

Filière Energie et techniques environnementales

Orientation Energies renouvelables

Travail de bachelor Diplôme 2020

Théo Gonin

Multi-usage de l'eau


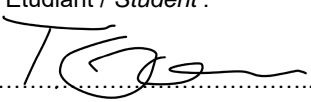
■ Professeur
Cécile Münch-Alligné

■ Expert
Alexandre Gilloz

■ Date de la remise du rapport
14.08.2020

Filière / Studiengang ETE	Année académique / Studienjahr 2019/20	No TD / Nr. DA ER/2020/76
Mandant / Auftraggeber <input type="checkbox"/> HES—SO Valais <input checked="" type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire Partnerinstitution	Etudiant / Student Théo Gonin Professeur / Dozent Cécile Münch-Alligné	Lieu d'exécution / Ausführungsort <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire Partnerinstitution
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit <input type="checkbox"/> oui / ja ¹ <input checked="" type="checkbox"/> non / nein	Expert / Experte (données complètes) Alexandre Gillioz, Responsable Technique Eau – Energie ALTIS Place de Curala 5, 1934 Le Châble VS	

Titre / Titel Multi-usage de l'eau
Description / Beschreibung La gestion durable de l'eau sur une région implique de coordonner les différents usages de cette ressource : stockage d'électricité, irrigation, enneigement et eau potable. L'objectif de ce projet est d'analyser les différents usages de l'eau sur la rive gauche du Val de Bagnes (Mayens de Bruson), de les modéliser et de développer des solutions pour améliorer la gestion de l'eau sur cette région dans le contexte du réchauffement climatique. Les différentes étapes de ce projet seront les suivantes : <ul style="list-style-type: none"> — Etat de l'art sur le multi-usage de l'eau — Récolte des informations sur la rive gauche du Val de Bagnes — Estimation des consommations d'eau pour les différents usages : irrigation, enneigement et hydroélectricité (futur). — Modélisation de la répartition possible entre les différents usages au cours de l'année — Simulations de scénarios futurs liés au changement climatique — Proposition de solutions pour palier déficits identifiés

Signature ou visa / Unterschrift oder Visum Responsable de l'orientation / filière Leiter der Vertiefungsrichtung / Studiengang:  ¹ Etudiant / Student : 	Délais / Termine Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags: 25.05.2020 Présentation intermédiaire / Zwischenpräsentation Semaine / Woche 26 (22.06 – 26.06.2020) Remise du rapport / Abgabe des Schlussberichts: 14.08.2020, 12:00 Exposition / Ausstellung der Diplomarbeiten: 28.08.2020 (si autorisé / falls genehmigt) Défense orale / Mündliche Verfechtung: Semaine / Woche 36 (31.08 – 04.09.2020)
---	--

¹ Par sa signature, l'étudiant-e s'engage à respecter strictement la directive DI.1.2.02.07 liée au travail de diplôme.
Durch seine Unterschrift verpflichtet sich der/die Student/in, sich an die Richtlinie DI.1.2.02.07 der Diplomarbeit zu halten.



Titre du travail Multi-usage de l'eau

Diplômant/e Théo Gonin

Objectif du projet

L'objectif de ce projet est d'analyser les différents usages de l'eau sur la rive gauche du Val de Bagnes (Mayens de Bruson), de les modéliser et de développer des solutions pour améliorer la gestion de l'eau sur cette région dans le contexte du réchauffement climatique.

Méthodes | Expériences | Résultats

Les différents usages de l'eau de la région sont ; l'eau potable, l'irrigation, l'hydroélectricité et l'enneigement artificiel. Les usages et les apports d'eau ont été estimés grâce à des données climatiques allant de 2010 à 2100 fournies par le WSL ainsi que des données de mesures fournies par la société ALTIS.

Trois scénarios climatiques ont été envisagés et ont fait l'objet d'une simulation dans un modèle numérique RS Minerve. Il a alors été possible de déterminer des bilans de volumes d'eau pour les périodes 2050 et 2085, ces simulations ont mis en évidence des périodes critiques sur le plan hydrique. De ces résultats, il ressort que la période 2085 dans le cas d'un scénario sec, souffre de déficits en eau particulièrement marqués pendant les mois d'été. Ces périodes critiques viennent du fait que la demande en eau pour l'irrigation risque fortement d'augmenter, alors que les apports en eau seront plus faibles.

Il a également été possible d'estimer la production hydroélectrique future délivrée par la centrale de Verségères.

Pour pallier les déficits identifiés, il serait intéressant d'augmenter la capacité de stockage saisonnier de la région, soit en augmentant la taille du réservoir existant de Moneyeu, soit en implémentant de nouvelles solutions de stockage.

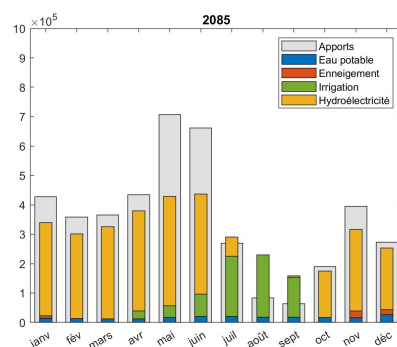
Travail de diplôme
| édition 2020 |

Filière
*Énergie et techniques
environnementales*

Domaine d'application
Énergies renouvelables

Professeur responsable
Cécile Münch-Alligné
cecile.muench@hevs.ch

Partenaire
ALTIS



Bilan mensuel des volumes d'eau pour l'année 2085 lors du scénario « sec ». Les mois où la demande dépasse les apports indiquent un déficit futur en eau.



Les usages de l'eau dans la région du Val de Bagnes sont marqués par un caractère très saisonnier.

Table des matières

1	Résumé	6
2	Introduction	7
	2.1 L'eau en Suisse.....	7
	2.2 Changement climatique.....	8
	2.3 Gestion durable de l'eau.....	10
	2.4 Spécificités liées aux régions de montagne.....	12
3	Rive gauche du Val de Bagnes.....	13
4	Objectifs	18
5	Méthodologie	19
	5.1 Données et scénarios climatiques.....	20
	5.2 Apports en eau.....	23
	5.3 Estimation des besoins en eau pour l'irrigation	29
	5.4 Estimation des besoins pour l'eau potable	32
	5.5 Estimation des besoins en eau pour l'enneigement.....	37
	5.6 Hydroélectricité.....	39
6	Modèle numérique RS Minerve	41
	6.1 Rappel des hypothèses et sources d'incertitudes.....	45
7	Résultats	47
	7.1 Usages de l'eau.....	47
	7.2 Production d'électricité	52
8	Discussion	55
	8.1 Discussion des résultats.....	55

8.2	Limites du modèle et perspectives	59
9	Conclusion.....	60
10	Références	61
11	Annexes	63
11.1	Caractéristiques des conduites d'amenée	63
11.2	Paramètres du modèle numérique	63
11.3	Données climatiques et données de mesures.....	66

Table des figures

Figure 1 : Offre et demande en eau future pour la région de Crans-Montana (MontanAqua, 2016)	9
Figure 2 : Principes de la gestion durable de l'eau (Méthode SHARE)	11
Figure 3 : Schéma de principe d'une étude sur la gestion durable de l'eau	13
Figure 4 : Vue du Val de Bagnes et de la région d'étude	14
Figure 5 : Cours d'eau de la zone d'étude et leur régime d'écoulement naturel, les histogrammes présentent les débits moyens annuels et mensuels des cours d'eau	15
Figure 6 : Vue des principales infrastructures de la zone d'étude (en orange, la partie liée à l'eau brute et en bleu, la partie liée à l'eau potable	16
Figure 7 : Schéma de la situation et des futurs changements, diagramme de flux	17
Figure 8 : Schéma des entrées et sorties du modèle	19
Figure 9 : Carte du Val de Bagnes avec le découpage des 9 sous-bassins versants (WSL, 2019)	20
Figure 10 : Évolution du rayonnement solaire forcé pour différents RCP (NCCS, 2019)	22
Figure 11 : Schéma de la période des données utilisées pour la simulation de chaque scénario	23
Figure 12 : Exemple de débit d'apport pour la prise d'eau du Torrent des Places, scénario S001, période 2019-2020	25
Figure 13 : Comparaison entre les valeurs modélisées et les valeurs mesurées	26
Figure 14 : Volumes d'apports annuels par scénario	27
Figure 15 : Part des volumes d'eau annuels pour chaque ouvrage de captage (en bleu, les installations liées à l'eau potable et en orange, les installations liées à l'eau brute)	28
Figure 16 : Quantités d'eau disponibles par saison	28
Figure 17 : Vue de l'aménagement du territoire du cadastre communal, région de Bruson	30
Figure 18 : Débits estimés pour l'irrigation pour les 3 scénarios retenus	31
Figure 19 : Volumes d'eau pour l'irrigation par année	31
Figure 20 : Vue du réservoir de Moay et des instruments de mesure sur le réseau d'eau potable (Altis)	33
Figure 21 : Débit de consommation d'eau potable mesuré (données Altis)	34
Figure 22 : Volumes consommés depuis le réservoir de la Moay (Données ALTIS)	34
Figure 23 : Courbe de débit utilisée pour déterminer la consommation en eau potable	35
Figure 24 : Estimation des volumes consommés pour l'eau potable par mois pour la région Bruson et Versegères	36
Figure 25 : Vue du bassin de Moneyeu et des instruments de mesure liés au réseau d'eau brute pour l'enneigement (Altis)	37
Figure 26 : Débits mesurés par le capteur 243F40, correspondant à l'utilisation d'eau pour l'enneigement	38
Figure 27 : Utilisation annuelle moyenne du bassin de Moneyeu	39
Figure 28 : Géométries appropriées des roues en fonction de la vitesse spécifique n_q et de la chute H (Bohl, "Strömungsmaschinen 1")	40
Figure 29 : Caractéristiques principales de l'installation hydroélectrique	41
Figure 30 : Schéma du modèle numérique RS Minerve de la zone d'étude	42
Figure 31 : Schéma des flux simplifiés attribués au modèle Minerve	43
Figure 32 : Ordre de grandeur des parts d'eau utilisées par chacun des usagers	47
Figure 33 : Bilan des volumes d'eau mensuels pour le scénario humide (S008)	49
Figure 34 : Bilan des volumes d'eau mensuels pour le scénario médium (S023)	49

Figure 35 : Bilan des volumes d'eau mensuels pour le scénario sec (S001)	50
Figure 36 : Périodes critiques pour chaque simulation avec la courbe des précipitations	51
Figure 37 : Exemple de courbes de puissance délivrée par la centrale (scénario S001, sec).....	52
Figure 38 : Prévisions de production hydroélectrique par mois.....	54
Figure 39 : Volumes captés et consommés avec stockage saisonnier, scénario sec	56
Figure 40 : Bassin de Moneyeu	57
Figure 41 : Périodes critiques pour chaque simulation avec la courbe des précipitations	58
Figure 42 : Périodes critiques pour chaque simulation avec la courbe des précipitations avec le bassin de Moneyeu modifié.....	58

Table des tableaux

Tableau 1 : Bilans hydriques par continent (données du Service Hydrologique National, 1985), la quantité d'eau "utilisable", le ruissellement, est la différence entre les précipitations et l'évaporation.	7
Tableau 2 : Données disponibles et leurs unités.....	21
Tableau 3 : Détails des scénarios climatiques retenus	21
Tableau 4 : Résumé des ouvrages d'apport et leurs caractéristiques	24
Tableau 5 : Volumes d'apport annuels par période et par scénario	26
Tableau 6 : Volumes d'eau pour l'irrigation par années et variations.....	32
Tableau 7 : Réservoirs du modèle avec leur altitude et leur volume	44
Tableau 8 : Données des Database RS Minerve et leurs caractéristiques	45
Tableau 9 : Productions annuelles estimées de la centrale de Versegères	53

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé à la réalisation de ce travail :

Cécile Münch-Alligné, ma professeure qui m'a suivi tout au long du travail et qui a pu m'apporter une aide précieuse dans la stratégie de ce travail ainsi que des réponses à des questions techniques.

Alexandre Gilloz, responsable technique eau – énergie chez ALTIS, qui a pu me fournir les informations dont j'avais besoin pour la réalisation du modèle et qui a pu m'aiguiller sur certaines problématiques.

Jean Decaix, adjoint scientifique à l'HEI, qui m'a apporté une aide très précieuse lors des complications techniques liées à la modélisation et au traitement des résultats.

Jérémy Schmid, assistant à l'HEI, qui m'a partagé énormément d'informations et de bons conseils sur la réalisation de l'étude grâce à son expérience dans le domaine.

Je souhaite encore remercier les gens qui m'ont soutenu pendant cette période de travail de diplôme et dans mes études ; ma famille, ma copine, mes amis et mes camarades de classe.

1 Résumé

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une grande étude en cours « Retenues d'eau multi-usage, une nécessité pour l'irrigation du futur »¹ qui est une collaboration entre l'OFEV (l'Office fédéral de l'environnement), l'OFEN (l'Office fédéral de l'énergie), la société ALTIS (anciennement Services Industriels de Bagnes), le WSL (institut fédéral de recherche sur la forêt, la neige et le paysage) et la HES-SO Valais-Wallis. Cette étude sur le Val de Bagnes a pour objectifs d'établir des prévisions à long terme de l'évolution climatique communale, de déterminer les demandes et disponibilités en eau dans le Val de Bagnes et d'établir une planification globale des réseaux d'eau communaux.

L'objectif de ce travail de diplôme est d'analyser les différents usages de l'eau sur la rive gauche du Val de Bagnes (Mayens de Bruson), de les modéliser et de développer des solutions pour améliorer la gestion de l'eau sur cette région dans le contexte du réchauffement climatique.

Actuellement, l'eau est en quantité suffisante pour l'irrigation et l'eau potable, mais avec le changement climatique impliquant la fonte des glaciers et du manteau neigeux, la situation risque de changer. Avec un modèle numérique RS Minerve, ont pu être identifiés les potentiels déficits futurs en eau et des propositions de solutions ont été formulées afin réorganiser la gestion de l'eau dans la zone d'étude.

¹ <https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/mesures/pak/projektfphase2/pilotprojekte-zur-anpassung-an-den-klimawandel--cluster--umgang-0/b.05-1-irrigation-en-montagne.html>

2 Introduction

2.1 L'eau en Suisse

Depuis de nombreuses années, la Suisse profite d'une situation hydrologique très favorable. À elle seule, la Suisse détient 6% des réserves d'eau douce de l'Europe alors qu'elle ne représente que 0.5% de son territoire (Weissbrodt, 2013). Le pays possède de nombreux lacs et cours d'eau. Certains grands fleuves européens comme le Rhône ou le Rhin prennent leur source dans ses montagnes. La Suisse est également soumise à des régimes de précipitations abondantes par endroits, particulièrement dans les Alpes. L'ordre de grandeur des précipitations sur le territoire suisse se situe entre 1'400 et 1'500 mm/an, cette moyenne est de 790 mm/an sur le continent européen et 756 mm/an en Amérique du Nord par exemple (Heller, 2017)(Tableau 1).

Tableau 1 : Bilans hydriques par continent (données du Service Hydrologique National, 1985), la quantité d'eau "utilisable", le ruissellement, est la différence entre les précipitations et l'évaporation.

Continents	Précipitations [mm/an]	Évaporation [mm/an]	Ruissellement [mm/an]
Europe	790	507	283
Afrique	740	587	153
Asie	740	416	324
Amérique du nord	756	418	339
Amérique du sud	1600	910	685
Océanie	791	511	280
Antarctique	165	0	165
Suisse	1456	484	978
Moyenne	800	485	315

En Suisse, la réglementation sur les eaux est déléguée aux cantons par la Confédération. Ceci signifie que chaque canton est responsable d'administrer la propriété, la gestion, la protection et l'épuration des eaux de son territoire dans un cadre régi par la Confédération. Celle-ci affirme que la privatisation de ses eaux est exclue et qu'il ne sera par conséquent pas question d'en faire commerce. La disponibilité de l'eau en Suisse est donc essentielle là où l'eau est considérée comme

un bien public. En Valais, plus précisément, les eaux du Rhône et une partie du lac Léman appartiennent au canton, le reste des eaux publiques est la propriété des communes. Les lois cantonales règlent le droit sur l'eau. Par exemple, la loi sur l'utilisation des forces hydrauliques (LcFH) précise que leur utilisation doit se faire dans l'intérêt des communes et de l'approvisionnement en électricité national en sauvegardant les intérêts de l'économie, de l'aménagement du territoire et de la protection de l'environnement. Même si de nombreuses lois règlent le cadre juridique sur l'utilisation de l'eau, il existe encore aujourd'hui des zones de flou juridique où l'on ne sait pas très bien qui gère, utilise ou possède certaines eaux. Ceci est également marqué par la grande disparité du prix de l'eau entre certaines régions de Suisse. Par exemple, un mètre cube d'eau est payé 2.36 CHF à Lausanne contre 0.74 CHF à Sion.

L'accès à l'eau a joué, historiquement, un rôle majeur dans le développement économique et social des vallées alpines au cours du XIXe siècle (Reynard, 2000). Dans ce contexte d'abondance de la ressource en eau, le pays a pu développer des structures solides telles que les réseaux pour l'eau potable, pour l'irrigation, pour l'hydroélectricité et pour l'enneigement artificiel notamment. En 2019, la Suisse a produit plus de 56% de son électricité par le biais des forces hydrauliques (OFEN, 2019b), ce qui la classe parmi les leaders mondiaux dans le domaine. Cela implique que la Suisse est largement dépendante de ses eaux dans de nombreux domaines.

Malgré cette situation favorable, certaines années peu pluvieuses associées à des épisodes de sécheresse prolongés ont conduit à des déficits d'eau assez importants dans des régions de Suisse. C'est notamment le cas des étés 2003, 2015 et 2018, où les manques d'eau avaient mené à des situations très problématiques (MétéoSuisse, 2019).

2.2 Changement climatique

Dans un contexte planétaire de réchauffement du climat auquel la Suisse n'échappe pas, la situation hydrique du pays risque de changer avec les années. Les répercussions sur le climat suisse seront telles que les épisodes de sécheresse comme ceux rencontrés en 2003, 2015 et 2018, risquent d'être de plus en plus fréquents et sur des durées plus longues encore. Lors de ces épisodes de sécheresse, les manques d'eau avaient été problématiques pour les cultures et le bétail. Les situations critiques ont souvent pu être maîtrisées, en partie grâce au soutien des hélicoptères de l'armée qui ont pu acheminer l'eau où il y en avait le plus besoin. L'approvisionnement en eau potable a, malgré tout,

toujours été assuré pour tout le territoire suisse, non sans efforts de certaines communes (OFEV, 2019).

On estime qu'à l'horizon 2100, la Suisse ne manquera toujours pas d'eau en quantité annuelle, mais que sa distribution spatiale et temporelle variera sensiblement (Thut et al., 2016). Concrètement, cela signifie que l'eau ne sera plus toujours disponible à l'endroit et au moment où on en aura besoin. De plus, l'épaisseur du manteau neigeux saisonnier ainsi que la masse des glaciers diminueront. On estime que depuis 1980, 3 à 4% de la production hydroélectrique annuelle (1 à 1.4 TWh/an) proviendrait de la fonte nette des glaciers. Une fois que les glaciers auront totalement fondu à l'horizon 2080, la perte nette de production hydroélectrique sera d'environ 1 TWh/an par rapport à la production actuelle (Schaepli et al., 2019). Les phénomènes de fonte s'accroissant, ils risquent d'aggraver encore plus les problématiques liées au stockage des volumes d'eau.

D'après des scénarios étudiés dans le cadre du projet national de recherche 61 (PNR 61 – Gestion durable de l'eau), on prévoit que le réseau d'eau de Crans-Montana – Sierre pourrait être en déficit de 5.5 mio. m³ vers 2085 (Reynard et al., 2013).

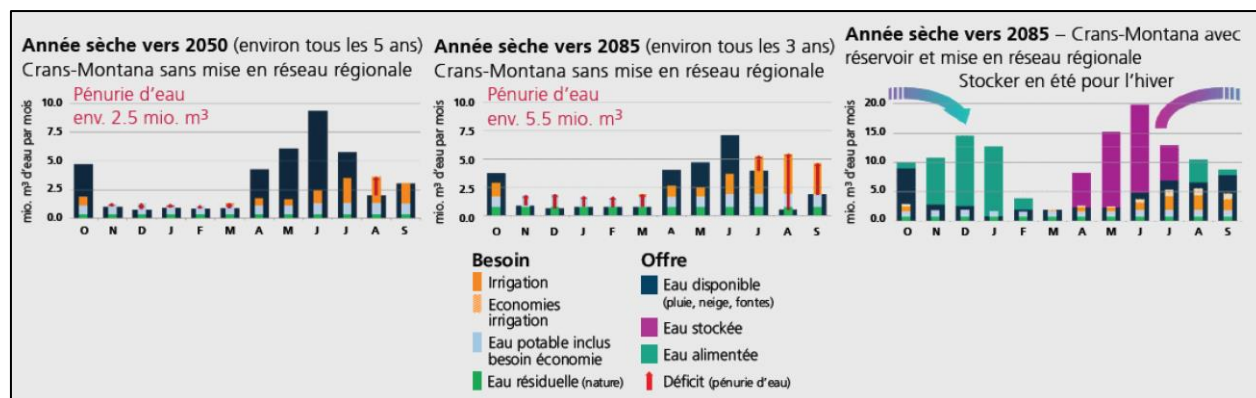


Figure 1 : Offre et demande en eau future pour la région de Crans-Montana (MontanAqua, 2016)

Les périodes de manque d'eau se situent pendant les mois d'hiver où la plupart des cours d'eau sont à l'étiage et à la fin de l'été lorsque la majorité du manteau neigeux a fondu. Les résultats de l'étude MontanAqua (Figure 1) montrent l'importance de l'utilisation de stockage saisonnier permettant de combler les déficits liés aux manques d'eau pendant les périodes critiques.

Ce phénomène pourrait même être encore plus marqué sur le plateau, où la demande en eau est très importante à cause des nombreuses cultures dans la région. À basse altitude, les précipitations ne

sont plus nivales et les mois d'été caniculaires pourront engendrer des déficits en eau très graves. Un scénario dans la Broye a été envisagé et l'on estime en 2085, lors d'une année sèche, un déficit de 35 mio. m³ (Thut et al., 2016). La Suisse se retrouve donc devant un défi de taille pour la gestion et la distribution de ses volumes d'eau.

2.3 Gestion durable de l'eau

Les quantités d'eau disponibles sur toute une année sembleraient suffisantes pour le futur, mais c'est le caractère spatial et temporel qui pose des problèmes.

Pour faire face aux éventuels problèmes futurs, il n'existe pas une solution universelle, car les enjeux sont localisés. Il existe en outre des principes qui peuvent être appliqués à un contexte local et qui s'inscrivent dans une vision durable de la gestion de l'eau. Dans notre société, l'eau est utilisée dans de nombreux secteurs et il est important de bien comprendre et d'inclure tous les acteurs et utilisateurs pour garantir une gestion durable de l'eau sur un territoire. Cette ressource est utilisée pour l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation, la production hydroélectrique et certains procédés industriels, mais aussi pour la stabilisation des écosystèmes, la pêche ou encore pour des activités récréatives comme les sports nautiques ou l'enneigement artificiel. Les usages de l'eau sont devenus si nombreux qu'il est donc difficile d'approvisionner tous les secteurs de façon satisfaisante et non conflictuelle.

Conceptuellement, la solution est simple ; il faut stocker l'eau saisonnière dans des réservoirs. Dans les vallées alpines, les retenues hydroélectriques font évidemment office de réservoir et pourront être de plus en plus utilisées pour soutenir les autres usagers afin d'éviter toute pénurie d'eau. Le concept novateur de cette solution réside dans le fait que les réservoirs seront utilisés pour des usages multiples. Jusqu'à maintenant, les réservoirs principaux en Suisse étaient principalement dédiés à la production hydroélectrique. Ils n'avaient pas été conçus en prenant en compte tous les besoins en eaux d'une région et de ses acteurs. Et le contexte de changement climatique était encore peu connu lorsqu'ils ont été dimensionnés et construits. Dans quelques décennies, les retours de concessions qui arriveront pour la plupart des installations hydroélectriques seront une occasion de fixer de nouvelles conditions quant à l'utilisation de l'eau de ces retenues (SWV, 2012). Pour certaines régions ne pouvant pas disposer de l'appui des retenues existantes il sera probablement

nécessaire d'envisager la construction de nouveaux réservoirs ou l'agrandissement de petits réservoirs déjà présents.

Pour gérer l'eau de ces réservoirs multi-usage de façon durable, et que l'utilisation des réservoirs soit une réussite, il faut intégrer le principe de partage de la ressource. Cela implique donc que toutes les parties prenantes d'un projet hydraulique partagent la ressource en eau, mais également la vision, les coûts et bénéfices, les risques et droits et les responsabilités de ce projet (Branche, 2017). Ces concepts sont illustrés dans la Figure 2.

Pour les régions de montagne suisse, ces principes prennent tout leur sens, car dans la plupart des vallées alpines, des réservoirs sont déjà présents.

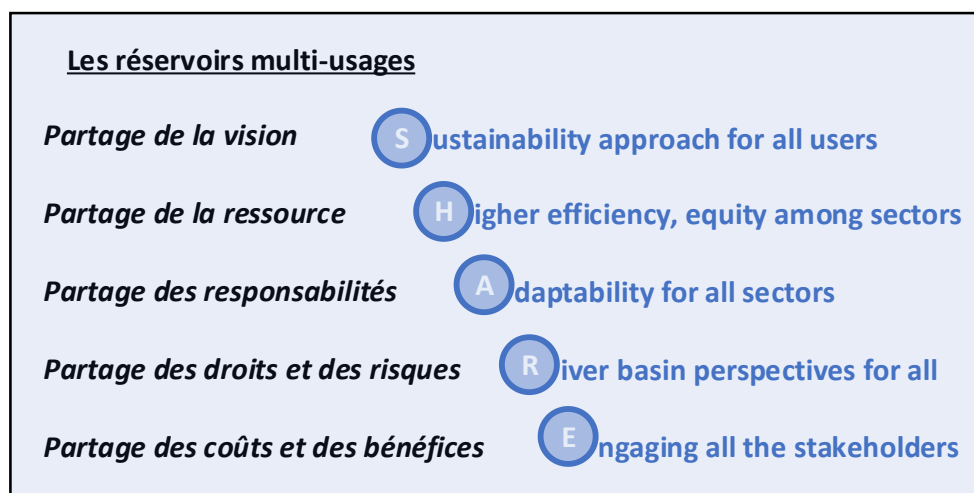


Figure 2 : Principes de la gestion durable de l'eau (Méthode SHARE)

La solution des réservoirs multi-usages est idéale, mais elle n'est pas unique. La notion d'efficience sur l'utilisation de l'eau est extrêmement importante aussi. Du fait d'un manque de cadre légal régissant l'utilisation de l'eau au niveau des particuliers, le gaspillage de l'eau est encore largement répandu. Même si certains domaines sont contraints de respecter des normes pour la gestion de l'eau notamment dans l'industrie, il subsiste encore un grand nombre de consommateurs qui ne prend pas conscience de la valeur de l'eau. Par exemple, la consommation d'eau potable dans les ménages est influencée par des actes de négligence ou de fainéantise. Les méthodes d'irrigation utilisées par certains agriculteurs sont peu efficaces en comparaison de ce que l'on peut trouver de mieux.

Outre les réservoirs multi-usages, il existe d'autres solutions pour diminuer la consommation d'eau dans tous les domaines.

2.4 Spécificités liées aux régions de montagne

Pour les vallées alpines en Suisse, les enjeux sont importants. Comme vu précédemment, les quantités d'eau seront probablement distribuées différemment dans le temps par endroits. Ceci conduira à des manques d'eau pour certains utilisateurs principalement dans l'agriculture ou dans la production hydroélectrique. En plus de la gestion des périodes de pénurie pendant les épisodes de sécheresse, il est important de revaloriser les surplus d'eau quand il y en a. En turbinant les volumes d'eau inexploités, on revalorise énergétiquement la ressource. En 2019, l'OFEN a estimé que le potentiel de production d'électricité sur la mini-hydraulique s'élevait à 770 GWh/an (OFEN, 2019a). De plus, l'installation de minicentrales hydroélectriques devient, la plupart du temps, largement rentable économiquement, en partie grâce au programme d'encouragement SRI de la Confédération (Système de Rétribution de l'Injection, Pronovo). Ce dernier offre une rétribution sur les kWh produits en plus du prix de rachat du marché. Cette démarche de revalorisation énergétique s'inscrit parfaitement dans les objectifs fixés par la Confédération liés à la stratégie énergétique 2050².

Les vallées alpines suisses sont, actuellement, presque toutes munies d'une retenue d'eau avec des contrats de concessions d'eau arrivant à échéance prochainement. Jusqu'à présent, le rôle d'un gestionnaire de retenue hydroélectrique résidait dans le dilemme « turbiner à l'instant ou réserver le volume d'eau pour une utilisation future, plus lucrative ». Avec ces retours de concessions, les règles auront la possibilité de changer pour pouvoir faire de ces retenues quasiment uniquement dédiées à la production d'électricité, des réservoirs à usages multiples.

Dans les régions de montagnes, les usages sont multiples et saisonniers. La demande en eau est définie par les différents consommateurs, cette demande peut être saisonnière. Par exemple, pour l'irrigation des cultures et des prairies, les besoins ne sont présents qu'en été. Alors que pour l'enneigement artificiel d'une station de ski, les besoins sont présents en hiver. On comprend alors bien que les régions alpines risquent de se heurter à des conflits d'intérêts dans l'utilisation de leurs

² <https://www.uvek.admin.ch/uvek/fr/home/energie/strategie-energetique-2050.html>

eaux par exemple entre l'irrigation et la production hydroélectrique lorsque les apports d'eau sont importants. Le concept de gestion durable prend alors tout son sens.

Selon les études déjà réalisées jusqu'à maintenant en région de montagne à forte variabilité saisonnière, les principales étapes d'une étude pour la gestion durable de l'eau sont la compréhension de la région, la compréhension du ou des bassins versants, la modélisation des réseaux d'eau et l'analyse des résultats du modèle comme illustré dans la Figure 3.

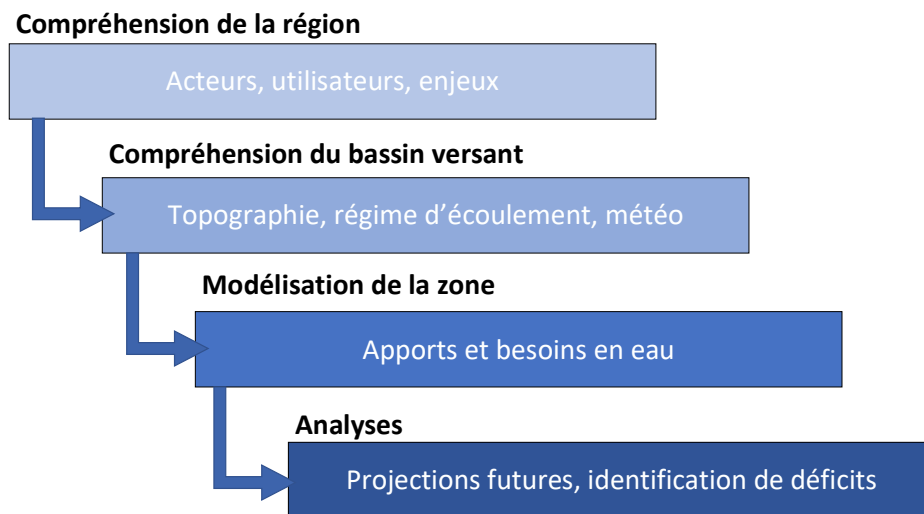


Figure 3 : Schéma de principe d'une étude sur la gestion durable de l'eau

3 Rive gauche du Val de Bagnes

L'objet de l'étude se situe sur la rive gauche du Val de Bagnes. Le périmètre d'étude est la zone qui influencera la future minicentrale hydroélectrique de Versegères, est un sous-bassin versant du Val de Bagnes, d'une surface de 37 km² environ, illustré dans la Figure 4. Ce bassin versant est parcouru par trois petits affluents de la Dranse de Bagnes qui s'écoulent au fond de la vallée : le Torrent de Bruson, le Torrent des Places et le Torrent du Pissot. Les localités du Châble, de Bruson et de Champsec jusqu'à Lourtier s'y trouvent. L'altitude du bassin se trouve entre 3084 m, le Mont Rogneux, et 820 m, au Châble, au plus bas. Le reste du versant gauche du Val de Bagnes plus en amont est aujourd'hui principalement géré et exploité par les FMM (Forces Motrices de

Mauvoisin) qui captent les eaux pour les acheminer dans la retenue d'eau de Mauvoisin dans le but de produire de l'électricité.

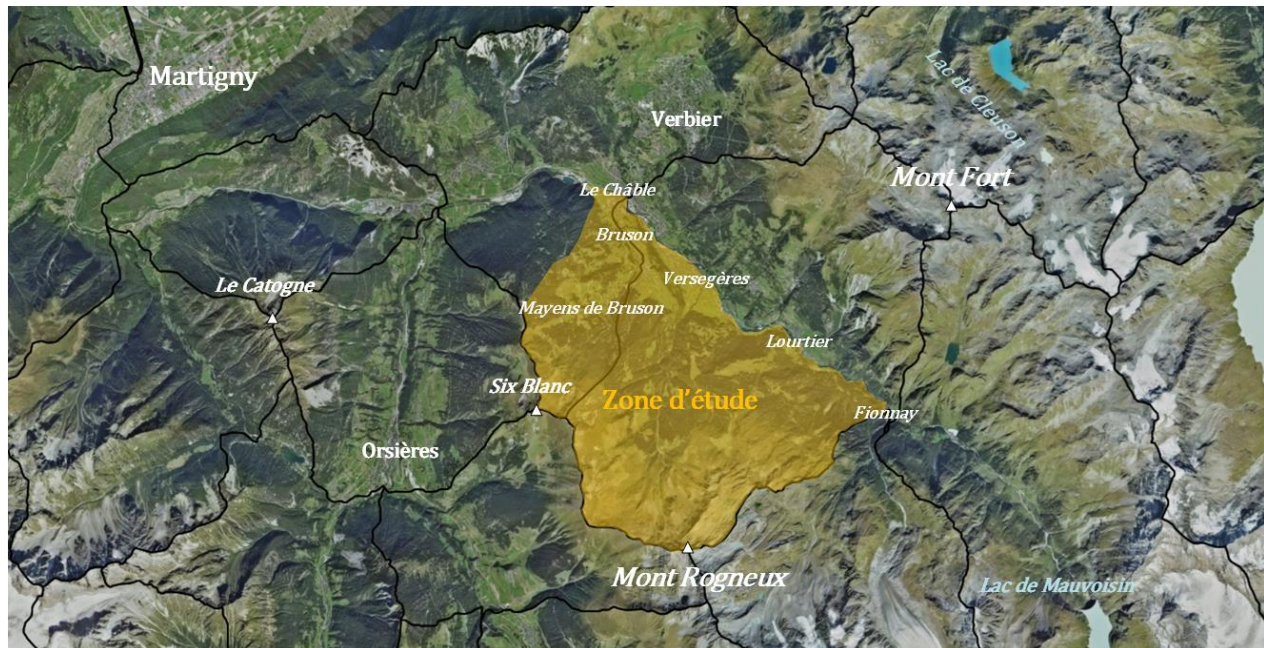


Figure 4 : Vue du Val de Bagnes et de la région d'étude

Les précipitations dans cette région sont relativement abondantes en comparaison avec des valeurs rencontrées en Valais central. Par exemple en 2019, il est tombé 600 mm de précipitations à Sion contre plus de 1000 mm pour la région de Bagnes (MétéoSuisse, 2019). Vu l'altitude élevée de ce sous-bassin versant, le type de régime d'écoulement de ses cours d'eau est glacio-nival, donc fortement influencé par la fonte du manteau neigeux hivernal et des glaciers environnants. L'eau utilisée dans cette région provient essentiellement des deux torrents de la Figure 5 (le torrent de Bruson et le torrent des Places), et une partie provient de sources d'eau sous-terraines. Les débits moyens annuels des torrents sont compris entre environ 500 l/s pour le torrent de Places et 200 l/s pour le torrent de Bruson³.

³ OFEV «MQ-GWN-CH»

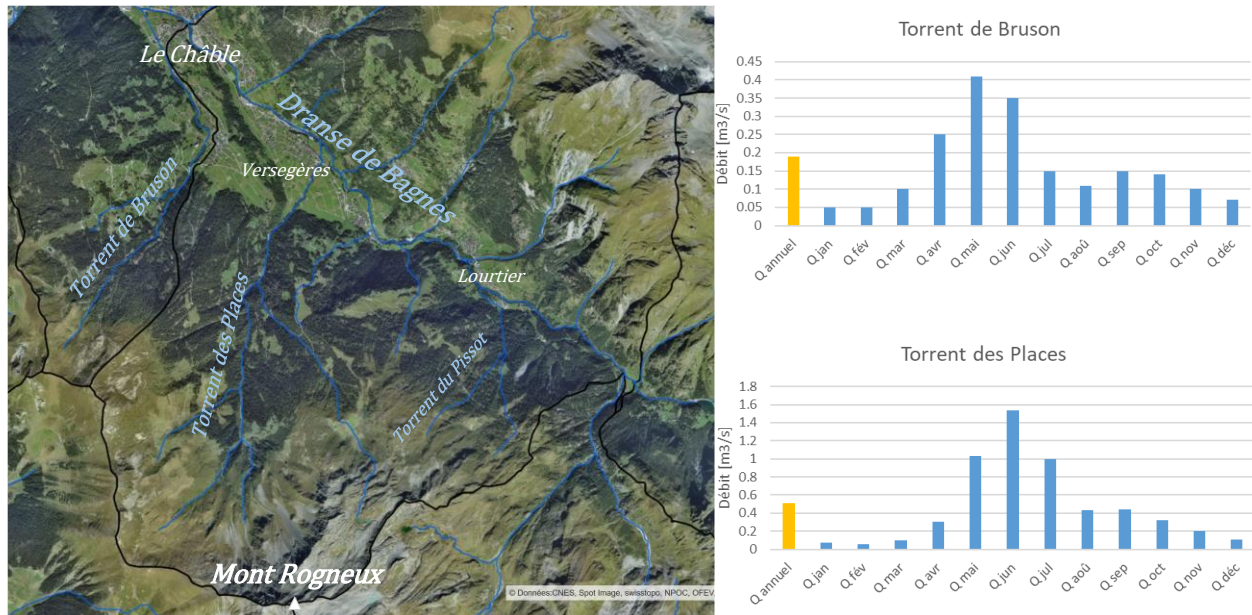


Figure 5 : Cours d'eau de la zone d'étude et leur régime d'écoulement naturel, les histogrammes présentent les débits moyens annuels et mensuels des cours d'eau

Les usages de l'eau pour ce territoire sont multiples et saisonniers. En été, la demande en eau pour l'irrigation des cultures est importante alors qu'en hiver le domaine skiable de Bruson utilise de l'eau pour l'enneigement artificiel de ses pistes.

Dans la Figure 6, on voit les principaux ouvrages liés aux réseaux d'eau de la zone d'étude. En 2015, le bassin de Moneyeu a été construit au-dessus des Mayens de Bruson à 1950 m pour assurer l'approvisionnement en eau pour l'enneigement des pistes environnantes. Une station de pompage de 132 kW (St. Tarpe) permet de pomper l'eau du réseau d'eau brute dans le réservoir. D'un volume de 15'000 m³, ce bassin n'est utilisé qu'en hiver pour l'instant, bien que des projets de pompage-turbine aient été envisagés.

Lors de la réalisation du projet de future MCH il sera possible d'interagir avec le bassin de Moneyeu pour faire du stockage à petite échelle.

Les réseaux d'eau brute (irrigation, enneigement et turbinage) et d'eau potable sont entièrement séparés, le réseau d'eau brute comprend l'eau pour l'enneigement et pour l'irrigation.

Le réseau d'eau potable sur ce versant alimente les Mayens de Bruson, une partie de Bruson et du Châble et une partie de Versegères. Plusieurs prises d'eau et captages alimentent les 2 points principaux du réseau ; le rassemblement du Tseppiet et le réservoir de la Moay qui se trouve en haut des Mayens de Bruson (500 m³).

À l'été 2020, commence donc la construction d'une nouvelle minicentrale hydroélectrique d'environ 1 MW à Versegères. La chambre de mise en charge se situera au Tseppiet à 1750 m d'altitude et la turbine à Versegère à 884 m d'altitude. Le trop-plein de la chambre de rassemblement d'eau potable du Tseppiet débordera alors dans la chambre de mise en charge permettant à l'installation de turbiner également l'eau potable en surplus. La construction de plusieurs prises d'eau supplémentaires est prévue et la station de pompage de St. Tarpe sera redimensionnée (400 kW) pour permettre le pompage vers la chambre de mise en charge dans le but de turbiner les apports supplémentaires captés en aval de cette dernière. Il sera également possible de pomper l'eau dans le réservoir de Moneyeu dans le cas où la turbine et les consommateurs ne pourraient pas absorber tous les apports.



Figure 6 : Vue des principales infrastructures de la zone d'étude (en orange, la partie liée à l'eau brute et en bleu, la partie liée à l'eau potable)

Sur la Figure 7 on peut voir les installations qui sont existantes et celles qui vont être construites avec le projet de la MCH de Versegères ainsi que les flux principaux.

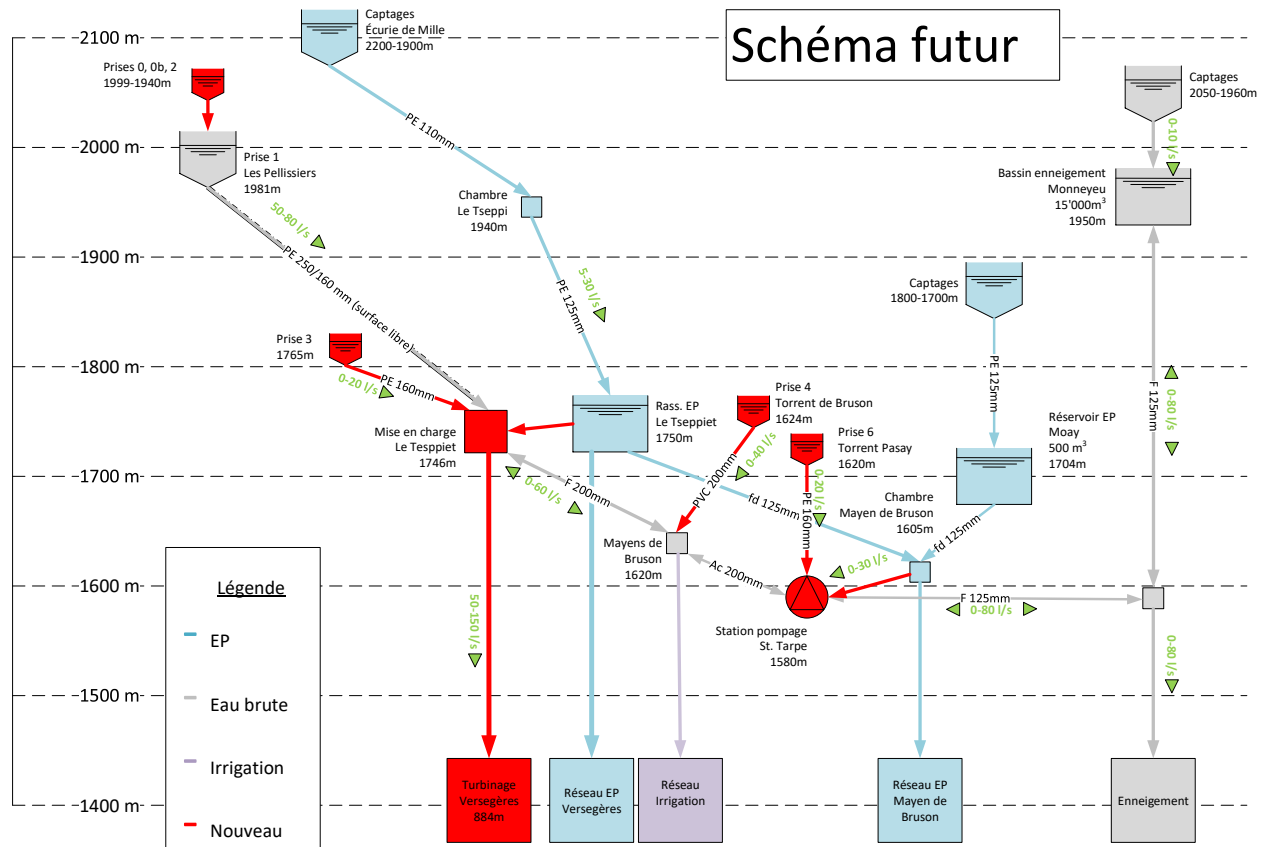


Figure 7 : Schéma de la situation et des futurs changements, diagramme de flux

La nouvelle minicentrale hydroélectrique pourra turbiner l'eau du bassin de Moneyeu (par écoulement gravitaire), mais aussi l'eau potable provenant de la chambre de rassemblement du Tseppli où le déversoir débordera directement à la mise en charge, et sur le réseau d'eau potable des Mayens de Bruson, où le surplus pourra être pompé depuis la station de St. – Tarpe. L'eau des prises 4 et 6 pourra également être pompée soit en direction de Moneyeu soit directement à la mise en charge du Tseppli.

4 Objectifs

Dans le Val de Bagnes, les services industriels de la commune de Bagnes représentés par la société ALTIS ont entamé depuis plusieurs années une révision de la gestion de leurs eaux. L'objectif de cette révision est de parfaire la gestion des eaux de son territoire dans un souci de durabilité et en prévision des changements climatiques à venir. Par cette grande révision, le Val de Bagnes, avec la volonté de la société ALTIS est devenu un laboratoire sur le multi-usage de l'eau à grande échelle, notamment avec le projet « Retenues d'eau multi-usage, une nécessité pour l'irrigation du futur » appuyé par la HES-SO Valais-Wallis, le WSL, l'OFEN et l'OFEV.

La présente étude se porte sur la rive gauche du Val de Bagnes. Sur cette rive sera construite une nouvelle minicentrale hydroélectrique (MCH), les travaux devraient commencer à l'été 2020 et se terminer vers 2023.

Les objectifs de cette étude sont :

- Compréhension et synthèse du réseau d'eau influençant la future minicentrale hydroélectrique de Versegères.
- Mise en place d'un modèle numérique des réseaux d'eau de la rive gauche du Val de Bagnes à l'aide du logiciel RS Minerve
- Implémentation et simulation de scénarios climatiques actuels et futurs
- Analyse des résultats afin de proposer des solutions pour la gestion de l'eau.

5 Méthodologie

Dans ce chapitre, il sera détaillé comment ont été estimées les entrées du modèle numérique Minerve. La Figure 8 représente les différentes entrées du modèle (en haut) et les résultats des simulations du modèle Minerve (en bas).

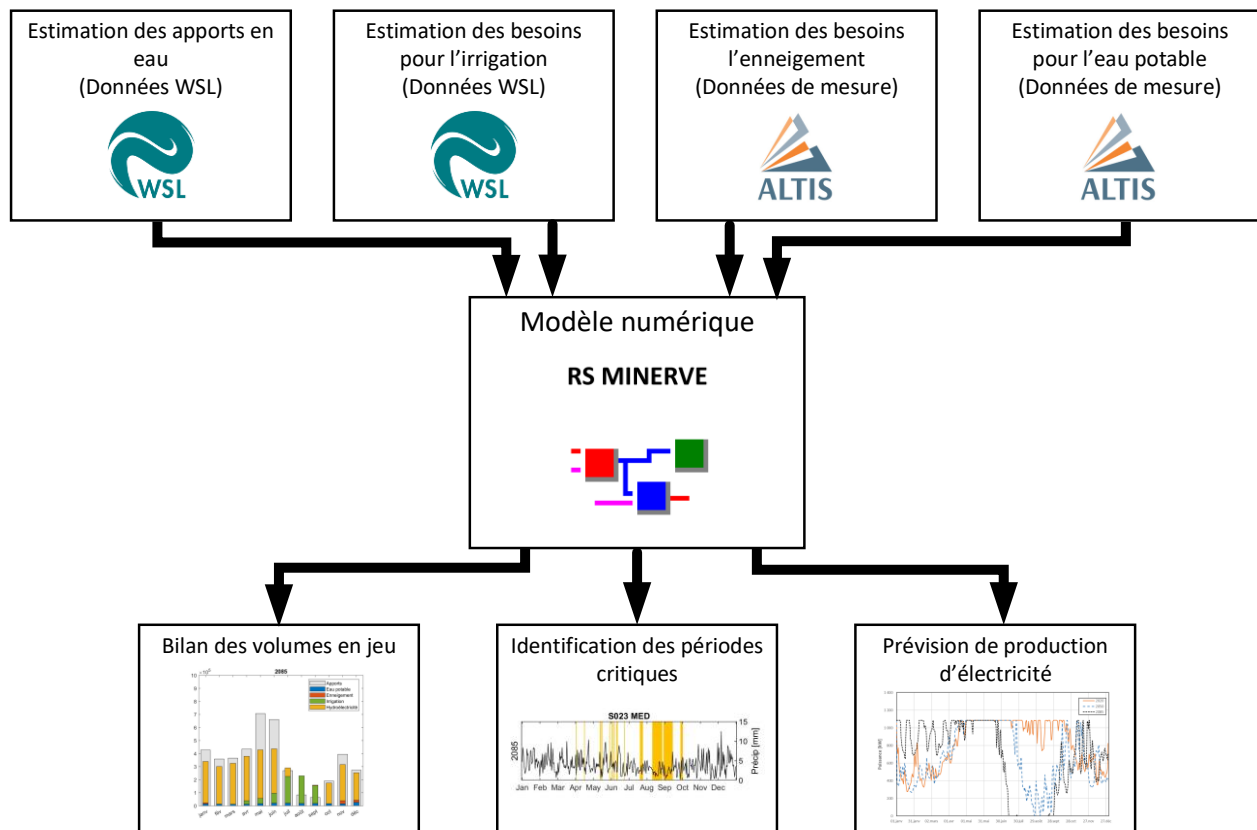


Figure 8 : Schéma des entrées et sorties du modèle

5.1 Données et scénarios climatiques

Le WSL, dans le cadre de l'étude « Retenues d'eau multi-usage, une nécessité pour l'irrigation du futur », a simulé 39 scénarios climatiques jusqu'à l'horizon 2100 pour le Val de Bagnes. Ces scénarios ont été calculés sur la base de données climatiques observées durant la période 1981-2010. La région d'étude a été découpée en 9 sous-bassins versants, dont deux sont concernés par la présente étude : le bassin n°2 « Bagnes lower part » et le bassin n°6 « Moneyeu », où est implanté le réservoir de Moneyeu (Figure 9).

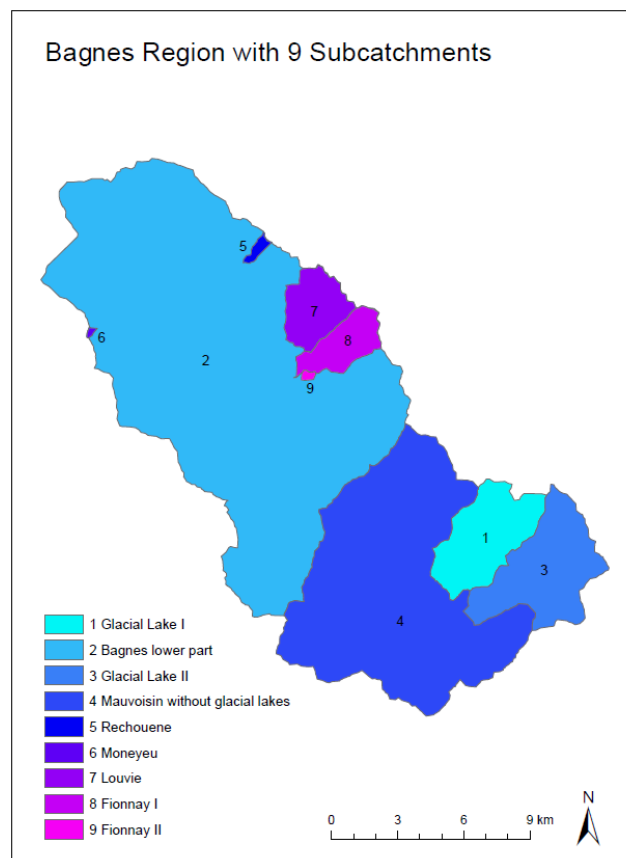


Figure 9 : Carte du Val de Bagnes avec le découpage des 9 sous-bassins versants (WSL, 2019)

À partir des données climatiques le WSL a simulé des données hydrologiques futures. Il résulte pour chacun des 39 scénarios, des données journalières pour la période 1971-2100, pour l'évapotranspiration, le ruissellement de surface et le débit total ruisselé pour la surface de chaque

bassin versant (Brunner, Zappa, et al., 2019). Les données disponibles sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Données disponibles et leurs unités

Données	Description	Unités
P	Précipitations	[mm/d]
T	Températures (min, max, moyenne)	[°C]
ETP	Évapotranspiration	[mm/d]
RGS	Équivalent débit par surface	[mm/d]
Flow	Débit total du bassin versant	[m3/d]

On utilisera ces données pour déterminer les apports en eau et les besoins d'irrigation. Plusieurs scénarios sont nécessaires pour comprendre la dynamique du système et les tendances générales. Pour les besoins de cette étude, on choisira trois scénarios différents sur les 39 établis par le WSL. Les trois scénarios retenus sont bien différents, car ils divergent entre une situation future plutôt humide et une situation future plus sèche. Ces trois scénarios couvrent donc une large gamme de probabilités. Les scénarios retenus de la base de données du WSL sont nommés ainsi : S001 « sec », S008 « humide », S023 « medium » (Brunner, Gurung, et al., 2019) leurs caractéristiques sont présentées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Détails des scénarios climatiques retenus

Name	GCM	RCM	RCP	Resolution
S001 "dry"	HadGEM	CLMcom-CCLM4	8.5	EUR-44
S008 "wet"	EC-EARTH	DMI-HIRHAM	4.5	EUR-11
S023 "med"	EC-EARTH	SMHI-RCA	4.5	EUR-44

Les scénarios climatiques utilisés ont été simulés à partir de modèles climatiques provenant de différents instituts de recherche sur le climat : le GMC (Global Climate Model) et le RMC (Regional Climate Model). À ces modèles, on implémente un scénario de réchauffement global de la température : RCP (Representative Concentration Pathways). La résolution du modèle

correspond à la taille de la maille qui a été utilisée pour le calcul, EUR-44 correspond à un espacement entre les mailles de 50 km et le EUR-11 à un espacement de 12 km. Le RCP est un indicateur de l'évolution des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et du rayonnement solaire forcé (RF, Radiative Forcing) correspondant. Un RCP8.5 correspond à une hausse des émissions de gaz à effet de serre et à une hausse globale de la température (GMT : Global Mean surface Temperature change) de 4 – 5 °C. Un RCP4.5 correspond à un déclin des émissions de gaz à effet de serre à partir de 2050 et un GMT d'environ 2.5 °C. Le scénario RCP2.6 correspond à une nette réduction des émissions tôt dans le 21^e siècle et une stabilisation du GMT inférieur à 2 °C. Ce dernier scénario paraît peu probable et extrêmement favorable pour la gestion de l'eau dans cette étude, c'est pourquoi aucun scénario RCP2.6 n'a été retenu (NCCS, 2018). La Figure 10 montre l'évolution du rayonnement solaire forcé pour différents RCP.

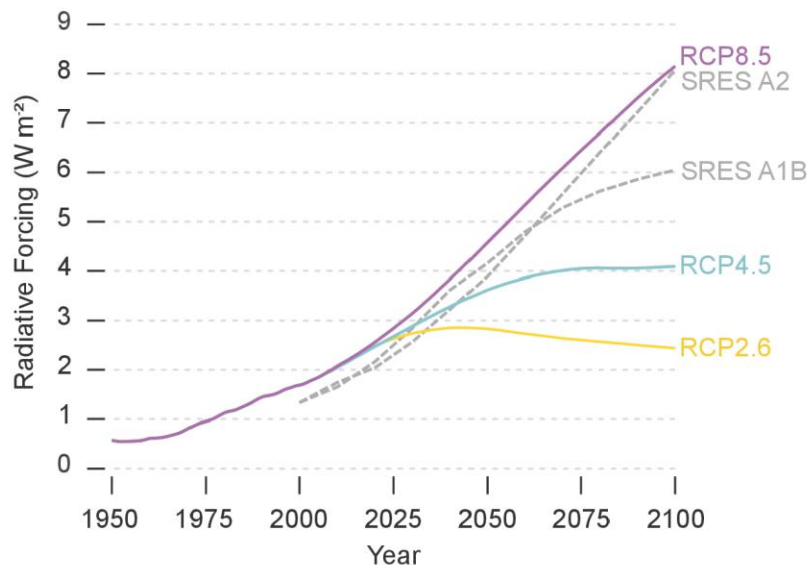


Figure 10 : Évolution du rayonnement solaire forcé pour différents RCP (NCCS, 2019)

Les données provenant de ces scénarios sont des chaînes climatiques, où les valeurs de sorties de chaque pas de temps deviennent les valeurs d'entrée du pas de temps suivant. Ces chaînes ont été simulées à partir de l'année 2010. Ceci explique en partie pourquoi les données de l'horizon 2020 peuvent déjà diverger entre les différents scénarios.

Dans le cadre de cette étude, on utilisera les données des trois scénarios retenus et l'on étudiera l'évolution dans le temps. Aussi, le temps a été découpé en trois visions : une vision actuelle (2020), et deux visions futures (2050 et 2085). On fera une moyenne sur 10 ans des données journalières

pour la période voulue pour chacun des scénarios (Figure 11). Cette méthode de moyenne de données journalières est largement répandue en hydrologie, car elle permet de mettre en avant des tendances. Elle permet également d'effacer des pics par exemple les pointes de précipitations sur une journée qui ne nous intéressent pas vraiment dans l'analyse de la gestion des flux d'eau à long terme.

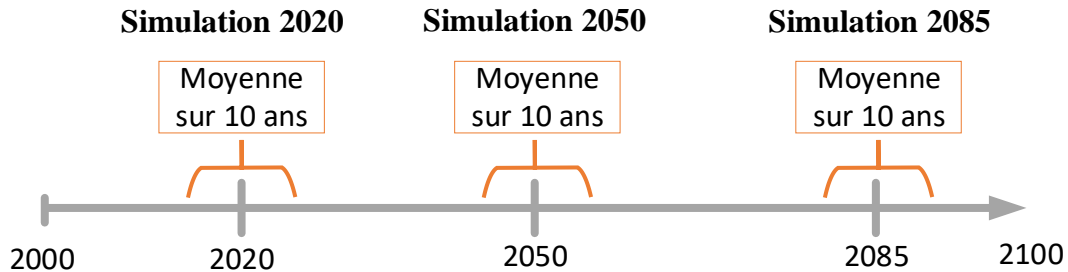


Figure 11 : Schéma de la période des données utilisées pour la simulation de chaque scénario

Les 3 scénarios climatiques différents pour lesquels on fait 3 situations dans le temps font donc un total de 9 simulations effectuées.

5.2 Apports en eau

Les apports en eau dans le Val de Bagnes sont assurés d'une part grâce aux cours d'eau sur lesquels se trouvent des ouvrages de prise d'eau et d'autre part des sources souterraines qui sont captées, notamment pour les besoins en eau potable.

Pour modéliser les apports en eau, chaque prise d'eau a été prise séparément et la surface du sous-bassin versant correspondant a été estimée pour pouvoir ainsi les rentrer dans le modèle. Connaissant le diamètre des conduites, pour chaque prise d'eau ou captage, la capacité maximale des conduites a été calculée avec ces équations :

Équation 1 : Capacité théorique maximale d'une conduite

$$Q_c = \frac{\pi}{4^{5/3}} K \sqrt{J_0} D^{8/3}$$

Avec, Q_c le débit maximal théorique de la conduite en m^3/s , K le coefficient de Strickler en $\text{m}^{1/3}/\text{s}$, J_0 la pente de la canalisation et D le diamètre de la conduite en m.

Équation 2 : Coefficient de Strickler

$$K = \frac{8.2 \sqrt{g}}{k_s^{1/6}}$$

Avec, g l'accélération terrestre et k_s la rugosité de sable de la conduite en m.

Pour les besoins de cette étude, quatre ouvrages de captage d'eau (Prise du torrent des Places, captages du bassin de Moneyeu, captages des sources du Mille et captages de Moay) et les deux prises supplémentaires prochainement installées pour la future MCH (Prises du torrent de Bruson et du torrent de la Pasay) ont été modélisées.

Tableau 4 : Résumé des ouvrages d'apport et leurs caractéristiques

Type	Utilisation	Localisation	Taille BV [km^2]	Subcatchments WSL	Débit résiduel min	Conduite	Capacité max [l/s]
Prises 0,1,2	Eau brute	Torrent des Places	2	BV2	non	PE/F 160/250 mm	170
Captages	Eau brute	Moneyeu	0.12	BV6	non	-	non
Captages	Eau potable	Milles	1.4	BV2	non	PE 110 mm	35
Captages	Eau potable	Moay	0.415	BV2	non	PE 125 mm	20
Pas encore existant							
Prise 4	Eau Brute	Torrent de Bruson	1.7	BV2	50 l/s	PVC 200 mm	> 200
Prise 6	Eau brute	Torrent de la Pasay	0.24	BV2	non	PE 160 mm	120

Pour estimer les quantités d'eau absorbées par ces ouvrages, on prendra la valeur RGS des données du WSL pour déterminer le débit d'apport moyenné sur 10 ans pour chaque prise d'eau en fonction de la surface de son sous-bassin versant (Tableau 4). La valeur RGS en [$\text{l/m}^2 \cdot \text{jours}$] représente la quantité d'eau qui résulte d'un mètre carré. Cette valeur correspond à l'écoulement de surface à l'exutoire d'une surface en amont. Ceci comprend les débits de surface et de réserve du sol, c'est pourquoi on peut l'utiliser pour modéliser une prise d'eau sur un torrent ou une source d'eau potable souterraine.

À ces débits prélevables, on y applique au besoin une limite de capacité maximale de la conduite et un débit résiduel minimal (Tableau 4). Tous les cours d'eau ne sont pas forcément astreints à un

débit résiduel minimal, particulièrement lorsque les débits sont extrêmement faibles et fréquemment à l'étiage.

Équation 3 : Débit d'apport d'une prise d'eau

$$Q_{BV} \left[\frac{m^3}{s} \right] = RGS \left[\frac{l}{m^2 \text{ jours}} \right] \cdot S_{BV} [m^2] \frac{1}{1000 \cdot (60 \cdot 60 \cdot 24)}$$

Le débit d'apport de la Figure 12 montre le type de régime d'écoulement avec un fort débit en printemps/été. Les pics de crue ne peuvent néanmoins pas être absorbés, pour cause, la conduite d'amenée de la prise d'eau a une capacité maximale de 170 l/s.

