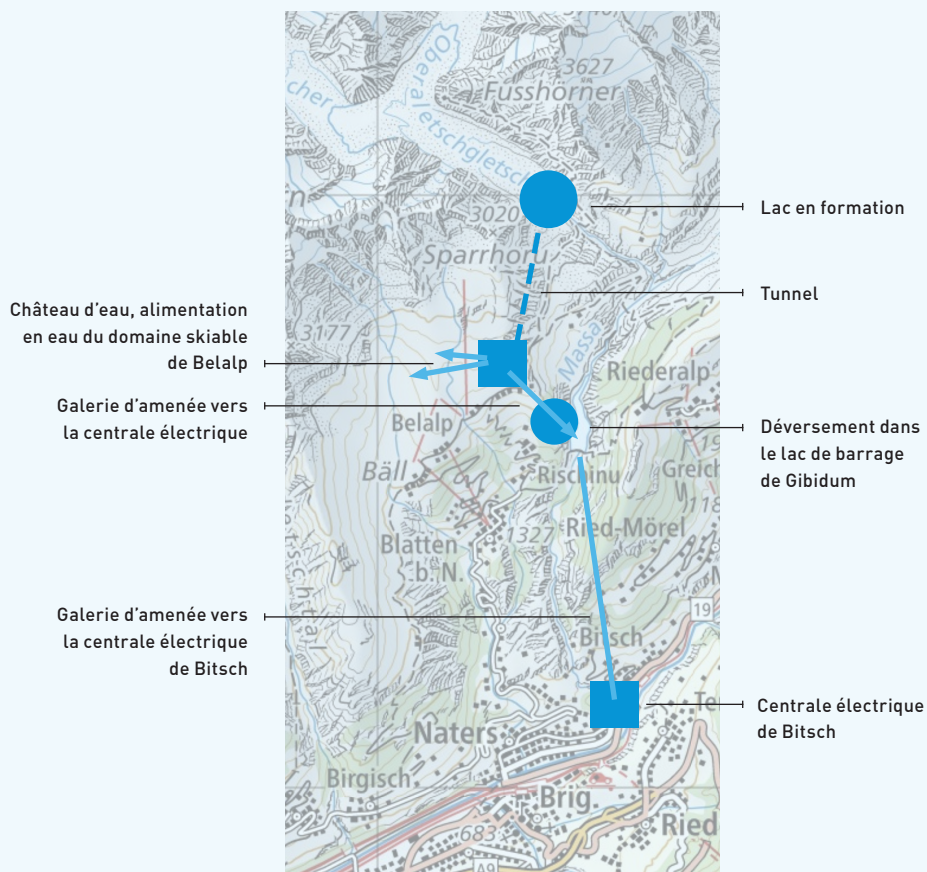


Fig. 9: Le projet Oberaletsch de la commune de Naters. Ce projet fait partie des projets hydrauliques proposés par la table ronde de la conseillère fédérale Sommaruga.

Évaluation

L'enneigement technique du domaine skiable de Belalp, tel que pratiqué aujourd'hui, restera possible également dans les conditions climatiques des prochaines décennies. Les ressources en eau disponibles resteront suffisantes. Toutefois, les périodes durant lesquelles l'enneigement sera encore possible diminueront progressivement à partir du futur moyen dans les zones les plus basses du domaine skiable (autour de 2000 m d'altitude).

Une extension conséquente de l'enneigement technique n'est pas réalisable avec la quantité d'eau directement disponible à Belalp. Une telle extension nécessiterait la construction de réservoirs qui seraient remplis pendant la saison estivale et qui permettraient un prélèvement d'eau en novembre et en décembre. De tels réservoirs permettraient en outre une mise à disposition de l'eau rapide et adaptée aux besoins, aspect essentiel pour exploiter de manière optimale les fenêtres d'enneigement plus courtes à l'avenir.

Bibliographie

- Abegg, Bruno (2023).** «Beschneigung: Erfolgsgeschichte oder Auslaufmodell?» Manuscrit inédit, rédigé dans le cadre du projet «Beschneigungsspeicher» (réservoirs d'enneigement).
- Loi sur la protection des eaux (2024).** Loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux). État le 1^{er} janvier 2024. www.fedlex.admin.ch
- Climate Services (NCCS), National Centre for (2018).** Scénarios climatiques suisses. Consulté le 19 février 2025. www.nccs.admin.ch
- Freudiger, Daphné, Marc Vis et Jan Seibert (2021).** Mittlere Abflüsse vergletschter Einzugsgebiete. Consulté le 31 mai 2025. hydromapscc.ch
- geoformer ipp AG und ecosfera (2025).** Wasser im Einzugsgebiet des Chelchbachs, Gemeinde Naters: Grundlagenanalyse, Beurteilung der Resilienz und Optionen für Massnahmen. Rapport technique. Version 1.0. Mandant: FMV SA, Rue de la Dixence 9, 1951 Sion. Sebastiansplatz 1, CH-3900 Brig-Glis: geoformer ipp SA.
- Mülchi, Regula u.a. (2021).** Mittlere Abflüsse mesoskaliger Einzugsgebiete. Consulté le 31 mai 2025. hydromapscc.ch
- Remontées Mécaniques Suisses (2024).** Faits et chiffres de la branche des remontées mécaniques suisses 2024. Seilbahnen Schweiz, Funivie Svizzere, Pendericolas Svizras. www.seilbahnen.org
- Thomas Kissling, Rolf Weingartner, Günther Vogt (2023).** Studie Alpine Beschneigungsspeicher. Consulté le 7 juin 2025. www.vogt-la.com
- Weingartner, Rolf et Pascale Josi (2024).** *Beschneigungsspeicher aus der Sicht und in der Beurteilung der Skigebiete*. Rapport technique. ETH Zürich, Département Architektur, Institut für Landschaft und Urbane Studien, Professur Günther Vogt. www.vogt-la.com
- Weingartner, Rolf, Jan Schwanbeck et Klaus Lanz (2025a).** *Beschneigung Belalp: Analyse der Wassersituation*. Réalisé sur mandat de Remontées Mécaniques Suisses, ecosfera gmbh.
- (2025b). *Beschneigung Bivio: Analyse der Wassersituation*. Rapport technique. Réalisé sur mandat de Remontées Mécaniques Suisses, ecosfera gmbh.
- WSL – Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF (2025).** *Description stations automatiques*. Consulté le 7 juin 2025. www.slf.ch

Impressum

Édition

Remontées Mécaniques Suisses (RMS)
Giacomettistrasse 1
3006 Berne
info@remontees-mecaniques.ch
www.remontees-mecaniques.ch

© Remontées Mécaniques Suisses (RMS), Berne
Novembre 2025

Auteurs

Rolf Weingartner, Prof. Dr. phil.-nat.,
ecosfera gmbh
Klaus Lanz, Dr. phil.-nat.,
international water affairs

Direction du projet

Laura Wyss, RMS
Benedicta Aregger, RMS

Mise en page et graphisme

de-stefano.ch

Traduction

rosset-traduction.ch

Images

© P. 5, 15: Bivio Sportanlagen AG;
Belalp Bahnen AG & Blatten-Belalp
Tourismus AG

Soutenu par:

