

**Service de l'agriculture Canton du Valais**

# **Gestion des ressources en eau pour l'agriculture en Valais**

Détermination et anticipation des déficits en eau sur les alpages, application dans la région de la Combe de l'A

## Impressum

---

### Mandant

Service de l'agriculture Office des améliorations structurelles Maret Laurent Av. Maurice Troillet 260 / CP 437 1950 Châteauneuf-Sion	Service de l'agriculture Office des améliorations structurelles Steeve Maillard Av. Maurice Troillet 260 / CP 437 1950 Châteauneuf-Sion
---	---

---

### Mandataire

Egli Engineering AG St. Gallen Bogenstrasse 14 9000 St. Gallen  071 274 09 09 <a href="mailto:info@naturgefahr.ch">info@naturgefahr.ch</a> <a href="http://www.naturgefahr.ch">www.naturgefahr.ch</a>	Egli Engineering AG Bern Schwarztorstrasse 87 3007 Bern  031 381 52 90 <a href="mailto:info@naturgefahr.ch">info@naturgefahr.ch</a> <a href="http://www.naturgefahr.ch">www.naturgefahr.ch</a>
---	--

---

### Détails du projet

N° de projet :	1050
État du rapport :	Version finale
Rédaction :	Zeno Bontognali, Thomas Egli
Date :	31.05.2022
Dossier :	version_finale_Combe_A_1050_20220531

## Table des matières

<b>Impressum</b> .....	<b>1</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>3</b>
<b>1 Introduction</b> .....	<b>5</b>
<b>2 Objectifs</b> .....	<b>5</b>
<b>3 L'étude de cas</b> .....	<b>5</b>
3.1 Géographie .....	5
<b>4 Méthode et données utilisées</b> .....	<b>6</b>
4.1 Scénarios climatiques CH2018 .....	6
4.1.1 Données CH2018 .....	7
4.1.2 Données Hydro-CH2018 .....	9
4.2 Définition de l'utilisation de l'eau dans la Combe de l'A aujourd'hui et dans le futur ..	10
4.3 Analyse de la situation actuelle de l'eau .....	10
4.4 Analyse de la situation future de l'eau .....	11
4.5 Calcul du bilan hydrique .....	11
4.6 Analyse des besoins en eau des pâturages .....	12
4.7 Analyse et reconnaissance des problématiques liées à l'activité humaine et analyse des mesures possibles .....	12
<b>5 Résultat</b> .....	<b>13</b>
5.1 Analyse de la Combe de l'A et des approvisionnements en eaux existants .....	13
5.2 Consommation d'eau actuelle .....	15
5.2.1 Alpage de l'A .....	16
5.2.2 Cabane de la Tsissette plus cabane du berger .....	17
5.2.3 Consommation d'eau future .....	17
5.3 La ressource d'eau aujourd'hui .....	17
5.3.1 Pergélisol et glaciers rocheux, aujourd'hui et dans le futur .....	17
5.4 La ressource d'eau future .....	19
5.4.1 Analyse des données CH2018 .....	19
5.4.2 Calcul du changement relatif CH2018 .....	22
5.5 Bilan hydrique et changement réel .....	25
5.6 Besoins en eau des pâturages .....	26
<b>6 Problématique et solutions</b> .....	<b>27</b>
6.1 Problèmes liés à la pénurie d'eau .....	27
6.2 Solutions .....	27
6.2.1 Ouvrage d'accumulation d'eau couvert .....	28
6.2.2 Ouvrage d'accumulation à ciel ouvert – étang .....	29

6.2.3	Prises Tyroliennes / « Tyrolerwehre ».....	32
6.2.4	Stockage pour la cabane de la Tsissette et du berger.....	34
<b>7</b>	<b>Conclusions.....</b>	<b>35</b>
<b>8</b>	<b>Remerciement .....</b>	<b>36</b>
<b>9</b>	<b>Sources .....</b>	<b>37</b>
	<b>Annexe 1 : Données météorologiques et hydriques .....</b>	<b>39</b>
	<b>Annexe 2 : Bilan hydrique .....</b>	<b>40</b>
	<b>Annexe 3 : Données CH2018 et changements relatif .....</b>	<b>42</b>
	<b>Annexe 4 : Correction de la consommation d'eau à la cabane Tsissette avec les données de la saison 2021 .....</b>	<b>50</b>

## 1 Introduction

Dans les dernières années, différentes études et modèles climatiques ont montré des gros changements des conditions du climat actuel auxquels nous sommes habitués. Des changements dans la tendance des températures ont déjà été mesurés ces dernières années. La communauté scientifique s'attend à des changements, non seulement en ce qui concerne la température, mais aussi l'approvisionnement en eau dans différentes régions de Suisse.

Le Service de l'agriculture du Canton Valais, partenaire du projet Interreg RESERVAQUA dont la Combe de l'A est une des quatre études de cas, nous a chargé de mener une étude dans le périmètre de la Combe de l'A, dans la commune de Liddes, pour évaluer l'ampleur de ces changements sur les réserves d'eau déjà limitées de la région, qui sont d'une grande importance pour l'agriculture, le tourisme et la diversité biologique.

Ces résultats seront utilisés pour élaborer une proposition de mesures visant à résoudre les problèmes de sécheresse afin d'assurer un approvisionnement en eau suffisant à la région pendant la période estivale, pour pouvoir garantir les activités agricoles et de la cabane de la Tsissette.

## 2 Objectifs

Ensuite les objectifs de l'étude :

- Les problèmes actuels en lien avec les besoins en eau pour l'agriculture et le tourisme sont évalués et synthétisés.
- La disponibilité de la ressource en eau actuelle et future (2060) est estimée de manière quantitative.
- Les éventuels déficits prévus sont mis en évidence. Des mesures organisationnelles et constructives sont proposées, évaluées et comparées.

## 3 L'étude de cas

### 3.1 Géographie

La Combe de l'A est une vallée alpine située sur la commune de Liddes, dans le district d'Entremont. Avec une surface de 19 km<sup>2</sup> la Combe a un dénivelé d'environ 1800 m, le point le plus bas se trouve à 1170 m où le Torrent de l'A s'écoule dans la Dranse d'Entremont et le point le plus haut est le sommet de la Tsavre Mont Ferret (alt. 2977m) sur la ligne de partage des eaux entre la Combe et le Val Ferret (figure 1).

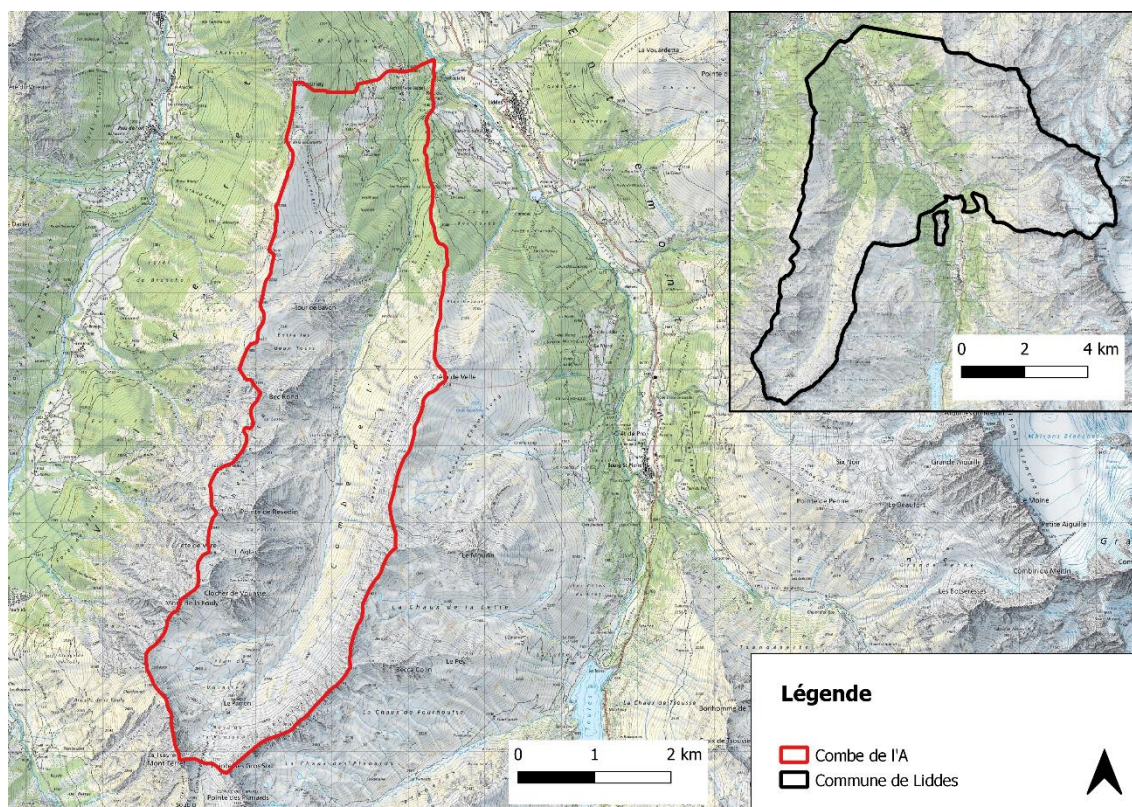


Figure 1: Vue d'ensemble de la Combe de l'A (Swisstopo 2021).

## 4 Méthode et données utilisées

Dans ce projet, les données existantes sur les eaux mesurées sont analysées afin de montrer la situation actuelle dans la Combe de l'A. Pour la situation hydrique en 2060 nous avons utilisé les données climatiques et hydrologiques de CH2018, le modèle des changements climatiques suisse. Enfin pour la consommation d'eau nous analysons les activités humaines dans la vallée grâce à des documents existants et à des interviews avec des personnes clés en la matière.

### 4.1 Scénarios climatiques CH2018

La Suisse travaille depuis de nombreuses années sur la modélisation du changement climatique. Après les modèles CH2007 et CH2011, le modèle climatique CH2018 a été développé. Ce modèle a été développé relativement peu de temps après le modèle précédent. Cela a été possible grâce aux nouvelles technologies disponibles et à la publication de nouvelles données et connaissances provenant d'autres modèles mondiaux et régionaux (par exemple, EURO-CORDEX). Les données de CH2018 sont donc produites à partir d'un plus grand nombre de simulations et donc avec une meilleure résolution spatiale plus élevée. Un autre facteur important qui a conduit au développement du modèle CH2018 a été la publication de nouveaux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols, les scénarios dits RCP (Representative Concentration Pathways), qui sont les scénarios utilisés par CH2018, en remplacement du système utilisé précédemment. Actuellement, les données publiées par CH2018 contiennent également des informations socio-économiques, ce qui permet une interprétation par les associations d'intérêt [6].

Les principales observations du projet CH2018 sont les suivantes [6]:



- **Étés secs** : moins de précipitations moyennes et plus d'évapotranspiration.
- **Fortes précipitations** : les fortes pluies seront plus fréquentes, surtout en hiver.
- **Plus de journées tropicales** : les vagues de chaleur et des nuits chaudes seront plus fréquentes.
- **Hivers peu enneigés** : les précipitations hivernales seront principalement aqueuses. Diminution des surfaces enneigées.
- **La protection du climat en action** : la réduction globale des gaz à effet de serre peut conduire à des résultats concrets dans la lutte contre le changement climatique.

#### 4.1.1 Données CH2018

##### Scenarios

Les données sont disponibles pour trois scénarios RCP simulés dans EURO-CORDEX : un scénario dans lequel les émissions actuelles ne changent pas (RCP 8.5), un scénario dans lequel les émissions sont réduites de manière à ramener le réchauffement planétaire en deçà de 2°C (RCP 2.6), et un scénario intermédiaire, dans lequel les mesures d'atténuation pour l'objectif de 2°C sont présentes mais pas suffisamment (RCP 4.5)[6].

Tableau 1: Description des scénarios climatiques RCP. RF = Forçage radiatif ; GMT = Température globale moyenne (retravaillée par l'auteur, [6]).

Scénario	Condition	Changements globaux jusqu'en 2100 par rapport à 1850 -1900
RCP 8.5	Émissions non réduites	Augmentation continue de la RF (8,5 W m, 1370 ppm CO <sub>2</sub> eq) et du GMT (4 - 5 °C).
RCP 4.5	Atténuation de 2°C non conforme	Baisse des émissions après 2050, stabilisation de la RF (4,5 W m, 650 ppm CO <sub>2</sub> eq), augmentation de la GMT (~2,5 °C).
RCP 2.6	Atténuation de 2°C	Forte réduction des émissions de gaz à effet de serre au début du 21e siècle, un pic et un déclin de la RF (2,6 W m, 490 ppm CO <sub>2</sub> eq), une stabilisation de la GMT (< 2 °C).

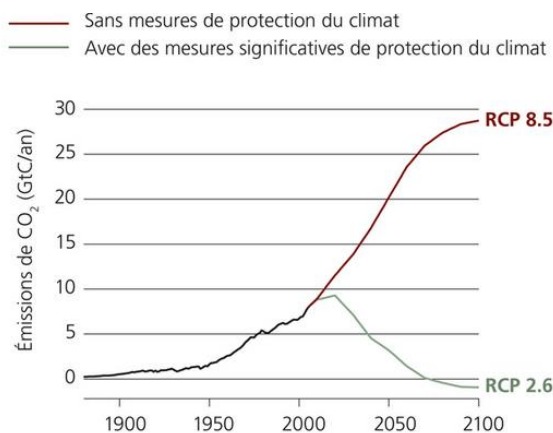


Figure 2: Scénarios d'émissions de CO<sub>2</sub> pour RCP 8.5 et RCP 2.6 [13].

### Période de référence et périodes de scénario

Les données climatiques de CH2018 ont été calculées sur la base des mesures météorologiques suisses sur la période 1981 - 2010, cette période de trente ans est appelée période de référence. Les données modélisées sont également regroupées en périodes de 30 ans : avenir proche (2035) 2020 - 2049, milieu du siècle (2060) 2045 - 2074 et la fin du siècle (2085) 2070 - 2099 [6] (figure 3). La période de référence distribuée avec le jeu de données ne correspond pas aux données mesurées par Meteosuisse, puisque cette période est également simulée par le modèle et donc légèrement modifiée. Cependant, cette période doit être utilisée pour mesurer le changement relatif des paramètres climatiques.

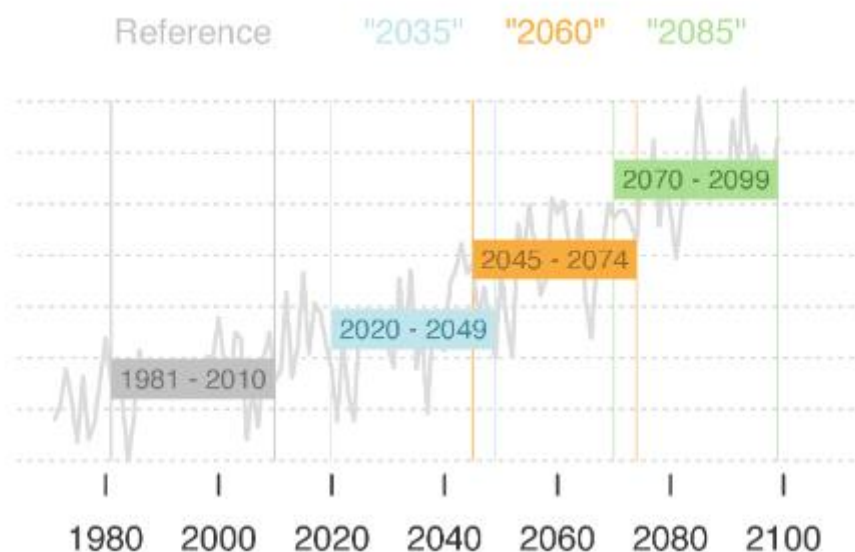


Figure 3: Périodes de référence CH2018 [6].

### Incertitude des scénarios

Pour chaque scénario, période et zone en Suisse, une valeur attendue est disponible (pour les différents facteurs climatiques). Toutefois, il s'agit du résultat de différentes simulations. Celles-ci sont souvent représentées par un diagramme en boîte, où la valeur attendue correspond à la médiane. Cela signifie que sur l'ensemble des simulations, 50 % des données ont une valeur supérieure à celle attendue et les 50 % restants une valeur inférieure. Cela représente la variation de la valeur que l'on peut attendre et donc l'incertitude des résultats [13][6].



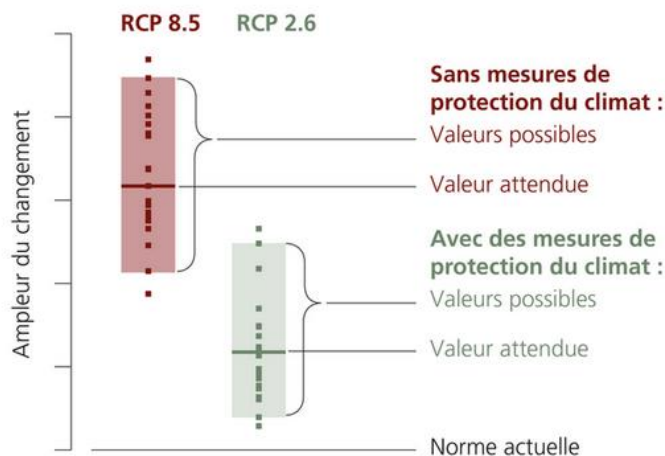


Figure 4: Interprétation des résultats de CH2018 [14].

Dans la Figure 5, la représentation Box-Plot des précipitations dans la Combe de l'A montre le degré d'incertitude des résultats CH2018 pour cet endroit.

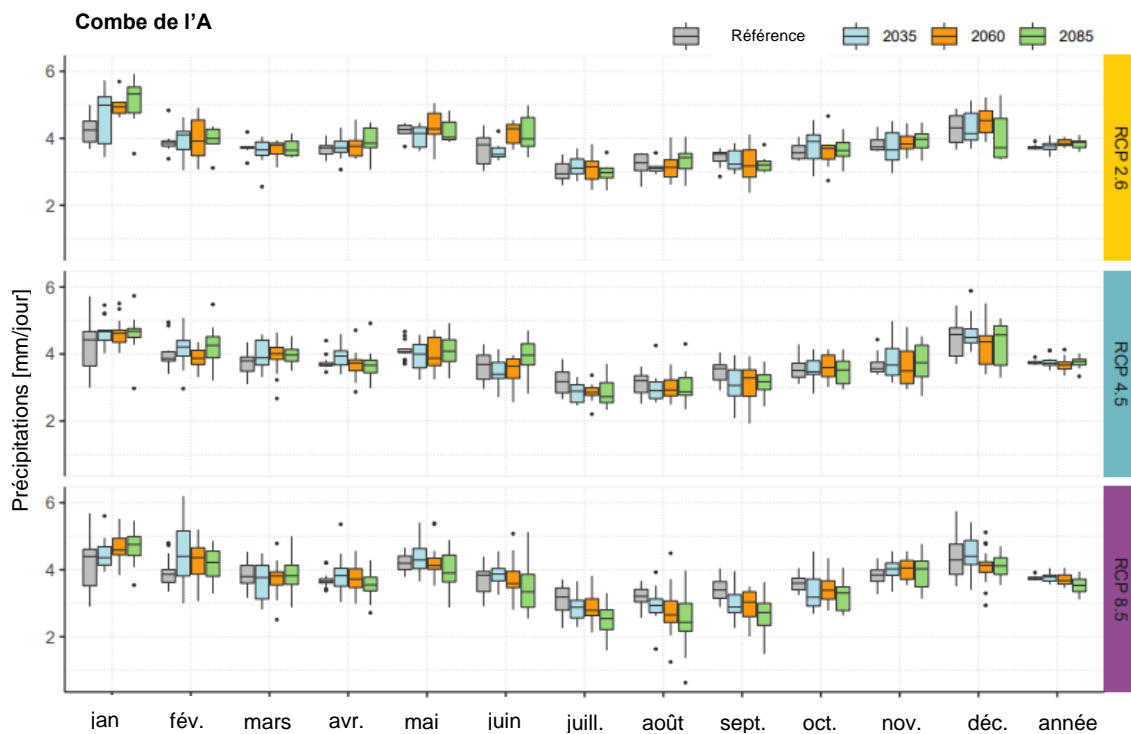


Figure 5: Box-plot des précipitations simulées par CH2018 pour la Combe de l'A [4].

#### 4.1.2 Données Hydro-CH2018

Le projet Hydro-CH2018 a été présenté au public au printemps 2021. L'objectif de ce projet est d'analyser comment le changement climatique, modélisé dans CH2018, affectera le régime des eaux en Suisse. Comme dans le projet CH2018, Hydro-CH2018 ne s'est pas contenté de publier des données quantitatives, mais a analysé les effets de ces changements sur une série d'activités humaines et naturelles telles que l'agriculture ou les écosystèmes aquatiques.

La structure des données de Hydro-CH2018 est la même que celle de CH2018, les scénarios, les périodes et les méthodes de lecture des données sont les mêmes [17].

Dans la figure 6, la représentation en Box-Plot des débits sortants mensuels dans la Combe de l'A montre le degré d'incertitude des résultats de CH2018 pour cet endroit [4].

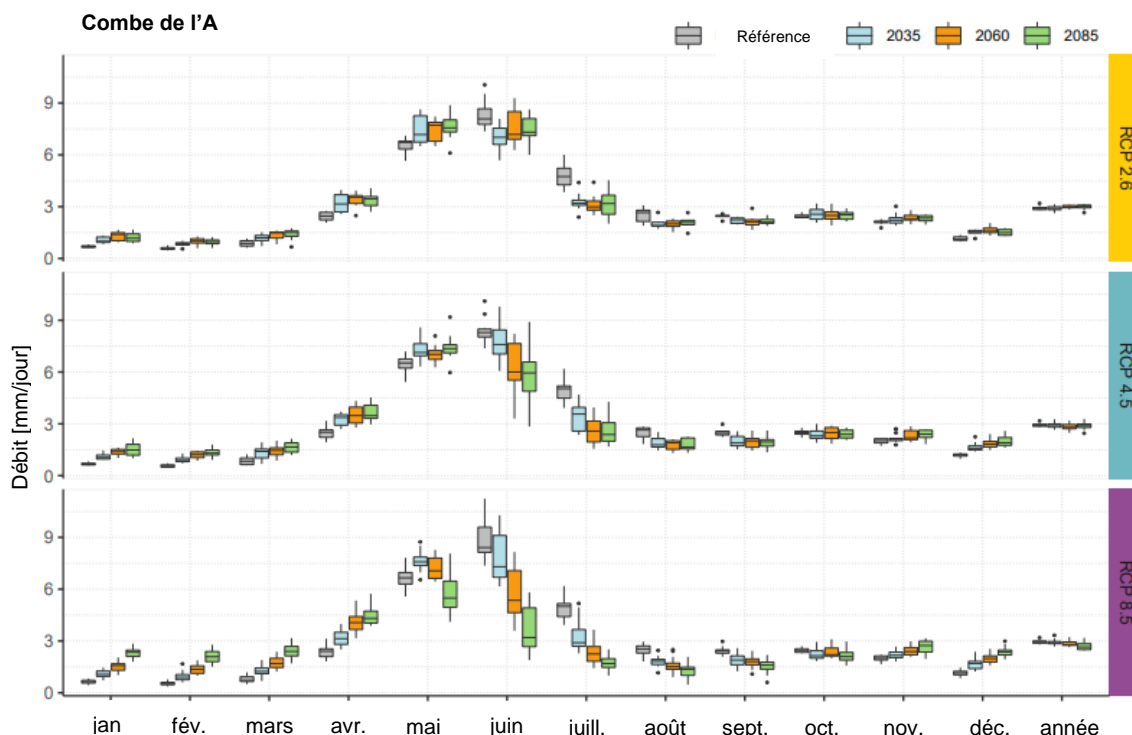


Figure 6: Box-plot des débits simulés par Hydro-CH2018 pour la Combe de l'A [4].

## 4.2 Définition de l'utilisation de l'eau dans la Combe de l'A aujourd'hui et dans le futur

La consommation actuelle d'eau par l'activité humaine a été estimée grâce aux informations fournies par les personnes actives dans la gestion de l'alpage, de la cabane de la Tsissette et de l'irrigation à Liddes. Grâce à la documentation existante sur les projets de rénovation des cabanes et au recensement des troupeaux d'été dans les alpages, il a été possible d'estimer les besoins en eau de la cabane et des alpages de la vallée.

## 4.3 Analyse de la situation actuelle de l'eau

Afin de réaliser un bilan hydrique de la région, l'analyse de la situation actuelle a pris en compte les paramètres suivants :

- Précipitations mensuelles (mm/mois)
- Équivalent en eau de la neige (mm/mois)
- Evapotranspiration potentielle (ETP, mm/mois)
- Débit du torrent de l'A (l/s)

Les précipitations mensuelles proviennent d'une étude réalisée pour la commune de Liddes et pour DranseEnergie. Les précipitations ont été calculées pour Liddes à partir des données de la station météorologique du Grand St-Bernard [20]. Pour l'équivalent en eau de la neige, nous nous sommes appuyés sur les données de référence de Hydro CH2018, car ces données n'existent que pour certains mois d'hiver et de printemps et sont des données modélisées [11]. Le débit du torrent a été repris des mesures effectuées pour le nouveau système d'irrigation avec turbinage de la commune de Liddes. Les mesures datent de 2010 [20]. L'évapotranspiration potentielle a

été calculée en utilisant le paquet "SPEI" de RStudio [5]. La fonction Tornthwaite a été utilisée pour le calcul, qui est basé sur la méthode de calcul de Tornthwaite (équation 1, 2 et 3). Il s'agit d'un système de calcul très simplifié qui est souvent utilisé dans les modèles climatiques pour estimer quantitativement l'évapotranspiration potentielle à partir de mesures de température [10]. Les données de température sont issues de la base de données de MétéoSuisse.

$$ETP = 0.533n \frac{S_0}{12} \left( \frac{10T}{J} \right)^a \quad \text{Équation 1}$$

$$J = \sum_{Jan}^{Dec} \left( \frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad \text{Équation 2}$$

$$a = (0.0675J^3 - 7.71J^2 + 1792J + 49239)10^{-5} \quad \text{Équation 3}$$

ETP = évapotranspiration potentielle, n = période de temps,  $S_0$  = heures de lumière par jour, T = température de l'air, J = indice de chaleur et a = coefficient basé sur J [10].

#### 4.4 Analyse de la situation future de l'eau

Afin de déterminer la quantité d'eau disponible en 2060 dans la Combe de l'A, les données du modèle climatique CH2018 ont été utilisées. L'utilisation de ces données n'est pas directe, mais elles doivent servir à calculer le pourcentage de changement relatif sur une période donnée, dans notre cas d'aujourd'hui à 2060. Le pourcentage de changement relatif a ensuite été utilisé pour calculer le changement projeté sur les données climatiques et hydrologiques actuelles, afin de pouvoir lire et interpréter un résultat à l'échelle de la Combe de l'A.

Les données CH2018 et Hydro CH2018 suivantes ont été extraites pour la Combe de l'A et analysées :

- Précipitations
- Équivalent en eau de la neige
- Débit
- Température (pour le calcul de l'ETP)

#### 4.5 Calcul du bilan hydrique

Le bilan hydrique a été calculé à l'aide des formules suivantes [1][8] (équations 4 et 5) :

$$\Delta S = Input - output \quad \text{Équation 4}$$

Où :

$$\Delta S = P - (Q + ETP + I) \quad \text{Équation 5}$$

Où  $\Delta S$  est le bilan hydrique,  $P$  est la précipitation,  $Q$  est le ruissellement,  $I$  est l'infiltration et  $ETP$  est l'évapotranspiration potentielle [1].

Le bilan hydrique a été calculé à partir des données actuelles et des données modélisées par CH2018 pour 2060 pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. L'annexe 1 contient les données météorologiques et hydrologiques actuelles utilisées pour le calcul du bilan, ainsi que la citation correcte des sources.

#### **4.6 Analyse des besoins en eau des pâturages**

Cette analyse a été effectuée séparément des calculs du bilan hydrique. La part d'eau utilisée par les graminées est difficile à identifier exactement et fait généralement partie de l'évapotranspiration. L'ajout de ces données fausserait donc les résultats de la balance. Afin de pouvoir tirer des conclusions sur l'état des pâturages pendant la période estivale analysée, il a été décidé d'utiliser un modèle de Agroscope pour le calcul des besoins supplémentaires en eau des cultures (dans ce cas les pâturages) [9]. Ce modèle à l'échelle régionale permet de comprendre dans quelle mesure les besoins en eau des pâturages vont augmenter à l'avenir. Le modèle est basé sur trois types de sol possibles et est calculé selon les spécifications climatiques régionales de MétéoSuisse. Comme ce modèle est basé sur les données de CH2011, le modèle climatique suisse antérieur à CH2018, le scénario climatique le plus proche du scénario RCP8.5 de CH2018 a été utilisé pour la comparaison.

Un sol sableux d'une profondeur de 60 cm a été choisi comme entrée pour le modèle, ce qui est le plus proche des caractéristiques d'un sol alpin tel que celui de la Combe de l'A. La profondeur des racines choisie est de 30 cm.

#### **4.7 Analyse et reconnaissance des problématiques liées à l'activité humaine et analyse des mesures possibles**

Afin de reconnaître les problèmes futurs, tous les éléments collectés et calculés ont été analysés. En particulier, il est fait référence à la quantité d'eau estimée pour les besoins de l'alpage et de la cabane, afin de comprendre si la disponibilité de l'eau sera suffisante pour poursuivre ces activités pendant les six mois "chauds" de l'année.

Des mesures organisationnelles et techniques sont formulées sur la base des données collectées et analysées et de la littérature existante.

## 5 Résultat

### 5.1 Analyse de la Combe de l'A et des approvisionnements en eaux existants

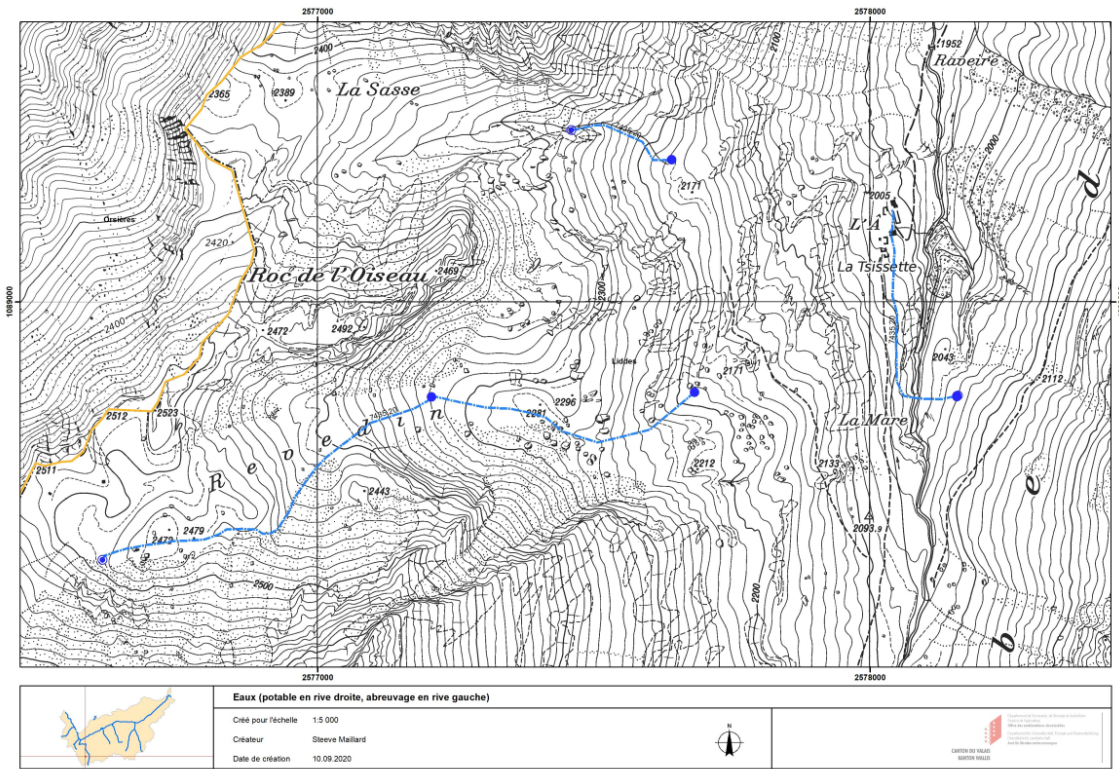


Figure 7: Approvisionnement en eaux dans la Combe de l'A en amont de la Tsissette, sur la rive droite l'eau potable et sur la rive gauche l'abreuvement [12].

Actuellement, l'alpage et la cabane disposent d'une adduction d'eau à partir de la rive droite de la vallée. Sur la rive gauche, il y a deux prises d'eau pour abreuver les animaux en pâture. Ces systèmes d'approvisionnement en eau sont des constructions artisanales, avec des tuyaux



placés à la surface ou près du sol. Cela provoque souvent des dégâts dus à la neige en hiver (figures 8 et 9).



*Figure 8: Une des deux prises d'eaux d'abreuvement en rive gauche, celle au Nord. On peut voir les dégâts de l'hiver (écrasement du tonneau en plastique bleu, qui sert de chambre de mise en charge) [12]. Photo prise le 09.09.2020.*





Figure 9: Dommages causés à la conduite d'eau par la neige [12]. Photo prise le 09.09.2020.

A présent, il n'y a pas de problèmes connus dus au manque d'eau à l'alpage ou à la cabane. Vers la fin de la saison estivale, on observe cependant une forte diminution du débit du Torrent de l'A. Cette diminution est si importante qu'elle peut être remarquée à l'œil nu et indique la rareté des sources d'eau dans la vallée.



Figure 10: Diminution du débit observée à la fin de l'été 2020, entre août (à gauche) et septembre (à droite) [12].

## 5.2 Consommation d'eau actuelle

L'exploitation de l'eau de la Combe de l'A pour les activités humaines est principalement liée à deux thèmes : l'élevage bovin et la cabane du berger plus la cabane de la Tsissette. En outre,

pendant la période estivale, une bonne partie de l'eau qui coule dans le Torrent de l'A est utilisée à Liddes pour l'irrigation des parcelles via un vaste réseau d'irrigation qui prélève l'eau dans le Torrent de l'A.

### 5.2.1 Alpage de l'A

Pour le calcul de la consommation d'eau de l'alpage, le nombre d'animaux estivés a été considéré. La consommation d'eau du bétail a été calculée grâce à l'aide du document « Aménagement des alpages » édité par Agridea. Le document propose la méthode suivante pour la saison d'estivage : **Le calcul des besoins totaux se fait sur la durée de pâture + 21 jours de "réserve sécheresse" à raison de 80 litres / UGB** (environ 1 m<sup>3</sup> / UGB pour 10 jours) [2].

A cela s'ajoute la consommation d'eau d'une personne (le berger). Agridea propose **100 l/jour** par personne (Nutrition et hygiène personnelle)[2].

Le tableau suivant indique le nombre de bovins et la consommation d'eau du personnel de l'alpage de l'A :

Tableau 2: Nombre moyen de bovins et consommation moyenne au cours des saisons 2015-2019 [19].

Personnes	Nombre	Jours	Consommation [l/jour]	Consommation totale [l/saison]
Berger	1	119	100	11'900

Bétail	Nombre Bétail	Coeff. UGB	Jours d'estivage + réserve sécheresse	Consommation par UGB (estivage) [l/jour]	Consommation totale [l/saison]
Génisses et taureaux > 720 jours	24	0.6	93 + 21	80	131'328
Génisses et taureaux 365-720 jours	41	0.4	95 + 21	80	152'192
Veaux 120 à 365 j.	67	0.33	106 + 21	80	224'638
Veaux > 120 j.	5	0.13	16 + 21	80	1'924
Vaches laitières*	(1)	1	(119) + 21	80	11'200

Consommation pendant la période d'estivage		533'182 l
Résultat de la consommation en mm/saison	/ 19'400'000 m <sup>2</sup> =	0.027 mm / 3 mois

\* Une vache laitière était présente tout au long de la saison estivale 2019, mais pas les années précédentes.

### 5.2.2 Cabane de la Tsissette plus cabane du berger

La cabane de la Tsissette a été agrandie pendant la saison 2020/21. L'ouverture de la nouvelle structure a eu lieu en été 2021. La municipalité de Liddes a décidé d'investir dans la région avec ce projet d'agritourisme en apportant une valeur ajoutée à l'alpage et à la cabane existants, dont voici les objectifs principaux [15] :

- Création de valeur ajoutée (Objectif ciblé par saison : 200 nuitées et 200 repas)
- Maintien d'une activité agricole de tradition
- Valorisation de produits locaux
- Sensibilisation aux activités agricoles.

Comme la cabane a subi d'importantes modifications, qui vont avoir pour conséquence une consommation d'eau plus élevée que, celle jusqu'en 2019, il a été décidé de ne pas tenir compte des saisons passées et d'estimer les besoins futurs en eau de la cabane. Pour l'estimation, nous n'avons pas tenu compte des normes de restriction pour COVID-19, car elles seraient irréalistes pour une vision à long terme (2060), mais nous avons tenu compte de la tendance actuelle, c'est-à-dire des besoins de loisirs de la population et donc d'une augmentation probable des passages quotidiens dans la Combe de l'A.

Agridea propose une méthode de calcul des besoins en eau d'une buvette dans le cadre de la gestion d'un alpage : 20 places = un équivalent-habitant = 100 litres / jour [2]. En comparaison, le club alpin suisse propose, dans sa directive pour la construction de cabanes alpines, une quantité d'eau de **10 à 12 litres par personne [18]**. Ce montant comprend la préparation des repas, le nettoyage de la vaisselle et l'utilisation des installations sanitaires. Comme la cabane offre un hébergement de nuit, nous avons décidé de calculer les besoins en eau en utilisant la méthode SAC [18], qui implique une plus grande quantité d'eau.

Nombre de Personnes	Consommation eau par personne (l/jour)	Consommation totale saison (l)
200 nuitées et 200 repas (200 places)	12	2400

Tableau 3: Consommation d'eau estimée pour la cabane Tsissette.

- A cette quantité, il faut également ajouter la quantité pour le berger, calculée dans le chapitre précédent. La quantité totale devient alors : **11'900 + 2'400 = 14'300 l**

### 5.2.3 Consommation d'eau future

Étant donné que les données de la cabane proviennent d'une étude et d'une conception récentes de la nouvelle cabane et que l'alpage ne prévoit pas de diminuer ou d'augmenter le cheptel dans les années à venir, on considère que la consommation d'eau restera la même.

## 5.3 La ressource d'eau aujourd'hui

Les données météorologiques et hydrologiques actuelles figurent à l'annexe 1.

### 5.3.1 Pergélisol et glaciers rocheux, aujourd'hui et dans le futur

Par définition, le permafrost se trouve à une altitude supérieure à 2400 m au-dessus du niveau de la mer. Les glaciers rocheux sont considérés par la recherche comme faisant partie de la même catégorie que le permafrost. Ils ont une influence sur la quantité d'eau libérée dans les



vallées alpines. Une étude attribue à leur disparition une diminution de 5 à 15 % du débit sortant dans les vallées alpines. D'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, on prévoit que l'altitude du pergélisol et donc aussi des glaciers rocheux pourrait dépasser 3500 m d'altitude [16].

Il se peut qu'il y ait encore des glaciers rocheux dans la Combe de l'A, mais s'ils existent, leur taille est très limitée par rapport à la superficie totale de la Combe de l'A. Vous trouvez ci-dessous une carte de la répartition indicative du pergélisol provenant de l'Office fédéral de l'environnement :

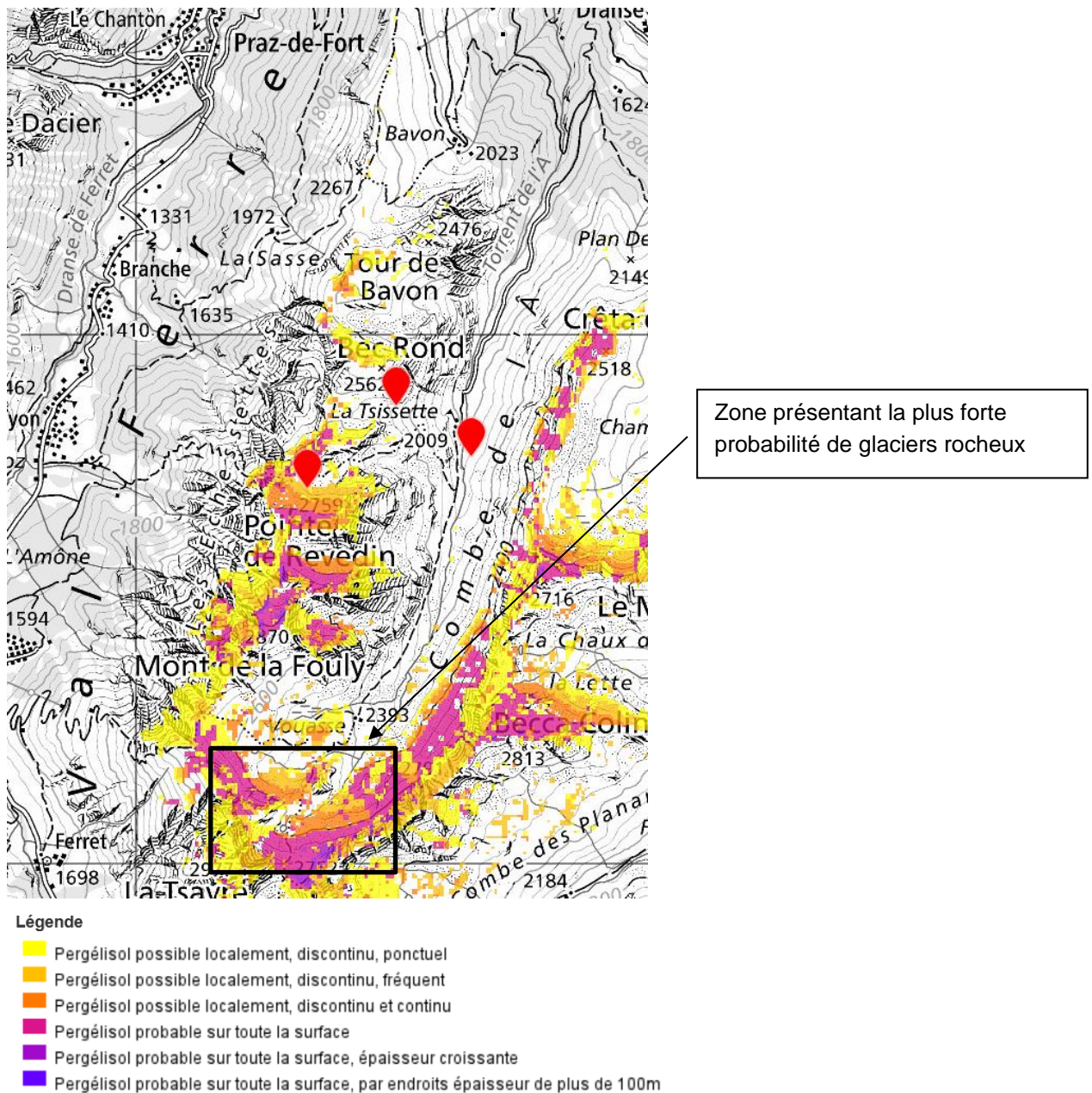


Figure 11: Carte indicative du permafrost/ pergélisol, [map.geo.admin.ch](http://map.geo.admin.ch) (11.10.2021). En rouge les trois prélèvements d'eau actuels.

En utilisant des paramètres caractéristiques du pergélisol tels que l'altitude et l'exposition, la carte fournit une indication de la présence de pergélisol. Cela ne correspond pas nécessairement à la vérité. La carte montre la zone où des glaciers rocheux peuvent être présents. Ceci a été identifié en raison de la morphologie de la vallée. Dans cette zone, il y a de nombreux dépôts de glissements de terrain et des chutes de pierres, qui pourraient recouvrir des masses de glace. Si

des glaciers rocheux sont présents, ils ne sont pas très importants, en raison de la petite taille de la zone, mais ils pourraient néanmoins avoir une influence sur la libération de l'eau dans la vallée. Il est difficile d'estimer la quantité d'eau disponible sous forme de glace et de savoir si elle existe réellement. Même avec la présence de glace, les changements climatiques risquent de remonter l'altitude minimale du pergélisol ces prochaines décennies, ce qui peut entraîner notamment la disparition presque complète du pergélisol dans la Combe de l'A d'ici la fin du siècle, éliminant ainsi toute influence sur la disponibilité de l'eau dans la vallée. La figure 11 montre les trois points où l'eau est prélevée. Les deux points sur la rive orographique gauche pourraient être des sources d'eau liées au pergélisol.

## 5.4 La ressource d'eau future

### 5.4.1 Analyse des données CH2018

En analysant les moyennes annuelles des précipitations, on constate que celles-ci restent pratiquement inchangées. Cependant, nous pouvons voir que pendant la période estivale, la diminution sera élevée. En juillet et août, le changement sera évident pour les deux scénarios. Le scénario RCP 8.5 montre une forte diminution des précipitations dès le mois de juin, et maintient la diminution par rapport à l'état actuel jusqu'en octobre (figure 12).