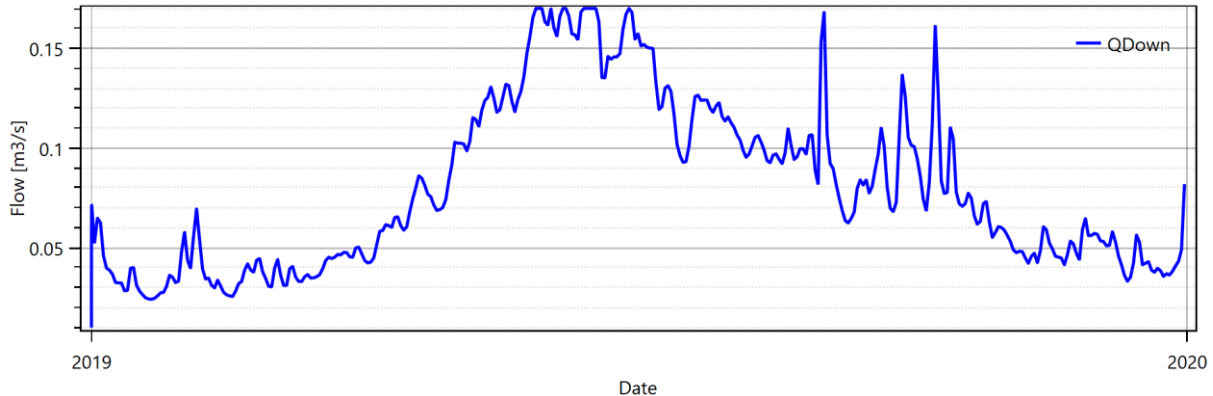


Figure 12 : Exemple de débit d'apport pour la prise d'eau du Torrent des Places, scénario S001, période 2019-2020

Entre 2010 et 2014, l'entreprise CERT ingénierie SA a mené une série de campagnes de mesures dans le cadre de la pré étude pour le dimensionnement de la nouvelle MCH. Des mesures ponctuelles ont été prises par endroit ; ces mesures permettent une première validation de la modélisation des apports de cette étude. Les mesures ont été prises sur les 4 prises d'eau du torrent des Places sous le Mont Rognieux aux prises 0, 1, 7, 8 et sur le torrent de Bruson à la prise 4. Les numéros des prises d'eau sont tirés du rapport « Prélèvement débits Moneyeu » (CERT, 2012). Les mesures ont été moyennées et comparées avec les valeurs du modèle pour le scénario S023 « medium » autour de l'année 2020, comme illustré dans la Figure 13.

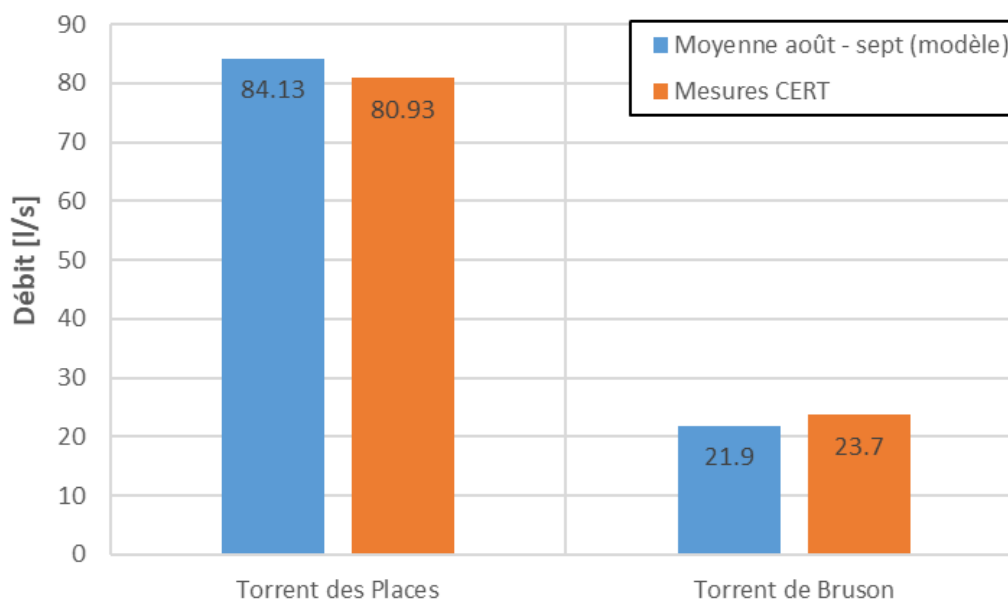


Figure 13 : Comparaison entre les valeurs modélisées et les valeurs mesurées

On constate un écart très faible entre les valeurs mesurées par CERT lors des campagnes de mesure d'août et septembre 2012. L'écart pour le torrent des Places est de 3% et pour le torrent de Bruson est de 7%. Ceci représente une première validation du modèle d'apports en eau.

Les débits d'apport des six prises d'eau totales de la zone sont calculés de cette façon (Équation 3) puis mis en forme de sorte qu'ils puissent être insérés dans une Database lisible par le programme RS Minerve. On calcule ces débits pour les années 2020, 2050 et 2085 et pour chacun des trois scénarios retenus.

Il apparaît alors clairement que les quantités d'eau disponibles varient beaucoup selon les scénarios et les périodes. Les volumes présentés dans le Tableau 5 représentent la totalité des apports sur la région, en incluant l'eau potable et l'irrigation.

Tableau 5 : Volumes d'apport annuels par période et par scénario

	2020		2050		2085	
	Volume [m ³]	Variation	Volume [m ³]	Variation	Volume [m ³]	
S001 "sec"	5 307 042	- 11,90%	4 742 522	- 12,23%	4 225 867	
S0023 "med"	4 683 503	- 11,71%	4 192 525	+ 3,87%	4 361 459	
S008 "hum"	5 216 670	- 18,51%	4 401 995	+ 15,13%	5 186 905	

Les quantités d'apports pour le scénario « sec » présentent une diminution marquée dans le temps. Les scénarios « medium » et « humide » prévoient une forte baisse à l'horizon 2050, mais une légère remontée pour 2085. Pour le scénario « humide », on se retrouve presque avec les mêmes quantités d'eau disponibles entre 2020 et 2085 (Figure 14).

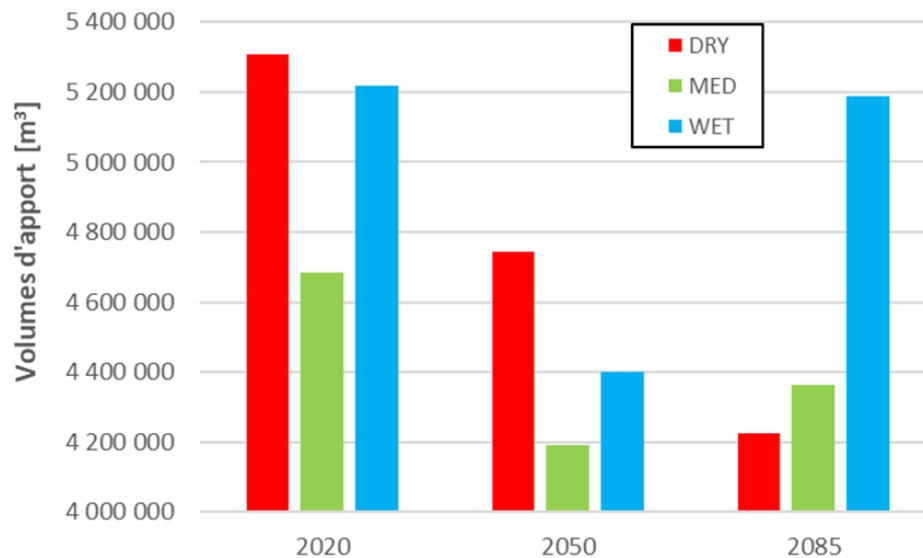


Figure 14 : Volumes d'apports annuels par scénario

Parmi les infrastructures de captage des eaux, la majorité de l'eau provient du Torrent des Places. En effet avec les nouvelles prises d'eau dont le torrent sera muni, il apportera près de la moitié des volumes d'eau annuels. Les apports en eau potable représentent presque un tiers des apports totaux, c'est pourquoi il sera intéressant du point de vue énergétique de turbiner le surplus d'eau potable qui n'est pas négligeable. Sur la Figure 15, on constate que les apports du bassin de Moneyeu sont très faibles à cause de la petite surface de son bassin versant.

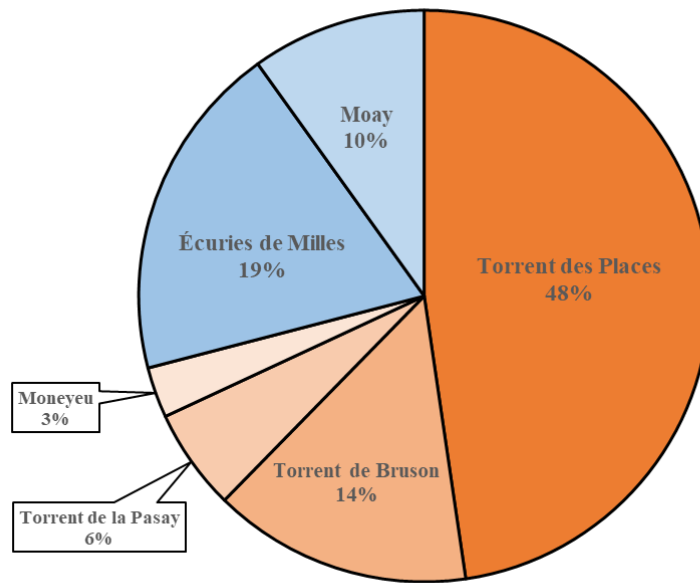


Figure 15 : Part des volumes d'eau annuels pour chaque ouvrage de captage (en bleu, les installations liées à l'eau potable et en orange, les installations liées à l'eau brute)

On peut également observer des tendances saisonnières selon les scénarios et les périodes. Effectivement, les quantités d'eau sont assez variables selon les scénarios, mais présentent également des variabilités saisonnières assez marquées, comme illustrées dans la Figure 16.

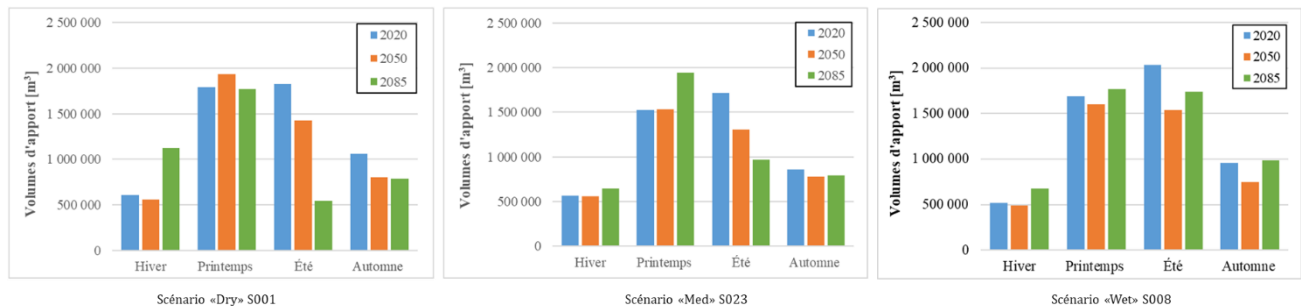


Figure 16 : Quantités d'eau disponibles par saison

Pour le scénario « sec », il apparaît alors une nette diminution des apports en eau en été alors que la saison d'hiver bénéficie de deux fois plus d'eau entre 2020 et 2085. Pour le scénario « medium », la tendance est semblable, quoique légèrement plus atténuée, avec une diminution des quantités d'eau estivales moins marquée. Pour le scénario « humide », on ne constate pas de grosses

modifications à l’horizon 2085. Il apparaît tout de même une forte diminution des quantités d’eau disponible en été entre 2020 et 2050, mais cette tendance semble faiblir pour s’inverser en 2085.

5.3 Estimation des besoins en eau pour l’irrigation

Le réseau d’irrigation actuel est assez complexe et presque aucune mesure n’est prise pour l’heure. Il est donc impossible de connaître exactement les débits d’eau utilisés.

Il est en revanche possible d’estimer la demande en eau des plantes avec une méthode mise au point par la FAO (Food and Agriculture Organization of United Nations) qui permet de caractériser la demande en eau des plantes par l’équation suivante (Skhiri, 2017):

Équation 4 : Besoins en eau pour l’irrigation

$$Irrigation_{need} [mm/d] = ETP \cdot Kc - Pe - Dc$$

$$Q_{irrigation} [m^3/s] = Irrigation_{need} \cdot S_{agricole}$$

ETP : evapotranspiration [mm/d]

Kc : crop factor [-]

Pe : effective rainfall [mm/d], ($Pe = P \cdot 0.7$)

Dc : change in soil moisture [mm/d]

S : surface [m²]

Avec,

Dc = 0

Kc = 1.15

On utilise alors les données simulées d’évapotranspiration (ETP) et de précipitations (P) fournies par le WSL (Tableau 2) pour reconstituer une courbe d’irrigation annuelle.

Le coefficient Kc est un facteur qui représente le besoin en eau d’un type de plante particulier. Ici, on a choisi un Kc de 1.15, qui correspond à des cultures standards comme le blé ou les légumes (Allen et al., 1998). Dans le cas du Val de Bagnes, la majeure partie des surfaces agricoles à irriguer sont des prairies et des pâturages, et un Kc de 1.15 représente une bonne approximation de la demande réelle en eau notamment, car souvent, les agriculteurs dans les régions alpines ont tendance à sur irriguer leurs cultures.

Le coefficient Dc représente la modification de l’humidité contenue dans le sol, il est négligé, car il est pour l’heure impossible à déterminer pour cette étude.

De plus, on applique un facteur aux précipitations pour obtenir les « précipitations effectives » P_e , ce qui correspond à la part de l'eau qui ne ruisselle pas et qui est effectivement absorbée par le sol et utilisée par les plantes.

La surface retenue pour le calcul correspond à la surface des zones agricoles du cadastre communal⁴ soit un peu plus de 146 ha (Figure 17).

Les quantités d'eau pour l'irrigation pour le réseau des Mayens de Bruson - Bruson ont été modélisées sur la base de l'Équation 4, avec des périodes d'irrigation comprises entre avril et fin septembre. À noter que ces périodes d'irrigation pourraient changer avec le temps et le décalage des saisons. Il est difficile d'estimer comment varieront les périodes d'irrigation, si elles deviennent plus longues ou qu'elles sont légèrement décalées d'année en année. On gardera tout de même la même période d'irrigation pour tous les scénarios pour permettre une comparaison valable entre eux.

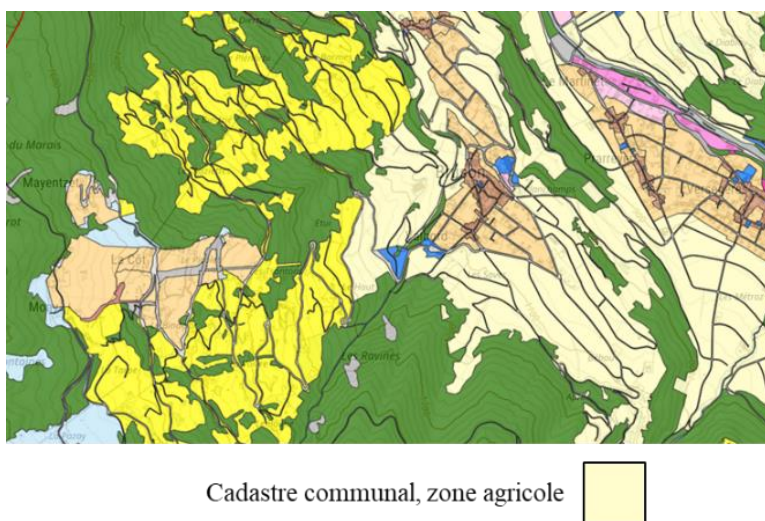


Figure 17 : Vue de l'aménagement du territoire du cadastre communal, région de Bruson

Les 3 scénarios retenus (Dry, Medium, Wet) ont été considérés pour les périodes 2020, 2050 et 2085. Sur la Figure 18, on constate que la demande en eau pour l'irrigation aura tendance à augmenter avec le temps. Pour le scénario « sec », on constate que les pics de demande se situent autour du mois d'août et que la demande est croissante au fil du temps. Le scénario « médium » montre des pics de moindre amplitude avec un écart moins important entre les années. Le scénario

⁴ Cadastre communal : <https://geo.ciges.ch/bagnes/>

« humide » prévoit un pic plus tôt dans l'année, autour du mois de juillet et les différences de besoins entre 2020 et 2085 sont moins marquées encore. De manière générale, la demande en eau pour l'irrigation des cultures ne dépasse jamais 100 l/s pour la totalité du territoire à irriguer.

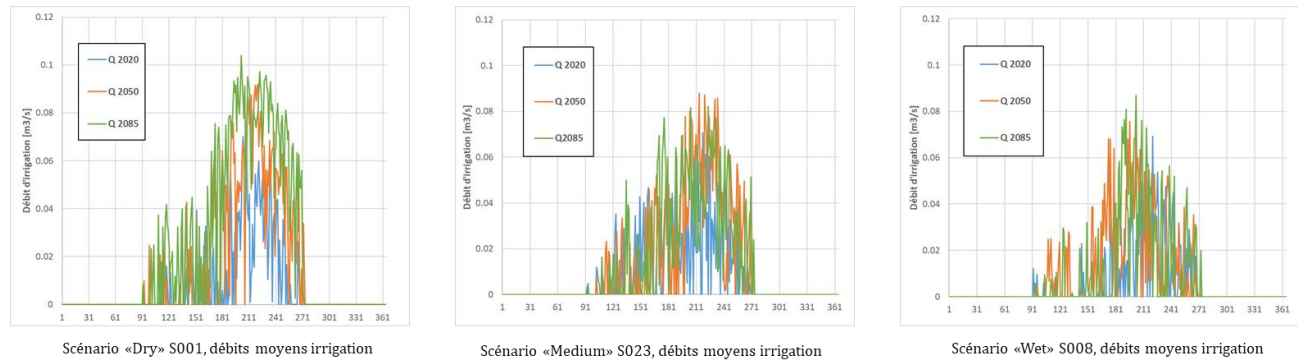


Figure 18 : Débits estimés pour l'irrigation pour les 3 scénarios retenus

Si l'on compare les volumes totaux utilisés pour l'irrigation par année on constate de grandes différences entre les scénarios (Figure 19).

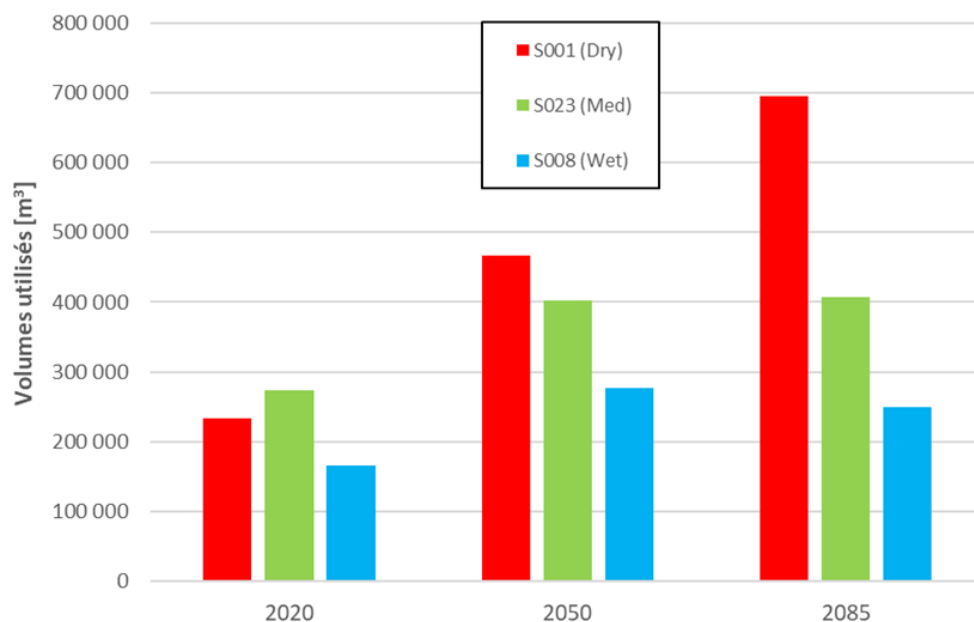


Figure 19 : Volumes d'eau pour l'irrigation par année

Dans le Tableau 6, on voit les volumes d'eau que représente l'irrigation des cultures. Pour le scénario S001, les quantités d'eau nécessaires passent de 233'000 m³ pour 2020 à 695'000 m³ pour 2085 soit une augmentation d'un facteur 3. Le scénario S008 étant une situation humide, il prévoit une baisse de la demande en eau d'irrigation entre 2050 et 2085. Le scénario S023 intermédiaire prévoit une augmentation nette à l'horizon 2050, mais pas d'augmentation significative entre 2050 et 2085.

Tableau 6 : Volumes d'eau pour l'irrigation par années et variations

	2020		2050		2085	
	Volume [m³]	Variation	Volume [m³]	Variation	Volume [m³]	
S001 "Dry"	233 625	+ 49,93%	466 636	+ 32,90%	695 450	
S023 "Med"	273 515	+ 32,11%	402 879	+ 1,01%	406 974	
S008 "Wet"	165 788	+ 40,06%	276 608	- 11,10%	248 962	

5.4 Estimation des besoins pour l'eau potable

Les besoins en eau potable concernant la région d'étude comprennent deux sous-réseaux distincts : le réseau de Versegères et le réseau des Mayens de Bruson. Les consommations d'eau potable sont mesurées par Altis sur le réseau, il est néanmoins difficile de déterminer exactement les quantités absorbées par chacun de ces réseaux étant donné la complexité des réseaux et que les consommateurs dans la vallée sont également alimentés par des sources sur le versant droit.

Il est possible d'estimer la consommation d'eau potable d'une région donnée en fonction de son nombre d'habitants. En moyenne, en 2017, la consommation d'eau potable par habitant en Suisse s'élevait à 300 litres. Cette consommation est en baisse depuis les années 80, mais la valeur semble s'être stabilisée autour de 300 litres par jour et par habitant (SVGW, 2018). Cette valeur peut donner un bon ordre de grandeur, mais c'est sans compter sur la variabilité saisonnière de la consommation en eau potable dans la région. Effectivement, le Val de Bagnes étant très touristique, l'influence du tourisme sur la consommation en eau potable n'est pas négligeable. Avec une population d'environ 8000 habitants, le Val de Bagnes est pourvu d'un réseau d'eau potable d'une capacité équivalente à 50'000 habitants. C'est principalement pendant la période hivernale que se

trouve la demande maximale en eau potable, lorsque le tourisme bat son plein. Le gros de la demande touristique est localisé à Verbier, mais la région de la rive gauche avec Bruson est également soumise à ce type de tourisme saisonnier.

Les données de consommation d'eau potable fournies par Altis proviennent de la distribution depuis le réservoir de Moay. Les données de consommation obtenues sont issues des capteurs 141F40 et 141F45. On voit sur la Figure 20 que l'eau provenant des sources de Mille ne passe pas forcément par le débitmètre 141F40, les données obtenues ne correspondent donc pas à la consommation totale sur le réseau des Mayens de Bruson, et il n'y a en outre pas de données concernant la consommation sur le réseau de Versegères.

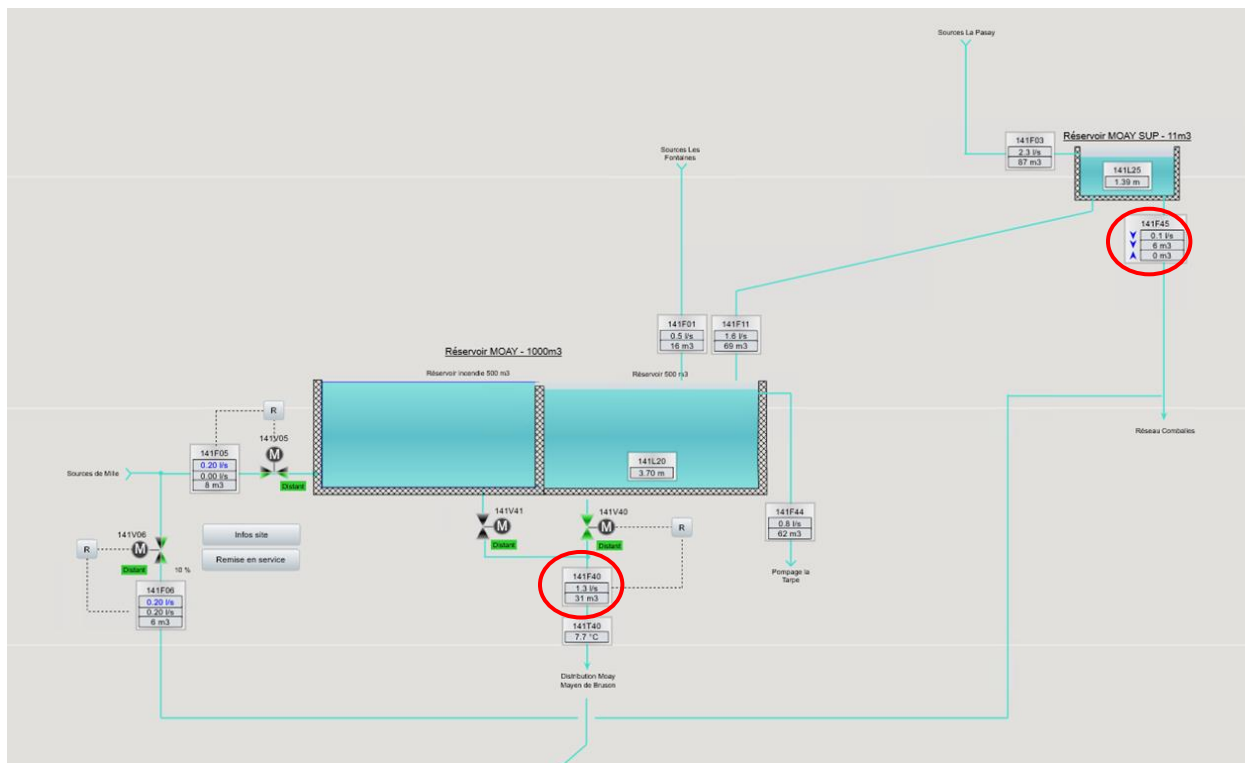


Figure 20 : Vue du réservoir de Moay et des instruments de mesure sur le réseau d'eau potable (Altis)

Grâce aux données des débitmètres 141F40 et 141F45, il est tout de même possible de tirer un profil standard de consommation que l'on pourra alors adapter en fonction du nombre d'habitants. Ces données couvrent une période de mesure allant de 2016 à 2020, l'année 2016 est incomplète (Figure 21).