Figure 12: Précipitations mensuelles futures et de la période de référence. Année 2060, Scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5.

L'équivalent en eau de la neige montre une nette diminution de l'eau libérée des réserves de neige pendant les mois d'été. Par rapport à l'état actuel, les réserves de neige seront épuisées un mois plus tôt qu'aujourd'hui, c'est-à-dire au début du mois de juillet. Cette tendance est très similaire dans les deux scénarios climatiques (figure 13).

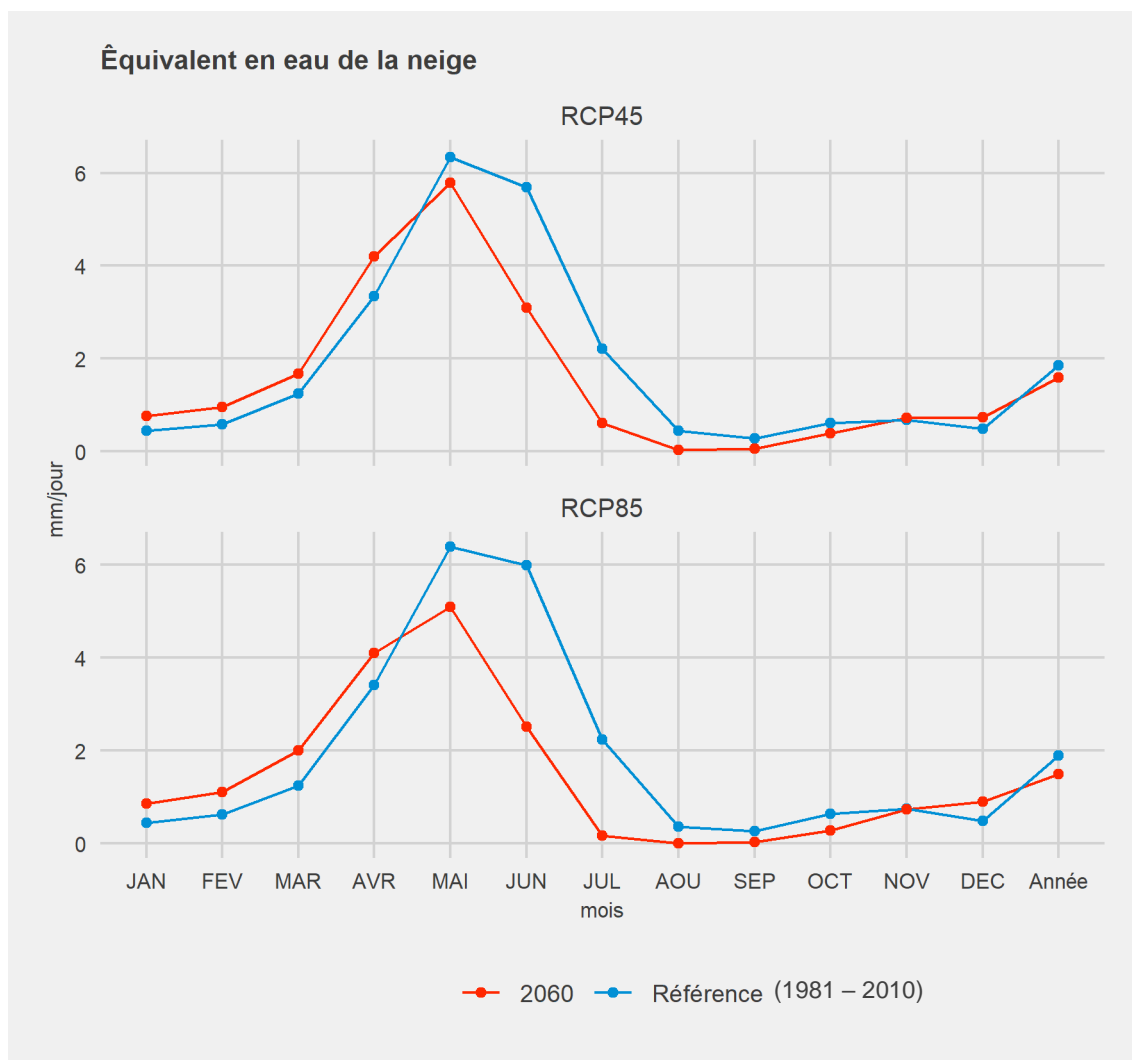


Figure 13: Équivalents en eau de la neige mensuels futurs et de la période de référence. Année 2060, Scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5.



La figure 14 indique également le pic annuel des débit un mois plus tôt qu'aujourd'hui. Cela peut être retracé dans la figure 13, qui montre une fonte nivale plus rapide à la fin du printemps et au début de l'été.

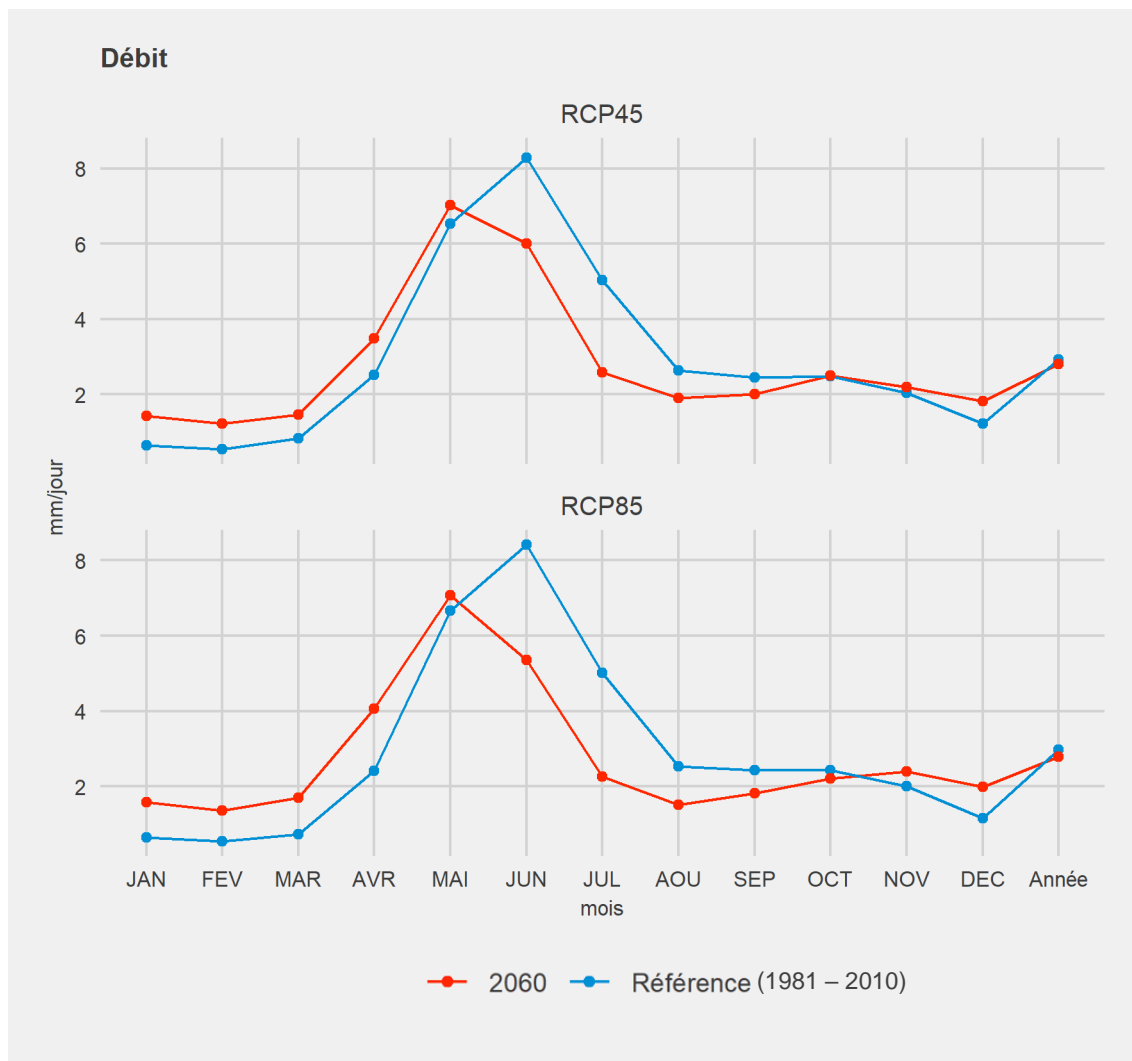


Figure 14: Débits mensuels futurs et de la période de référence. Année 2060, Scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5.

Pour l'évapotranspiration, une augmentation peut être observée dans les deux scénarios au cours de la saison alpestre (figure 15). Dans le scénario RCP 8.5, on constate une augmentation de l'évapotranspiration d'avril à novembre. Les grands changements sont que l'augmentation de l'évapotranspiration peut toucher les mois d'avril et de novembre, qui sont à « évapotranspiration nulle » dans la période de référence. Ces deux mois ont aujourd'hui des températures moyennes très basses, qui ne permettent donc pas le calcul empirique de l'évapotranspiration (en raison de la formule empirique, elle ne peut être calculée avec des températures inférieures ou égales à 0). Cela correspond donc à une augmentation des températures moyennes mensuelles.

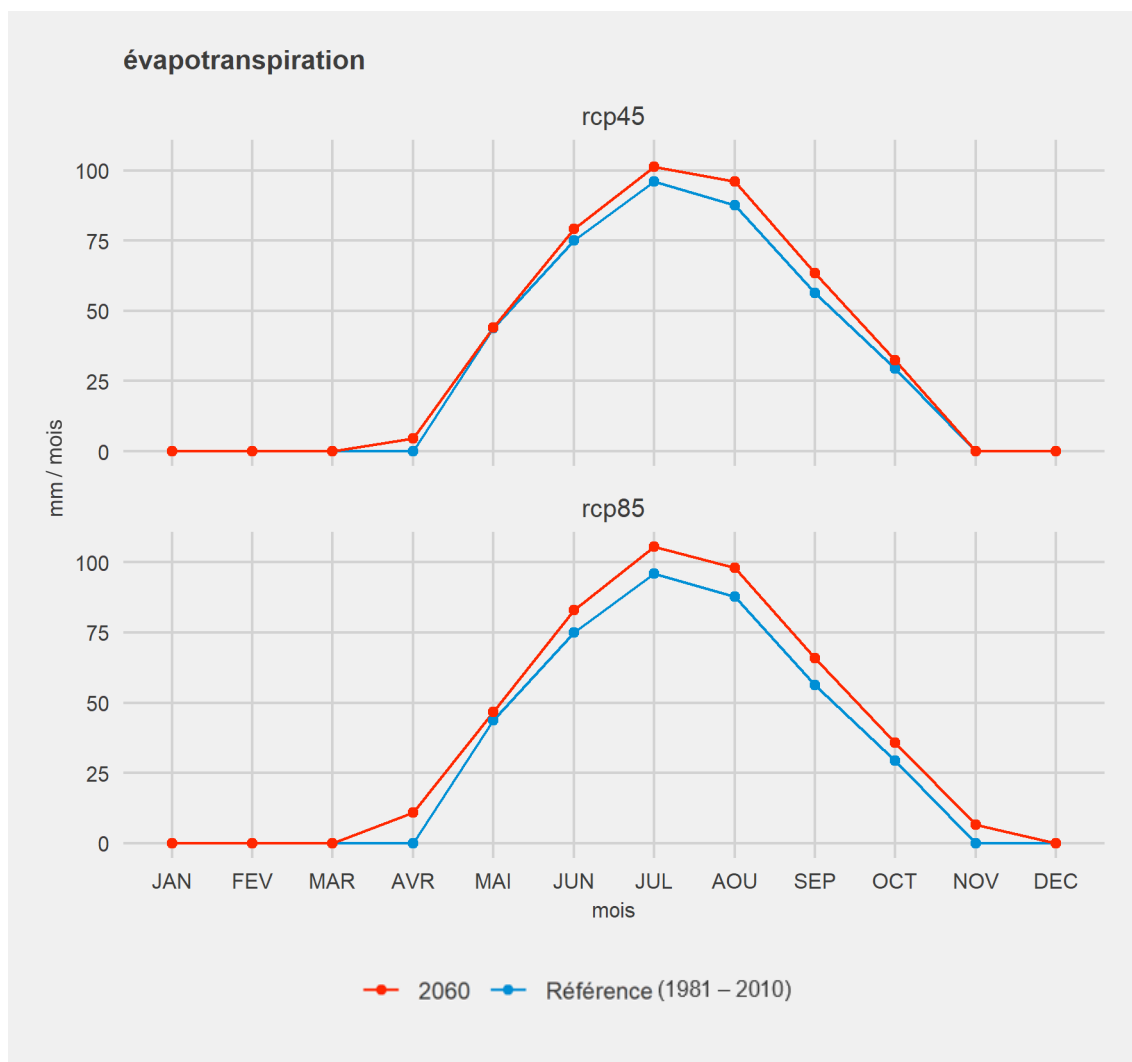


Figure 15: Évapotranspirations potentielles (ETP) mensuelles futures et de la période de référence. Année 2060, Scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5.

#### 5.4.2 Calcul du changement relatif CH2018

Le changement relatif en pourcentage des données climatiques et hydrologiques nous en dit long sur l'ampleur du changement entre aujourd'hui et 2060. Le résultat en pourcentage nous indique quel changement est attendu par rapport à la quantité actuelle. Un résultat de 100 % signifie qu'il n'y aura aucun changement par rapport aux quantités actuelles du facteur climatique ou hydrologique, tandis qu'un résultat de 50 % signifie que nous aurons 50 % de la quantité actuelle.

Dans le cas des précipitations (figure 16), une diminution plus importante des précipitations estivales peut être observée dans le scénario RCP 8.5. Le mois d'août enregistre 83 % de la quantité actuelle de précipitations. Il convient de noter que le mois d'août est déjà un mois à faible pluviosité.

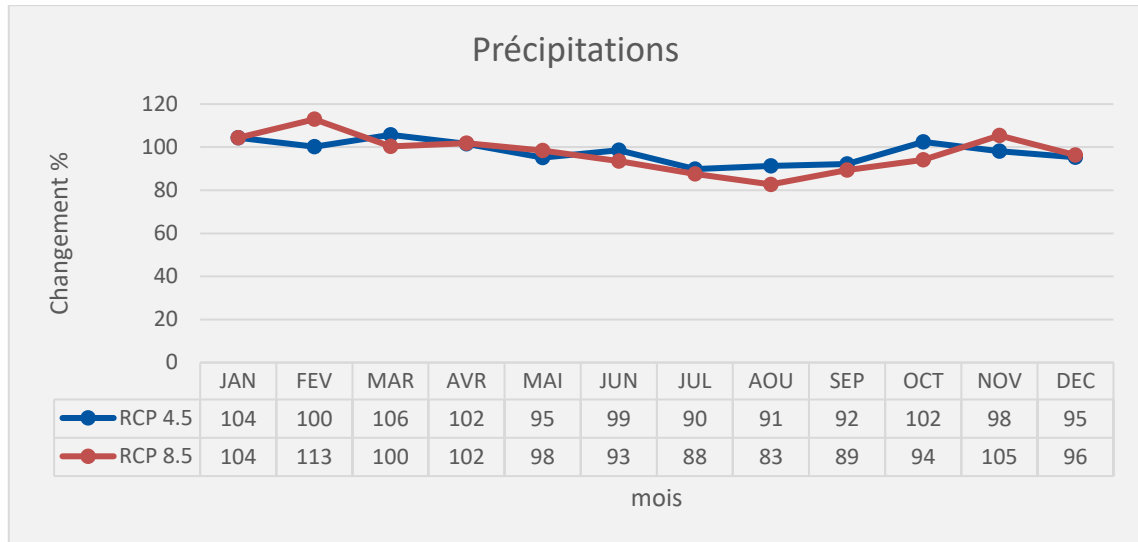


Figure 16: Variation relative en pourcentage des précipitations entre aujourd'hui et 2060. RCP 4.5 et RCP 8.5.

La quantité de neige au sol pendant les mois d'été (figure 17) montre un très grand changement par rapport à ce que nous pouvons actuellement observer ou lire dans les mesures officielles. En observant le graphique, nous pouvons lire que du mois de mai au mois de novembre, nous avons des données plus faibles par rapport aux quantités actuelles, avec une diminution maximale au mois d'août, où avec les deux scénarios nous n'avons pratiquement pas de neige au sol dans la vallée. Le stock de neige comme réserve d'eau sera donc fondu un ou deux mois plus tôt qu'aujourd'hui. En comparant ce graphique avec celui des débits (figure 18), on peut en déduire que c'est ce manque de neige qui est à l'origine de la diminution des débits sortants, ce qui confirme le fait que la Combe de l'A a actuellement un régime nival et que celui-ci va passer à un régime hydrologique pluvial pendant la période estivale.

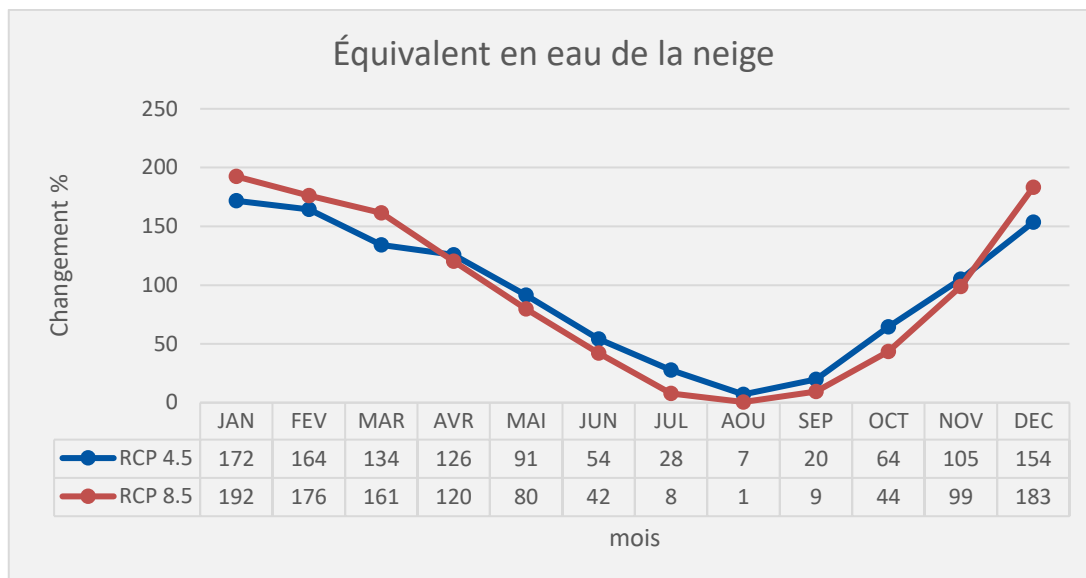


Figure 17: Variation relative en pourcentage de l'équivalent en eau de la neige entre aujourd'hui et 2060. RCP 4.5 et RCP 8.5.

En comparant les graphiques de neige (figure 17) et du débit (figure 18), on peut également déduire qu'il y aura une augmentation des précipitations hivernales, mais que le manteau neigeux mettra moins de temps à fondre, ce qui augmentera le ruissellement printanier (surtout en mars et avril) et entraînera une diminution du débit pendant la période estivale. Les deux scénarios montrent une tendance similaire, avec une diminution plus importante du débit en juillet.

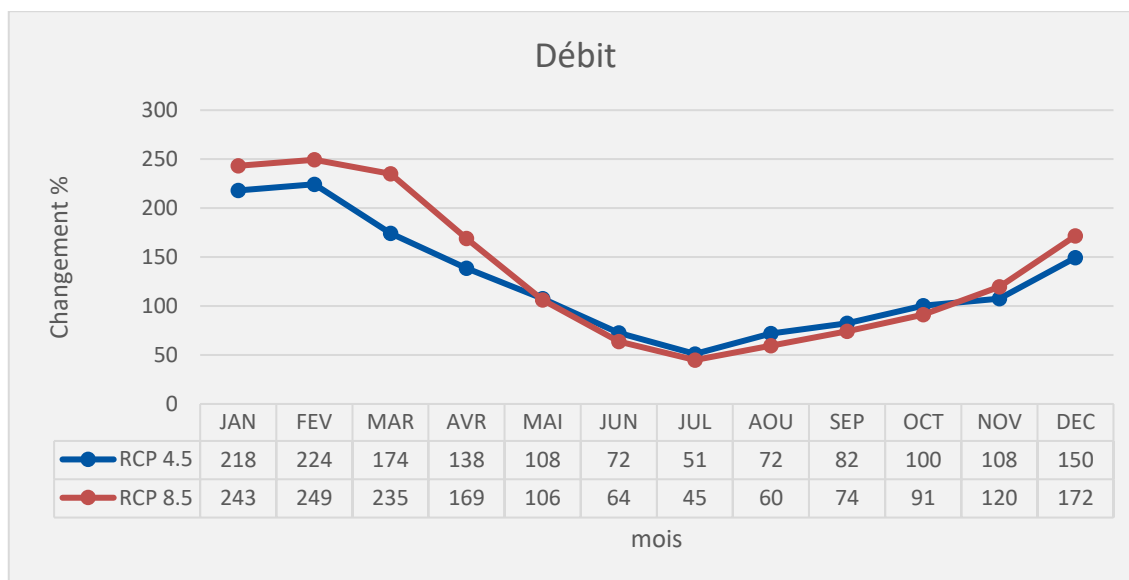


Figure 18: Variation relative en pourcentage du débit entre aujourd'hui et 2060. RCP 4.5 et RCP 8.5.

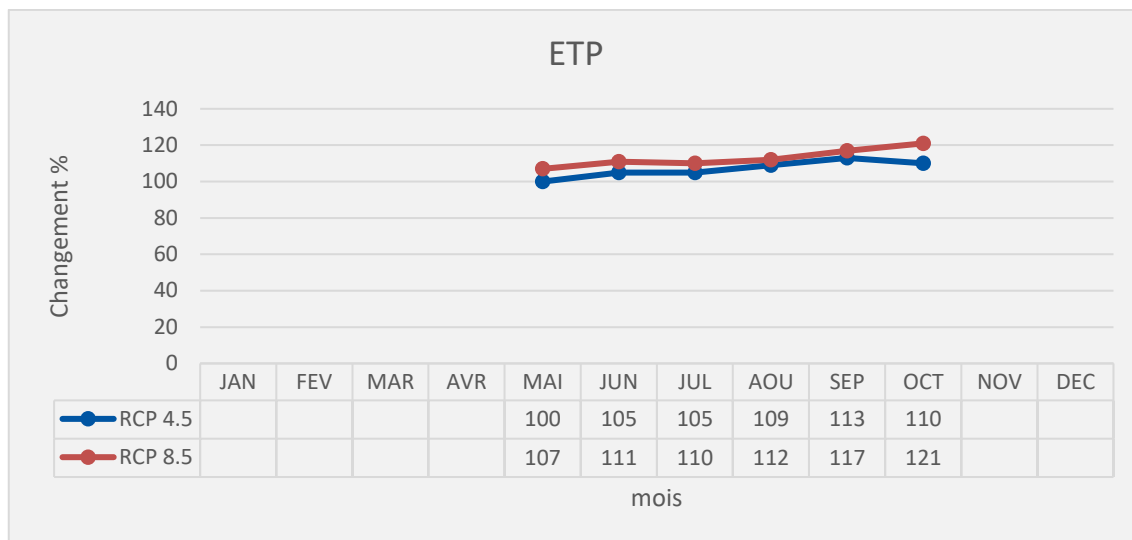


Figure 19: Variation relative en pourcentage de l'évapotranspiration potentielle entre aujourd'hui et 2060. RCP 4.5 et RCP 8.5.

## 5.5 Bilan hydrique et changement réel

Mois	Bilan 2020	Bilan 2060 RCP 4.5	Bilan 2060 RCP 8.5
Avril	190.74	213.44	202.95
Mai	222.60	192.76	173.76
Juin	104.49	40.60	17.30
Juillet	41.21	-5.22	-22.97
Août	-12.41	-34.37	-41.32
Septembre	-2.30	-17.55	-21.16

Tableau 4: Bilan hydrique par périodes et scenario en mm/mois.

Les mois d'avril et de mai présentent un bilan positif tant aujourd'hui que dans les deux scénarios analysés (tableau 4). Il faut noter qu'une grande partie de l'eau qui reste dans la vallée à ces périodes y reste sous forme de manteau neigeux, qui sera rendu disponible dans les mois suivants et qu'ensuite, en mai, l'activité végétative commence, utilisant beaucoup d'eau dans les basses altitudes de la combe. Le mois d'avril montre une augmentation du bilan hydrique. Cela est dû à la forte augmentation de la fonte des neiges au cours de ce mois. En observant l'ensemble des données analysées, il est clair que le manteau neigeux ne sera plus conservé pour la période estivale, répartissant la réserve d'eau sur les mois d'été, mais qu'il fondra en grande partie en début de saison, augmentant les débits sortants et la quantité d'eau libérée en mai.

Mois	Débit 2020 l/s	Débit RCP 4.5 l/s	Débit RCP 8.5 l/s
Avril	108	149.0	182.5
Mai	471.3	509.0	499.6
Juin	527.3	379.7	337.5
Juillet	283.5	144.6	127.6
Août	173.8	125.1	104.3
Septembre	162.2	133.0	120.0

Tableau 5: Débit en l/s pour le Torrent de l'A : Aujourd'hui et pour les deux RCP en 2060. Ce débit correspond à la zone de la Tsissette, où la campagne de mesure 2010-2011 a été réalisée et où la prise d'eau pour les turbines est prévue. L'emplacement exact est indiqué à l'annexe 1 figure 1.

Le tableau 5, qui appuie la figure 18, nous permet de voir le changement prévu dans le débit quantifié avec une unité de mesure plus commune. Pour les deux scénarios, il y aura une diminution spectaculaire du débit pendant les mois d'été. En août, avec le scénario RCP 8.5, il y aura un débit sortant d'un peu plus de 100 l/s. Les débits sortants auront tendance à augmenter à la fin du printemps en raison de l'augmentation de la fonte des neiges pendant cette période (figure 13).

## 5.6 Besoins en eau des pâturages

type de terrain	scénario							
		Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	
Limon sableux 60 cm	Ref	20	40	50	55	40	25	
Limon sableux 60 cm	CCmax	40	45	50	70	60	25	
<b>Pourcentage d'augmentation en 2060 (%)</b>		<b>100</b>	<b>12.5</b>	<b>0</b>	<b>27</b>	<b>50</b>	<b>0</b>	

Tableau 6: Besoins supplémentaires en eau des pâturages du Valais (mm) [9]. La dernière ligne montre l'évolution en pourcentage pour 2060.

En analysant la situation avec les résultats des analyses précédentes, on constate que les besoins en eau seront plus importants en début de saison, avec deux fois plus d'eau qu'actuellement. Cela nous montre l'importance de la saison hivernale pour un bon début de saison pour la croissance des pâturages. Nous constatons qu'en juillet et en août, la quantité d'eau nécessaire à l'entretien des pâturages en 2060 sera respectivement 27 % et 50 % plus élevée qu'aujourd'hui, afin de permettre aux plantes de puiser dans la quantité d'eau disponible aujourd'hui. Ce modèle nous permet donc de comprendre que la forte diminution des précipitations et la tendance affichée par le bilan hydrique se traduiront par un grand manque d'eau pour les pâturages, qui risquent de jaunir dès le mois de juillet.



## 6 Problématique et solutions

### 6.1 Problèmes liés à la pénurie d'eau

En 2022, il est difficile de dire lequel des scénarios proposés par CH2018 et HydroCH2018 sera le plus réaliste. Ces dernières années nous ont appris que des années de sécheresse extrême comme celle de 2003 peuvent se produire et il n'est pas à exclure qu'à l'avenir, les années de sécheresse puissent ressembler au scénario le plus drastique, le RCP 8.5.

Dans les deux scénarios (RCP 4.5 et RCP 8.5), une tendance négative du bilan hydrique est observée dans la Combe. Cela ne signifie pas impérativement que la vallée va manquer d'eau, car nous analysons des données modélisées, dont la précision est limitée, mais cela nous montre une tendance, selon laquelle, en 2060, la quantité d'eau disponible dans la Combe de l'A sera sensiblement inférieure à celle disponible aujourd'hui. La neige tombée aujourd'hui, qui reste au sol dans les hauteurs de la combe comme principale réserve d'eau de ce bassin enneigé, sera épuisée au moins un mois plus tôt, prolongeant l'attente entre les périodes de précipitations. En observant la figure 13, où est reportée la tendance de la neige au sol, nous remarquons que dans les deux scénarios, la quantité de neige au sol au début du mois de juin est la moitié de celle que nous trouvons aujourd'hui et au début du mois de juillet, elle est presque épuisée. Cette tendance, ainsi que le solde négatif de ces deux mois sans eau conduisent à dire qu'en août et septembre il y aura une pénurie d'eau dans la vallée.

Cela entraînera les problèmes suivants :

- Les activités d'alpage et de cabane en juillet, août et septembre sont menacées par le manque d'eau. Ce problème pourrait être annuel ou seulement pendant les années de grande sécheresse.
- Les pâturages bénéficieront d'une grande quantité d'eau libérée en début de saison, mais celle-ci ne sera pas suffisante pour assurer la viabilité du pâturage jusqu'en août. Ce phénomène peut déjà être observé aujourd'hui, la flore des pâturages se fane avant la fin de la saison alpine, comme en témoignent les pâturages jaunes.  
Ce phénomène est également influencé par l'augmentation de la température et donc par l'augmentation de l'évapotranspiration.

### 6.2 Solutions

Compte tenu des problèmes susmentionnés, l'objectif de ce sous-chapitre est de proposer des solutions efficaces et, surtout, réalisables, qui permettront de maintenir les activités agricoles et touristiques dans le futur. Comme décrit dans les chapitres précédents, la Combe de l'A risque de passer d'un régime nival à un régime pluvial, perdant ainsi une grande partie de son approvisionnement en eau. Pour cette raison, nous proposons trois variantes possibles de stockage de l'eau :

#### 1. Ouvrage d'accumulation d'eau couvert

#### 2. Ouvrage d'accumulation d'eau à ciel ouvert-étang

#### 3. Prise tyrolienne avec un ouvrage d'accumulation d'eau

Pour la cabane on propose une seule variante, car la quantité d'eau à stocker est bien inférieure à celle nécessaire au bétail. En plus nous proposons d'informer la population et les touristes sur l'utilisation parcimonieuse de l'eau dans la cabane et sur le changement climatique.

### 6.2.1 Ouvrage d'accumulation d'eau couvert

Cette solution consiste à construire un ouvrage d'accumulation d'eau couvert. L'avantage de la couverture est d'éviter la forte évapotranspiration de l'eau et donc la nécessité de surdimensionner la quantité d'eau stockée en raison de l'évaporation.

Le stockage de toute l'eau nécessaire pour une saison correspond à 535 000 l ou 540 m<sup>3</sup> (arrondi vers le haut), qui pourrait mesurer environ **15m x 10m x 3.6m**. Les dimensions de l'ouvrage sont considérables, tout comme la quantité d'eau nécessaire pour le remplir. Il devrait être construit pas trop loin d'un cours d'eau, afin qu'il puisse être rempli par le plus gros ruissellement pendant les mois de printemps. Les avantages et les inconvénients de cet ouvrage sont énumérés ci-dessous :

+	-
Moins d'évaporation de l'eau	Des coûts de construction très élevés
Possibilité de construire un système de canalisation pour les abreuvoirs dans les pâturages	Béton

Tableau 7: Avantages et inconvénients de l'ouvrage d'accumulation d'eau couvert.

Dans le cas d'une telle construction, on pourrait penser à l'utiliser comme bassin d'incendie d'urgence pour la lutte contre les incendies par hélicoptère, l'emplacement au-dessus de la lisière de la forêt permettant une utilisation pratique. Cela pourrait également permettre le déplacement éventuel de l'eau par hélicoptère, au cas où un canal pour les abreuvoirs ne serait pas construit.

La construction en béton pourrait être réalisée partiellement sous terre, ce qui éviterait un impact visuel trop important.

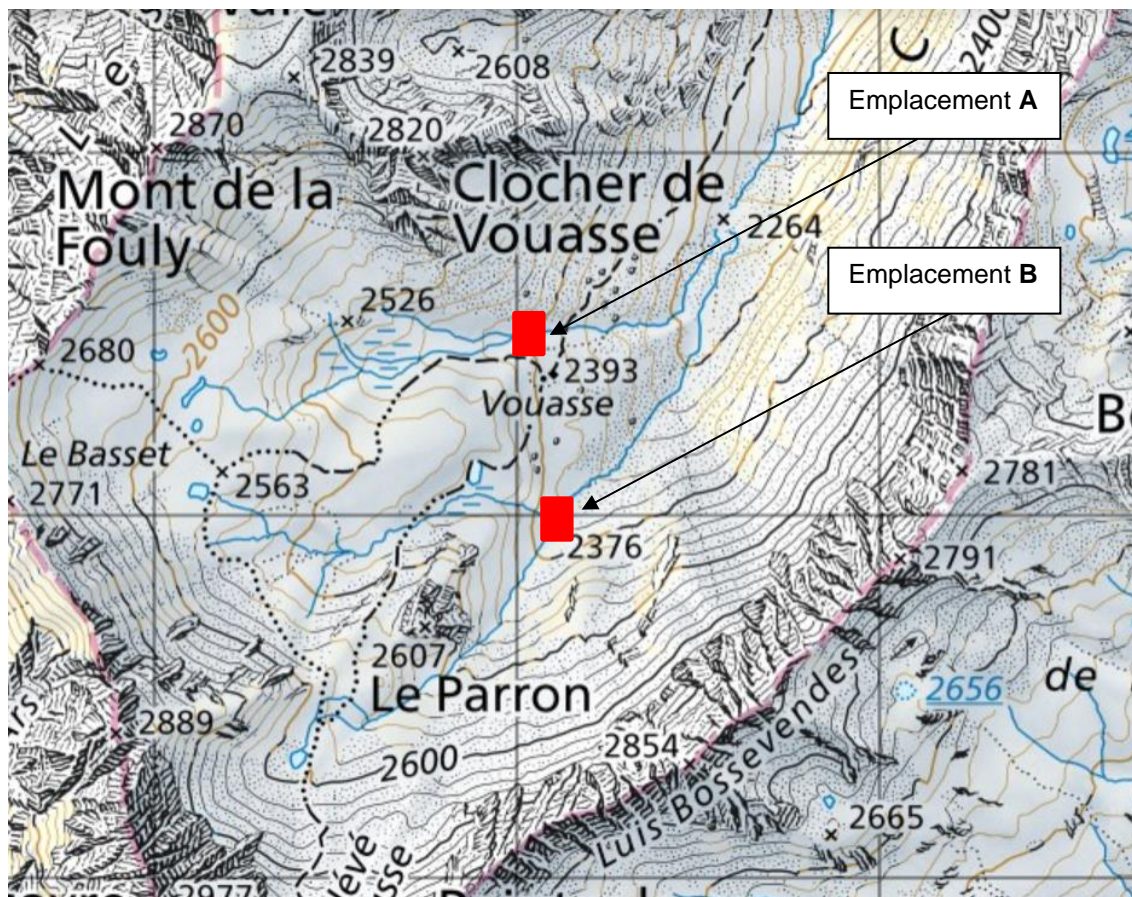


Figure 20: Emplacement de l'ouvrage d'accumulation d'eau couvert, variante A et variante B.

Le positionnement doit être cohérent et doit donc se trouver dans une zone où l'eau peut être prélevée pendant la période de fonte des neiges au printemps. L'emplacement optimal est donc le long d'un cours d'eau, où l'eau d'un bassin versant a tendance à s'accumuler. Dans le cas des deux variantes de la figure 20, la variante A est celle qui est recommandée, car elle est plus proche des pâturages utilisés.

### 6.2.2 Ouvrage d'accumulation d'eau à ciel ouvert – étang

La deuxième solution est basée sur la construction d'étangs pour stocker l'eau (figure 21). Dans ce cas, il serait possible de construire plusieurs bassins à la surface de l'alpage pour stocker la quantité nécessaire. Cette solution a déjà été adoptée dans certaines localités suisses, comme le Jura bernois et le Canton Vaud [3]. La particularité de ce système est que l'étang se remplit grâce à tous les types de précipitations. L'objectif est que l'étang soit plein au début de la saison estivale et qu'il soit consommé pendant cette saison. Les étangs ont des coûts de construction inférieurs à ceux des ouvrages d'accumulation d'eau en béton, car il n'est pas nécessaire de transporter ou de faire voler le béton ; seulement le revêtement étanche doit être transporté. Le principe de l'étang n'est cependant pas de servir d'abreuvoir direct pour le bétail. Celui-ci devra être clôturé et, comme dans le cas des ouvrages d'accumulation d'eau de la première variante, un système d'abreuvement devra être construit dans le pâturage. L'avantage majeur de cette variante est qu'elle permet la construction d'un réservoir à remplissage automatique sans avoir à dépendre d'un emplacement spécifique pour l'approvisionnement en eau. Ceux-ci peuvent être construits dans les zones de pâturage, garantissant la possibilité d'abreuver le bétail pour chaque secteur de pâturage.

+	-
Coûts de construction inférieurs à ceux du béton	Matériau imperméable d'origine synthétique
Possibilité de construire un système de canalisation pour les abreuvoirs dans les pâturages	Risque de dommages hivernaux (avalanches, glissements, chutes de pierres, etc.)
	Un stockage de 100 mètres cubes nécessite une surface d'environ 50 mètres carrés pour permettre un remplissage uniquement par les précipitations (sans le ruissellement).

Tableau 8: Avantages et inconvénients du bassin d'eau de pluie.



Figure 21: Un étang bâche pour stocker l'eau de pluie, Canton de Vaud [3].

Ci-dessous les emplacements possibles pour les étangs. L'idée est d'avoir des étangs chacun situés dans des zones de pâturage :





Figure 22: Emplacement possible des étangs.

Le dimensionnement :

Idéalement, la taille de ces réservoirs devrait permettre un volume de 100 mètres cubes. En simplifiant la forme de l'étang à celle d'un hémisphère, cela signifie un rayon d'environ 3,6 mètres. Un rayon de 4 mètres permettrait d'obtenir un étang d'un volume total de 136 mètres cubes.

Dans le Jura, on a calculé qu'un bassin de cette taille ne peut être rempli que par la neige et la pluie pendant la saison hivernale. L'avantage dans une vallée alpine, telle que la Combe de l'A, est que l'évapotranspiration est minimale et n'a donc pas une influence aussi grande qu'à des altitudes plus basses et des températures plus élevées. L'inconvénient est que la quantité d'eau disponible par les précipitations et les chutes de neige n'est pas suffisante pour remplir un étang

de 4 mètres de rayon. La surface calculée avec un rayon de 4 m correspond à 50 mètres carrés. Cela signifie qu'avec des précipitations sous forme de pluie (1mm = 1 l/m<sup>2</sup>) totale d'octobre à avril d'environ 800 mm (données météorologiques actuelles), un tel réservoir pourrait être rempli de 40 000 litres d'eau, soit 40 mètres cubes. La construction de bassins plus grands nécessiterait l'exploitation de la fonte des neiges pendant le mois d'avril, puis la construction d'un captage dans une zone où la fonte des neiges s'écoule pendant la saison printanière afin que le bassin soit plein pour la saison estivale.

**Dans les deux cas (variante ouvrage d'accumulation d'eau couvert et à ciel ouvert), on peut envisager de stocker une plus petite quantité d'eau, afin de couvrir les besoins en eau d'un ou deux mois de sécheresse. Cela permettrait de réduire les coûts de construction des ouvrages. En tout cas, même pour le dimensionnement d'un seul mois, il est recommandé d'utiliser le facteur de sécurité de 21 jours supplémentaires, comme proposé par Agridea.**

Les tendances indiquées ainsi que l'analyse des besoins en eau des pâturages font réfléchir sur la durée de la saison d'estivage. L'analyse des besoins des pâturages montre une forte augmentation des besoins en eau en avril, ce qui peut être dû au fait que le modèle ne prend pas en compte la forte disponibilité en eau due à la fonte des neiges. L'augmentation du besoin en eau en fin de saison correspond tout à fait aux résultats des autres analyses et nous pouvons donc supposer une sécheresse précoce dans les pâturages. Cela pourrait signifier, également en raison de la fonte précoce des neiges, un début de saison alpine plus précoce d'un mois pour 2060 et certainement une utilisation stratégique des pâturages en fonction de la disponibilité de l'eau.

### **6.2.3 Prise Tyrolienne / « Tyrolerwehre » avec un ouvrage d'accumulation d'eau**

Comme troisième variante, nous proposons l'installation d'une prise tyrolienne. Ce système est très populaire dans le canton du Valais et dans les régions de montagne, car il permet, avec un dimensionnement adéquat, de prélever la quantité d'eau souhaitée, tout en laissant suffisamment d'eau dans le cours d'eau.

L'idée est de construire un ouvrage d'accumulation d'eau au niveau de la prise d'eau. Cela permettra de prélever de l'eau pendant la période où elle est abondante, c'est-à-dire au printemps, et de laisser couler la rivière pendant l'été. Il convient d'accorder une attention particulière au fait que, pendant la période estivale, une partie de l'eau du Torrent de l'A est prélevée pour l'irrigation et qu'il ne faut pas créer de conflits d'utilisation.

Un ouvrage d'accumulation d'eau pourrait être rattaché au projet d'irrigation de Liddes, mais cela signifierait que l'ouvrage serait plus bas que l'alpage et de nombreux pâturages. Une autre option serait de construire un ouvrage d'accumulation d'eau avec la prise d'eau correspondante plus en amont. Ce système permettrait un apport d'eau moins répartis sur les pâturages, mais l'approvisionnement en eau serait assuré.

Afin de construire une telle prise d'eau plus en amont de la cabane, il faudrait réaliser une campagne de mesures au niveau de la prise d'eau. Le remplissage d'un réservoir de 500 mètres cube pendant la saison printanière nécessiterait un débit minimum. À titre d'exemple, le remplissage d'un tel ouvrage d'accumulation en une semaine nécessiterait un écoulement de :

**500'000 l / 604'800 s (1 semaine) = 0.83 l/s**





Figure 23: Exemple de vieille prise tyrolienne / « Tyrolerwehre », Combe de l'A (Foto S. Maillard, 01.08.2020).

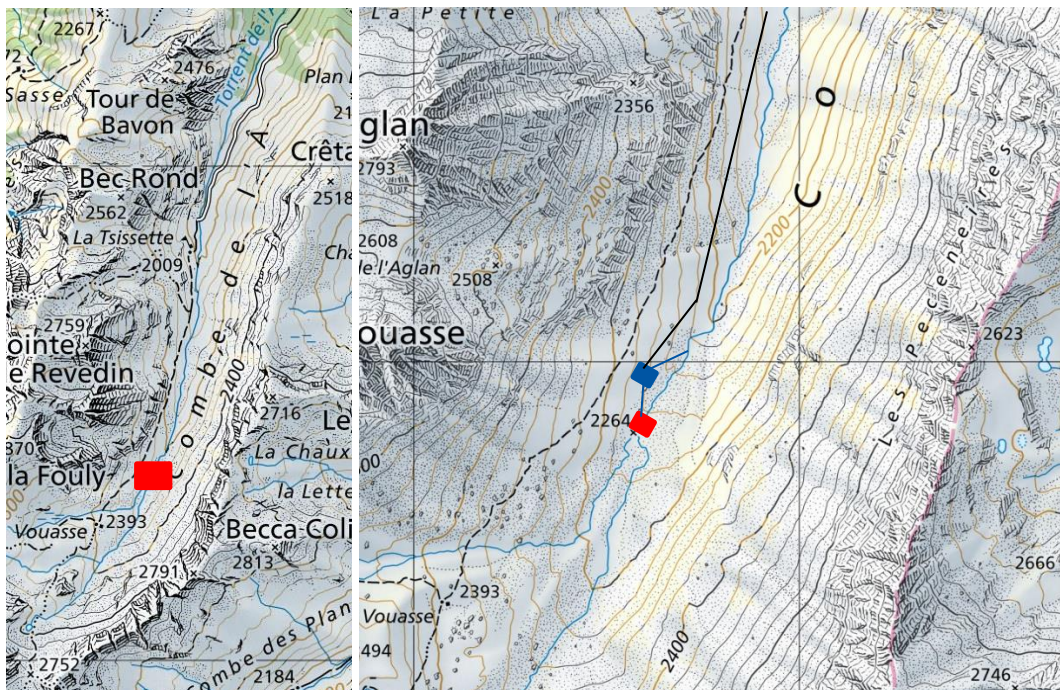


Figure 24: En rouge la position possible de la prise d'eau en amont de la Tsissette. En bleu, les tuyaux de remplissage de l'ouvrage d'accumulation d'eau et le trop-plein. En noir un conduit possible en direction de la Tsissette, où des abreuvoirs pourraient être construits.

Comme toutes les variantes, ce système présente des avantages et des inconvénients, qui sont énumérés ci-dessous :

+	-
Réduction des coûts de construction en cas d'utilisation de la prise tyrolienne préfabriquée	Construction dans le cours d'eau
Approvisionnement facile en eau au printemps	Ouvrage d'accumulation d'eau en béton

Tableau 9: Avantages et inconvénients de la prise tyrolienne.

Cette variante peut également être repensée avec la collecte dans des réservoirs plus petits, en les plaçant dans des zones de pâturage, conçus pour l'approvisionnement en eau pendant la période de pâturage dans une zone donnée. Ils pourraient être construits là où se trouvent actuellement de petits cours d'eau et où l'eau de la fonte des neiges s'écoulerait également à l'avenir.

#### 6.2.4 Stockage pour la cabane de la Tsissette et du berger

La cabane de Tsissette a besoin de moins d'eau que le bétail. Comme calculé ci-avant, les besoins en eau pour la vie du berger et le fonctionnement de la cabane correspondent à 14'300 l pour toute la saison d'été. Pour des raisons de commodité, cette eau, étant donné sa faible quantité, peut être stockée dans des citernes spéciales en matière synthétique ou en acier inoxydable. Ces citernes peuvent être placées près de la cabane et sont disponibles en différentes tailles. Cependant, la construction d'une structure de protection externe est recommandée, surtout en raison de la situation en montagne, où les citernes pourraient être endommagés par l'hiver.

L'installation de ces citernes pour la cabane n'est pas à considérer comme un travail urgent, car la cabane a une consommation d'eau relativement faible. Cet ouvrage de stockage peut être planifié et construit en peu de temps au cas où la cabane serait confrontée à des pénuries d'eau à l'avenir. La route menant à la cabane permettrait éventuellement de remplir le réservoir en transportant l'eau sur un véhicule.



## 7 Conclusions

Avec ce travail, nous avons pu décrire la tendance de l'eau dans la Combe de l'A pour 2060, montrant que pendant la période estivale il y aura une forte diminution des précipitations et que la fonte précoce des neiges sera le facteur ayant le plus d'impact sur la diminution de l'écoulement estival. Ces résultats doivent certainement être considérés avec un œil critique, car le degré d'incertitude des données climatiques et hydrologiques de CH2018 et Hydro CH2018 doit être pris en compte. Cependant, la Combe de l'A semble être une vallée avec régime de neige et les autres sources d'eau existantes sont rares, même en considérant que d'éventuels glaciers rocheux n'occuperaient pas une grande surface.

La possibilité que la Combe de l'A soit confrontée à de graves problèmes de sécheresse est réelle et cela entraînerait des problèmes dans la gestion de l'alpage de la Tsissette. En ce qui concerne la cabane, sa consommation est facilement stockée et le coût éventuel du transport de l'eau supplémentaire serait limité (route). Pour l'estivage du bétail, la quantité d'eau est élevée et nécessiterait un investissement non négligeable pour pouvoir stocker la quantité d'eau nécessaire pour la saison alpine. Le problème ne doit pas être sous-estimé, car il existe déjà en Suisse des régions où l'eau a dû être transportée pour abreuver le bétail et nourrir la population. Une solution pragmatique serait d'observer le déroulement des prochaines années en mesurant le débit du cours d'eau. En cas de diminution du débit, l'une des variantes mentionnées dans le chapitre ci-dessus peut être adoptée.

En conclusion, cette étude doit nous faire prendre conscience de la possible situation future de l'eau dans la Combe de l'A, car la tradition alpine, en plus d'être une activité de subsistance, est liée à la tradition du territoire et de l'arc alpin et doit être préservée. L'impossibilité d'estiver le bétail sur l'alpage serait une perte pour la région et le tourisme qu'elle attire ainsi que pour la culture locale.

## 8 Remerciement

Il faut tout d'abord remercier le service de l'agriculture du canton du Valais, qui a accepté ce projet pilote et qui a fourni de la documentation, des photos et des conseils, permettant une large vue d'ensemble du site et du sujet. Un grand merci également à Daniel Lattion, Conseiller communal en charge de l'agriculture et de la bourgeoisie, et à la commune de Liddes pour la documentation fournie et pour l'entretien téléphonique. Enfin, merci à Massimiliano Zappa pour son temps, pour la séance et pour avoir fourni les données hydrologiques de HydroCH2018, qui ont rendu l'étude possible.

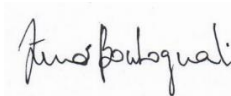
St. Gallen, den 31.05.2022

Dr. Thomas Egli  
Egli Engineering AG



Bern, den 31.05.2022

Zeno Bontognali  
Egli Engineering AG



## 9 Sources

- [1] Abera, Wuletawu & Formetta, Giuseppe & Borga, Marco & Rigon, Riccardo. (2017). Estimating the water budget components and their variability in a Pre-Alpine basin with JGrass-NewAGE. *Advances in Water Resources*. 104. 37–54. 10.1016/j.advwatres.2017.03.010.
- [2] Agridea, Jean-Luc Sautier. *Aménagement des alpages. Les ouvrages du génie rural, guide pratique*. 2009.
- [3] Agrihebdo. Des mesures pour contrer la problématique du manque d'eau dans les alpages. Page internet consultée le 5.9.2021 <https://www.agrihebdo.ch/dossiers/stockage-d-eau-sur-les-alpages>
- [4] Brunner, M. I., Björnson Gurung, A., Zappa, M., Zekollari, H., Farinotti, D., & Stähli, M. (2019). Present and future water scarcity in Switzerland: potential for alleviation through reservoirs and lakes. *Science of the Total Environment*, 666, 1033-1047. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.169>
- [5] Čadro S., Uzunović M. (2013). HOW TO USE: Package 'SPEI' For BASIC CALCULATIONS. 10.13140/RG.2.1.4351.7845.
- [6] National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp. ISBN: 978-3-9525031-4-0
- [7] DransEnergie SA et Commune de Liddes. *Irrigation de Liddes (rive Gauche) Turbinage des eaux de la Combe de l'A*. 2019.
- [8] Falalakis, George & Gemitzi, Alexandra. (2020). A simple method for water balance estimation based on the empirical method and remotely sensed evapotranspiration estimates. *Journal of Hydroinformatics*. 22. 10.2166/hydro.2020.182.
- [9] Fuhrer, J., & Smith, P. (2015). *Grundlagen für die Abschätzung des Bewässerungsbedarfs im Kanton Basel-Landschaft*.
- [10] Herrnegger M., Nachtnebel H., Haiden T. (2012). Evapotranspiration in high alpine catchments - An important part of the water balance!. *Hydrology Research*. 43. 460-475. 10.2166/nh.2012.132.
- [11] Jonas T., *Schneewasseräquivalent 1981 - 2010. Hydrologischer Atlas der Schweiz*. Bern 2018.
- [12] Maillard S. *Communications personnelles dans le cadre du projet et échange de documentation. Ingénieur d'arrondissement, Ing. du génie rural diplômé EPFL. Département de l'économie et de la formation Service de l'agriculture, Office des améliorations structurelles*. 2020
- [13] NCCS (National Centre for Climate Services) *Comprendre les scénarios climatiques*. Page internet consultée le : 24.05.2021. <https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/changement-climatique-et-impacts/scenarios-climatiques-suisse/comprendre-les-scenarios-climatiques.html>
- [14] NCCS (éd.) 2018 : CH2018 - scénarios climatiques pour la Suisse. National Centre for Climate Services, Zurich. 24 pages. Numéro ISBN 978-3-9525031-1-9
- [15] Nivalp SA et Commune de Liddes. *Projet de développement régional (PDR) Agritourisme Alpage de la Combe de l'A, Liddes (7435.20)*. 2016
- [16] Noetzli, J. and Phillips, M. 2019. Mountain permafrost hydrology. Hydro-CH2018 Project. Comissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN), Bern, Switzerland, 18 pp, doi:10.16904/slf.1.
- [17] OFEV (éd.) 2021 : *Effets des changements climatiques sur les eaux suisses. Hydrologie, écologie et gestion des eaux*. Office fédéral de l'environnement, Berne. *Connaissance de l'environnement no2101* : 134p.




- [18] Schweizer Alpen-Club (SAC/CAS). Wegleitung Hüttenbau. 2007. [https://sac-mythen.ch/images/dateien/SAC-Reglemente/Wegleitung\\_Huettenbau\\_SAC\\_2007.pdf](https://sac-mythen.ch/images/dateien/SAC-Reglemente/Wegleitung_Huettenbau_SAC_2007.pdf)
- [19] Service de l'agriculture de l'état du Valais. CONSTRUCTIONS RURALES EN ZONE D'ESTIVAGE : Analyse de la charge en bétail et de la production laitière. Alpage de l'A. 2020
- [20] STIL SA et commune de Liddes, Turbinage des eaux d'irrigation du torrent de l'A. Rapport sur les débits résiduels (art.33 Leaux). Liddes, mars 2018.

## Annexe 1 : Données météorologiques et hydriques

### Précipitations

Tableau 1: Moyenne mensuelles des précipitations calculées pour Liddes (2008 -2018), réélaboration de l'auteur. Source : DransEnergie SA et commune de Liddes. Etude agricole et hydrologique, Turbinage des eaux d'irrigation du torrent de l'A. Mars 2018.

Scénario	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.
Année normale	*104.82	*135.09	*79.05	*107.56	*85.6	*67.34
Année sèche	73.37	94.56	55.33	75.29	59.92	47.14
Sècheresse	31.45	40.53	23.72	32.27	25.68	20.20



X 70%
X 30%

\*Donnée utilisée pour le calcul du bilan hydrique.

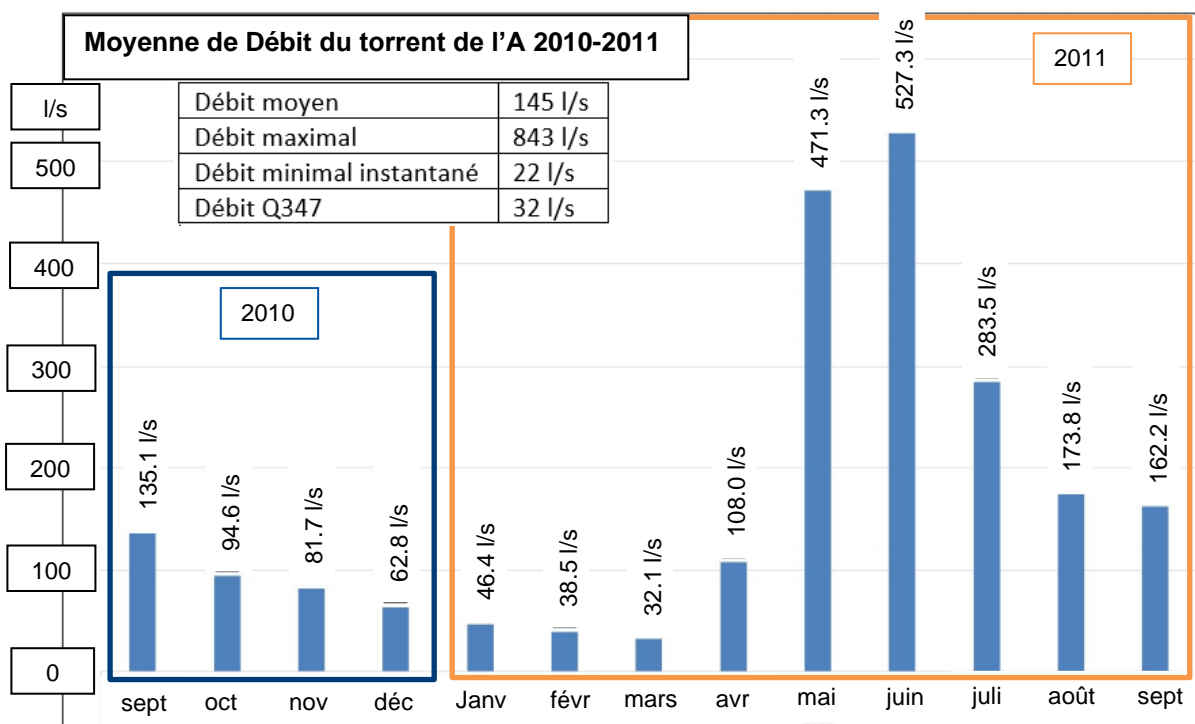


Figure 1: Débit mensuel mesuré pendant la période 2010-2011, La figure 2 montre l'emplacement des mesures, [7].

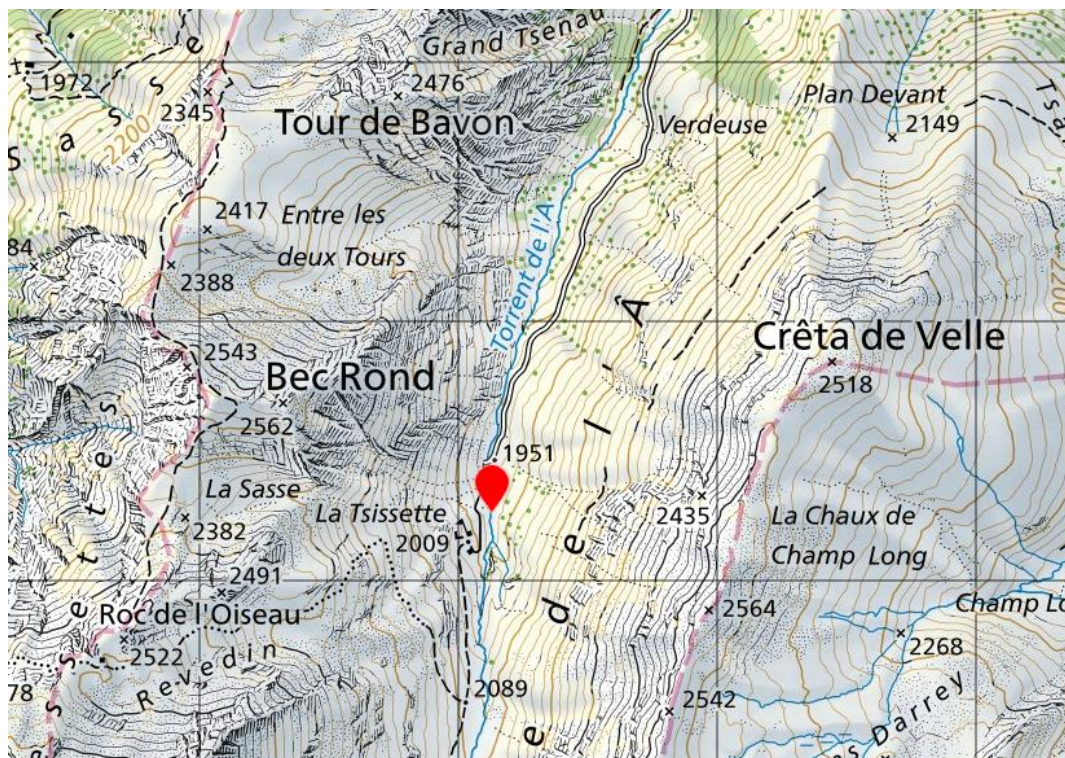


Figure 2: localisation des mesures effectuées en 2010 par Dransenergie (1960 msm). L'eau destinée aux turbines sera captée à cet endroit (map.geo.admin.ch, [7]).

## Annexe 2 : Bilan hydrique

Tableau 2: Bilan 2020

Mois	Précipitations mm/mois	Equivalent neige mm/mois	ETP mm/mois	Débit mm/mois	Bilan mensuel mm/mois
Avril	104.82	100.35	0.00	14.43	190.74
Mai	135.09	196.416	43.84	65.07	222.60
Juin	79.05	170.91	75.02	70.45	104.49
Juillet	107.56	68.696	95.91	39.14	41.21
Aout	85.6	13.64	87.66	24.00	-12.41
Septembre	67.34	8.31	56.28	21.67	-2.30

Tableau 3: Bilan 2060 RCP 4.5

Mois	Précipitations mm/mois	Equivalent neige mm/mois	ETP mm/mois	Débit mm/mois	Bilan mensuel mm/mois
Avril	106.92	126.44	0.00	19.92	213.44
Mai	128.34	178.74	44.04	70.27	192.76
Juin	78.26	92.29	79.23	50.73	40.60
Juillet	96.80	19.23	101.30	19.96	-5.22
Aout	77.90	0.95	95.94	17.28	-34.37
Septembre	61.95	1.66	63.40	17.77	-17.55

Tableau 4: Bilan 2060 RCP 8.5

Mois	Précipitations mm/mois	Equivalent neige mm/mois	ETP mm/mois	Débit mm/mois	Bilan mensuel mm/mois
Avril	106.92	120.42	0.00	24.39	<b>202.95</b>
Mai	132.39	157.13	46.79	68.97	<b>173.76</b>
Juin	73.52	71.78	82.91	45.09	<b>17.30</b>
Juillet	94.65	5.50	105.51	17.61	<b>-22.97</b>
Aout	71.05	0.14	98.11	14.40	<b>-41.32</b>
Septembre	59.93	0.75	65.80	16.04	<b>-21.16</b>

### Annexe 3 : Données CH2018 et changements relatif

Tableau 5: précipitations pour le RCP 4.5 Hydro-CH2018, Valeur indique la quantité en mm/jour. Les données sont divisées mensuellement et le changement correspond à la différence entre la période de référence et la période 2060.

Mois	RCP	Période	Valeur (mm/jour)	RCP	Période	Valeur (mm/jour)	Changement	Changement %
JAN	RCP45	Référence	4.425	RCP45	2060	4.618	1.04	+ 4%
FEV	RCP45	Référence	3.866	RCP45	2060	3.872	1.00	0%
MAR	RCP45	Référence	3.793	RCP45	2060	4.01	1.06	+ 6%
AVR	RCP45	Référence	3.673	RCP45	2060	3.731	1.02	+ 2%
MAI	RCP45	Référence	4.067	RCP45	2060	3.871	0.95	- 5%
JUN	RCP45	Référence	3.689	RCP45	2060	3.635	0.99	- 1%
JUL	RCP45	Référence	3.176	RCP45	2060	2.853	0.90	- 10%
AOU	RCP45	Référence	3.202	RCP45	2060	2.923	0.91	- 9%
SEP	RCP45	Référence	3.567	RCP45	2060	3.287	0.92	- 8%
OCT	RCP45	Référence	3.508	RCP45	2060	3.595	1.02	+ 2%
NOV	RCP45	Référence	3.563	RCP45	2060	3.497	0.98	- 2%
DEC	RCP45	Référence	4.581	RCP45	2060	4.363	0.95	- 5%
Année	RCP45	Référence	3.725	RCP45	2060	3.668	0.98	- 2%



Tableau 6: précipitations pour le RCP 8.5 Hydro-CH2018, Valeur indique la quantité en mm/jour. Les données sont divisées mensuellement et le changement correspond à la différence entre la période de référence et la période 2060.

Mois	RCP	Période	Valeur (mm/jour)	RCP	Période	Valeur (mm/jour)	Changement	Changement %
JAN	RCP85	Référence	4.395	RCP85	2060	4.589	1.05	+ 5%
FEV	RCP85	Référence	3.863	RCP85	2060	4.362	1.13	+ 13%
MAR	RCP85	Référence	3.798	RCP85	2060	3.814	1.00	0%
AVR	RCP85	Référence	3.652	RCP85	2060	3.719	1.02	+ 2%
MAI	RCP85	Référence	4.193	RCP85	2060	4.124	0.98	- 2%
JUN	RCP85	Référence	3.84	RCP85	2060	3.589	0.93	- 7%
JUL	RCP85	Référence	3.185	RCP85	2060	2.79	0.88	- 12%
AOU	RCP85	Référence	3.209	RCP85	2060	2.654	0.83	- 17%
SEP	RCP85	Référence	3.395	RCP85	2060	3.033	0.89	- 11%
OCT	RCP85	Référence	3.598	RCP85	2060	3.387	0.94	- 6%
NOV	RCP85	Référence	3.843	RCP85	2060	4.051	1.05	+ 5%
DEC	RCP85	Référence	4.291	RCP85	2060	4.132	0.96	- 4%
Année	RCP85	Référence	3.755	RCP85	2060	3.675	0.98	- 2%

Tableau 7: équivalent en eau de la neige pour le RCP 4.5 (Snow water equivalent) Hydro-CH2018, Valeur indique la quantité en mm/jour. Les données sont divisées mensuellement et le changement correspond à la différence entre la période de référence et la période 2060.

Mois	RCP	Période	Valeur (mm/jour)	RCP	Période	Valeur (mm/jour)	Changement %
JAN	RCP45	Référence	0.446	RCP45	2060	0.766	+ 72 %
FEV	RCP45	Référence	0.584	RCP45	2060	0.96	+ 64 %
MAR	RCP45	Référence	1.244	RCP45	2060	1.668	+ 34 %
AVR	RCP45	Référence	3.345	RCP45	2060	4.203	+ 26%
MAI	RCP45	Référence	6.336	RCP45	2060	5.792	- 9%
JUN	RCP45	Référence	5.697	RCP45	2060	3.09	- 56%
JUL	RCP45	Référence	2.216	RCP45	2060	0.615	- 72%
AOU	RCP45	Référence	0.44	RCP45	2060	0.031	- 93
SEP	RCP45	Référence	0.277	RCP45	2060	0.055	- 80%
OCT	RCP45	Référence	0.614	RCP45	2060	0.396	- 36%
NOV	RCP45	Référence	0.68	RCP45	2060	0.715	+ 5%
DEC	RCP45	Référence	0.483	RCP45	2060	0.742	+ 54%
Année	RCP45	Référence	1.857	RCP45	2060	1.592	- 14%

Tableau 8: équivalent en eau de la neige pour le RCP 8.5 (Snow water équivalent) Hydro-CH2018, Valeur indique la quantité en mm/jour. Les données sont divisées mensuellement et le changement correspond à la différence entre la période de référence et la période 2060.

Mois	RCP85	Période	Valeur (mm)	RCP85	Période	Valeur (mm)	Changement %
JAN	RCP85	Référence	0.448	RCP85	2060	0.862	+ 92%
FEV	RCP85	Référence	0.627	RCP85	2060	1.104	+ 76%
MAR	RCP85	Référence	1.239	RCP85	2060	1.999	+ 61%
AVR	RCP85	Référence	3.404	RCP85	2060	4.099	+ 20%
MAI	RCP85	Référence	6.389	RCP85	2060	5.094	- 20%
JUN	RCP85	Référence	5.984	RCP85	2060	2.519	- 58%
JUL	RCP85	Référence	2.231	RCP85	2060	0.172	- 92%
AOU	RCP85	Référence	0.363	RCP85	2060	0.002	- 99%
SEP	RCP85	Référence	0.266	RCP85	2060	0.025	- 91%
OCT	RCP85	Référence	0.633	RCP85	2060	0.276	- 56%
NOV	RCP85	Référence	0.739	RCP85	2060	0.73	- 1%
DEC	RCP85	Référence	0.488	RCP85	2060	0.894	+ 83%
Année	RCP85	Référence	1.894	RCP85	2060	1.489	- 21%

Tableau 9: débit pour le RCP 4.5 Hydro-CH2018, Valeur indique la quantité en mm/jour. Les données sont divisées mensuellement et le changement correspond à la différence entre la période de référence et la période 2060.

Mois	RCP	Période	Valeur (mm/jour)	RCP	Période	Valeur (mm/jour)	Changement %
JAN	RCP45	Référence	0.654	RCP45	2060	1.426	+ 118 %
FEV	RCP45	Référence	0.542	RCP45	2060	1.216	+ 124%
MAR	RCP45	Référence	0.838	RCP45	2060	1.461	+ 74%
AVR	RCP45	Référence	2.513	RCP45	2060	3.48	+ 38%
MAI	RCP45	Référence	6.525	RCP45	2060	7.022	+ 8%
JUN	RCP45	Référence	8.284	RCP45	2060	6.003	- 28%
JUL	RCP45	Référence	5.038	RCP45	2060	2.578	- 49%
AOU	RCP45	Référence	2.642	RCP45	2060	1.902	- 28%
SEP	RCP45	Référence	2.448	RCP45	2060	2.014	- 18%
OCT	RCP45	Référence	2.488	RCP45	2060	2.494	0%
NOV	RCP45	Référence	2.033	RCP45	2060	2.186	+ 8%
DEC	RCP45	Référence	1.218	RCP45	2060	1.821	+ 50%
Année	RCP45	Référence	2.925	RCP45	2060	2.8	- 4%

Tableau 10: débit pour le RCP 8.5 Hydro-CH2018, Valeur indique la quantité en mm/jour. Les données sont divisées mensuellement et le changement correspond à la différence entre la période de référence et la période 2060.

Mois	RCP	Période	Valeur (mm/jour)	RCP	Période	Valeur (mm/jour)	Changement %
JAN	RCP85	Référence	0.648	RCP85	2060	1.577	+ 143%
FEV	RCP85	Référence	0.545	RCP85	2060	1.359	+ 149%
MAR	RCP85	Référence	0.722	RCP85	2060	1.698	+ 135%
AVR	RCP85	Référence	2.405	RCP85	2060	4.066	+ 69%
MAI	RCP85	Référence	6.658	RCP85	2060	7.066	+ 6%
JUN	RCP85	Référence	8.413	RCP85	2060	5.357	- 36%
JUL	RCP85	Référence	5.011	RCP85	2060	2.251	- 55%
AOU	RCP85	Référence	2.537	RCP85	2060	1.514	- 40%
SEP	RCP85	Référence	2.433	RCP85	2060	1.81	- 26%
OCT	RCP85	Référence	2.428	RCP85	2060	2.213	- 9%
NOV	RCP85	Référence	1.996	RCP85	2060	2.389	+ 20%
DEC	RCP85	Référence	1.154	RCP85	2060	1.981	+ 72%
Année	RCP85	Référence	2.97	RCP85	2060	2.792	- 6%



Tableau 11: ETP pour le RCP 4.5, Valeur indique la quantité en mm/mois. Les données sont divisées mensuellement et le changement correspond à la différence entre la période de référence et la période 2060.

Mois	RCP	Période	Température °C	ETP (mm/mois)	RCP	Période	Température °C	ETP (mm/mois)	Changement %
JAN	RCP45	Référence	-5.56	0.00	RCP45	2060	1.25	0.00	
FEV	RCP45	Référence	-5.92	0.00	RCP45	2060	1.61	0.00	
MAR	RCP45	Référence	-4.06	0.00	RCP45	2060	1	0.00	
AVR	RCP45	Référence	-1.56	0.00	RCP45	2060	1.8	4.58	
MAI	RCP45	Référence	2.97	43.84	RCP45	2060	1.26	44.04	0 %
JUN	RCP45	Référence	6.69	75.02	RCP45	2060	2.49	79.23	+ 6%
JUL	RCP45	Référence	9.56	95.91	RCP45	2060	2.97	101.30	+ 6%
AOU	RCP45	Référence	9.39	87.66	RCP45	2060	3.55	95.94	+ 9%
SEP	RCP45	Référence	6.01	56.28	RCP45	2060	3.11	63.40	+ 13%
OCT	RCP45	Référence	2.63	29.46	RCP45	2060	1.69	32.52	+ 10%
NOV	RCP45	Référence	-2.33	0.00	RCP45	2060	1.98	0.00	
DEC	RCP45	Référence	-4.72	0.00	RCP45	2060	1.56	0.00	

Tableau 12: ETP pour le RCP 8.5, Valeur indique la quantité en mm/mois. Les données sont divisées mensuellement et le changement correspond à la différence entre la période de référence et la période 2060.

Mois	RCP	Période	Température °C	ETP (mm/mois)	RCP	Période	Température °C	ETP (mm/mois)	Changement %
JAN	RCP85	Référence	-5.56	0.00	RCP85	2060	1.68	0.00	
FEV	RCP85	Référence	-5.92	0.00	RCP85	2060	2.18	0.00	
MAR	RCP85	Référence	-4.06	0.00	RCP85	2060	1.65	0.00	
AVR	RCP85	Référence	-1.56	0.00	RCP85	2060	2.53	10.88	
MAI	RCP85	Référence	2.97	43.84	RCP85	2060	2.21	46.79	+ 7%
JUN	RCP85	Référence	6.69	75.02	RCP85	2060	3.81	82.91	+ 11%
JUL	RCP85	Référence	9.56	95.91	RCP85	2060	4.41	105.51	+ 10%
AOU	RCP85	Référence	9.39	87.66	RCP85	2060	4.68	98.11	+ 12%
SEP	RCP85	Référence	6.01	56.28	RCP85	2060	4.32	65.81	+ 17%
OCT	RCP85	Référence	2.63	29.46	RCP85	2060	2.88	35.72	+ 21%
NOV	RCP85	Référence	-2.33	0.00	RCP85	2060	3.12	6.47	
DEC	RCP85	Référence	-4.72	0.00	RCP85	2060	2.39	0.00	

## Annexe 4 : Correction de la consommation d'eau à la cabane Tsissette avec les données de la saison 2021

L'été 2021 a été la première saison d'ouverture après la rénovation de la cabane de la Tsissette. Comme les données sur les nuitées n'étaient pas encore connues, ce rapport contient les nuitées estimées lors du projet de la cabane.

Lors de la présentation de ce projet à Liddes le 25 avril 2022, la municipalité a annoncé la possibilité de disposer de nouvelles données de la saison 2021 afin de corriger le calcul de la consommation d'eau, les nuitées précédemment estimées étant inférieures aux nuitées réelles. Il a donc été décidé de créer cette annexe, contenant le nouveau calcul de la consommation d'eau à la cabane Tsissette, en utilisant la même méthodologie que dans le rapport.

### Nouvelles données

Nombre de nuitées : 420

Nombre de repas : 1500 → nombre de repas sans nuitée, avec une moyenne de 15 repas par jour d'ouverture.

### Consommation d'eau pendant la saison :

$420 \times 12 \text{ l} = 5'040 \text{ l}$

$1500 \times 12 \text{ l} = 18'000 \text{ l}$

Consommation totale de la cabane Tsissette : **23'040 l** par saison

Le calcul proposé par le CAS (Club Alpin Suisse), 12 l par personne, a également été utilisé pour les repas seuls. Cette estimation tient compte des différentes utilisations nécessaires dans une cabane, comme l'eau pour la boisson, pour la cuisine, pour les services et pour le nettoyage de la cuisine et du bâtiment. Il a été décidé de maintenir ce calcul, car la consommation d'eau est également plus faible la nuit pour les mêmes raisons.