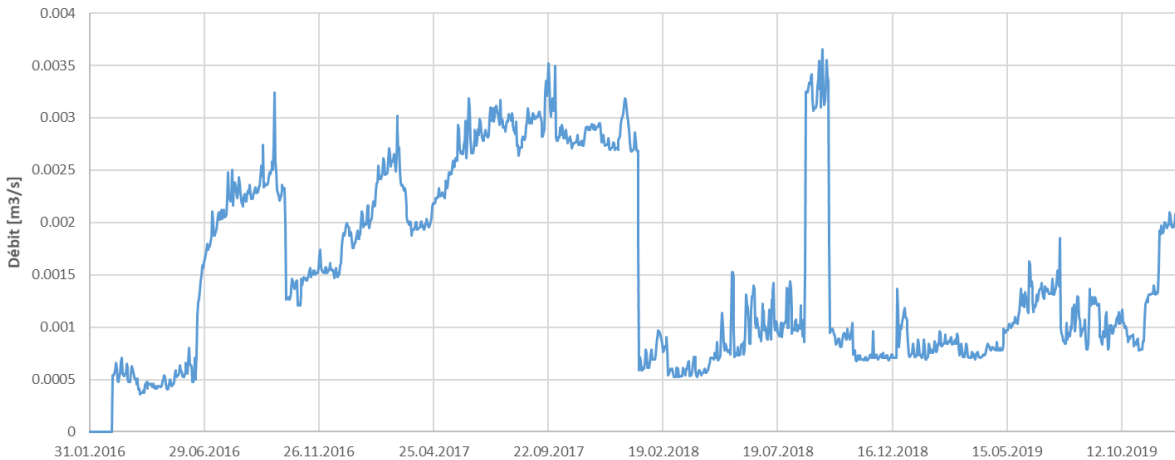


Figure 21 : Débit de consommation d'eau potable mesuré (données Altis)

La courbe de consommation semble incohérente, car la consommation de 2017 est beaucoup plus élevée que les autres années, un pic se trouve également en août 2018. Comme illustré par la Figure 22, la consommation de l'année 2017 est supérieure de 130% par rapport à la moyenne 2018-2019.

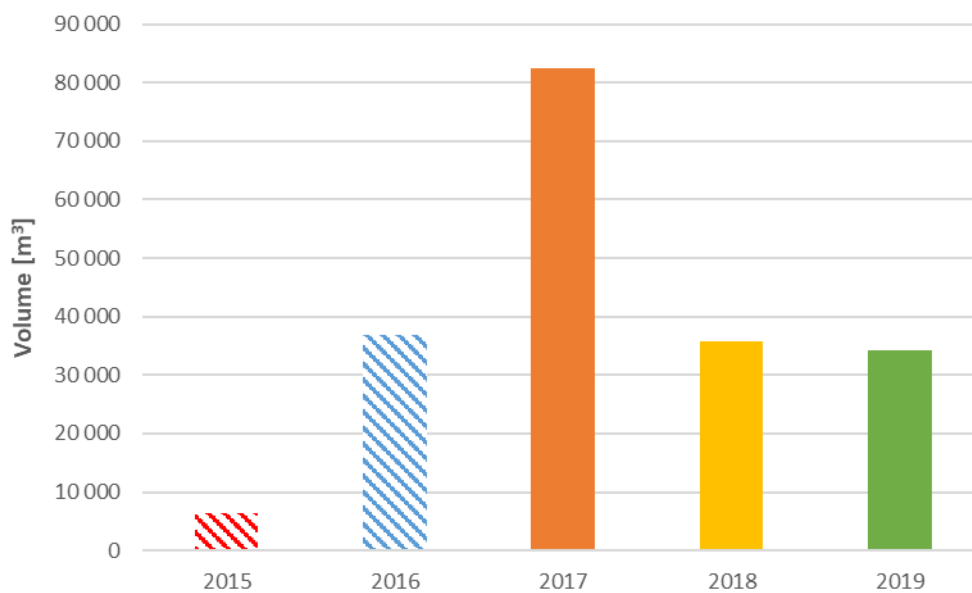


Figure 22 : Volumes consommés depuis le réservoir de Moay (Données ALTIS)

Ces spécificités proviennent de ruptures de conduites selon Altis. Pour créer un profil de consommation à partir de ces données seules, les années 2018 et 2019 ont été prises en compte et le pic de 2018 a été « lissé ». Les deux années ont été moyennées pour obtenir une courbe que l'on

insérera dans le modèle. On a alors un profil de consommation où l'on observe un pic hivernal avec la période touristique ainsi qu'une consommation légèrement plus élevée en été, ce qui est parfaitement plausible. À cette courbe, on applique un facteur pour simuler une consommation d'eau potable sur tout le réseau Versegères et Mayens de Bruson. En effet, la courbe de la Figure 23 ne représente que le débit distribué par le réservoir de Moay et mesuré par les débitmètres 141F40 et 141F45.

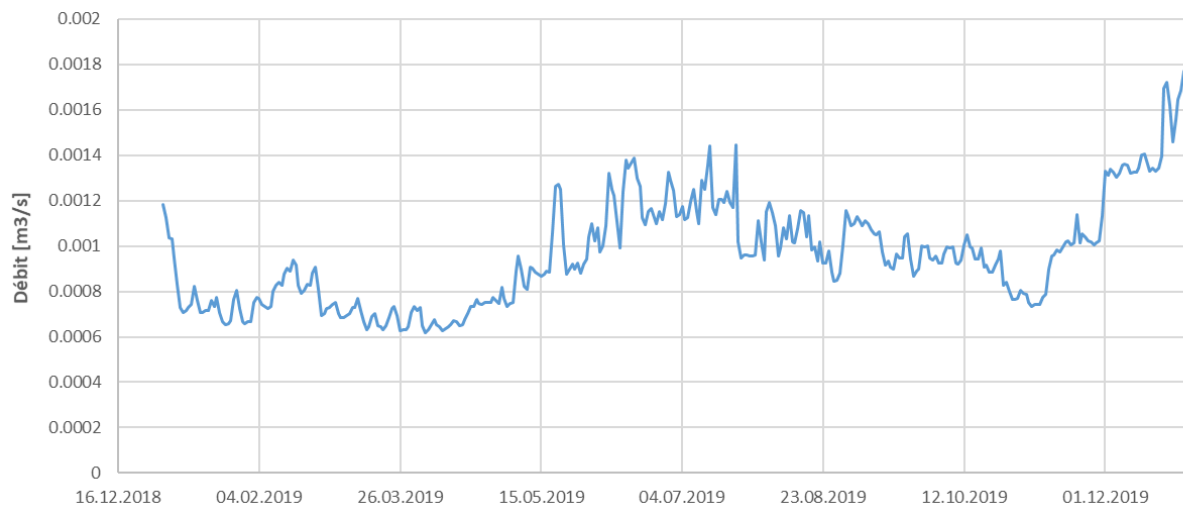


Figure 23 : Courbe de débit utilisée pour déterminer la consommation en eau potable

Le calcul du débit total distribué par le versant gauche pour les villages de Bruson et Versegères est donné par l'équation suivante :

Équation 5 : Calcul d'estimation de la consommation en eau potable en fonction des valeurs mesurées

$$Q_{EP} = Q_{mes} \cdot \frac{N_{habitants} \cdot V_{use}}{V_{journalier_{mes}}}$$

Avec V_{use} en m^3 , qui correspond à la consommation en eau par habitant et par jour. Le nombre d'habitants utilisé pour le calcul est de 600 pour les Mayens de Bruson et 800 pour Versegères (Commune de Bagnes, 2019). Il a été choisi de diminuer le nombre d'habitants réel des villages étant donné que la distribution en eau potable se fait également par la rive droite et que des sources supplémentaires en dessus de Versegères alimentent également le village. Il a également été décidé

de prendre 400 l/s de consommation d'eau potable même si la norme se trouve plutôt autour des 300 l/s, cela procure une marge de sécurité quant à l'estimation des volumes utilisés.

Sur la Figure 24, on peut observer les consommations estimées pour l'eau potable. Le mois de décembre apparaît comme le mois avec la plus grande consommation. Ceci est probablement dû à la forte fréquentation touristique pendant la saison d'hiver au moment des fêtes de Noël. Les mois d'été de juin à août sont aussi relativement plus élevés. Pour cause, la consommation d'eau potable pendant les périodes sèches et chaudes est souvent plus élevée que la moyenne. La consommation annuelle d'eau potable distribuée par la rive gauche pour Versegères et Bruson est estimée à environ 200'000 m³.

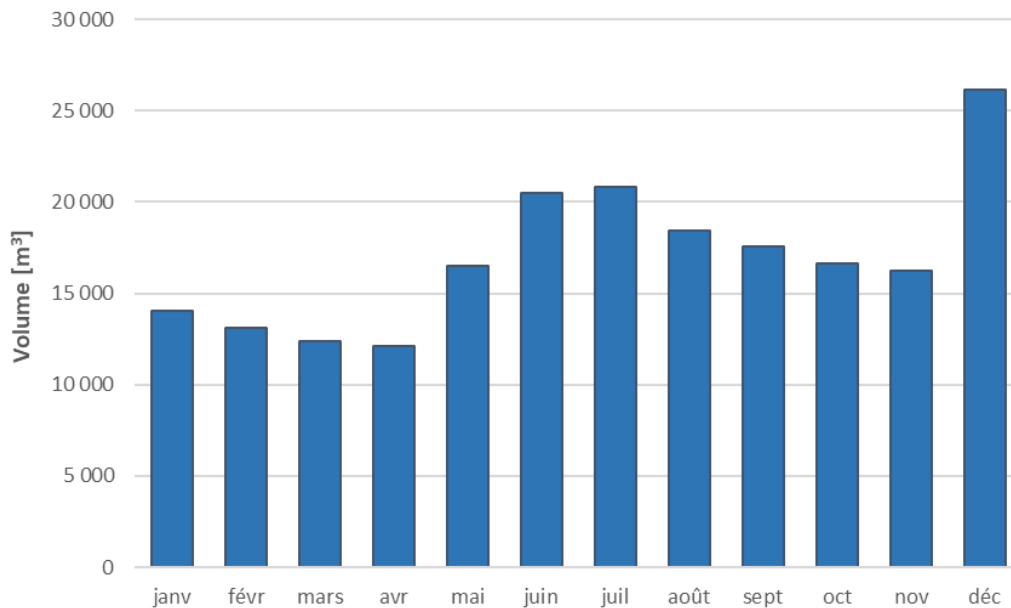


Figure 24 : Estimation des volumes consommés pour l'eau potable par mois pour la région Bruson et Versegères

Une fois les débits recalculés ils sont mis en forme pour entrer dans une Database Minerve.

La consommation en eau potable de la région pourrait être susceptible de changer avec le temps, probablement d'augmenter avec l'augmentation de la population et des températures. On gardera néanmoins ce modèle pour tous les scénarios, car l'estimation d'une potentielle augmentation est inenvisageable dans le cadre de ce travail.

La Figure 26 montre la consommation d'eau sur les 5 ans d'utilisation du bassin de Moneyeu pour l'enneigement. Les débits entrants et sortants du réservoir sont moyennés sur ces 5 années pour les insérer comme entrées dans le modèle numérique. On fera alors la distinction entre les volumes d'eau utilisés pour l'enneigement par TVSA et les volumes pompés dans le réservoir. L'eau pompée provient des prises d'eau du réseau d'eau brute qui se situent sous le Mont Rogneux.

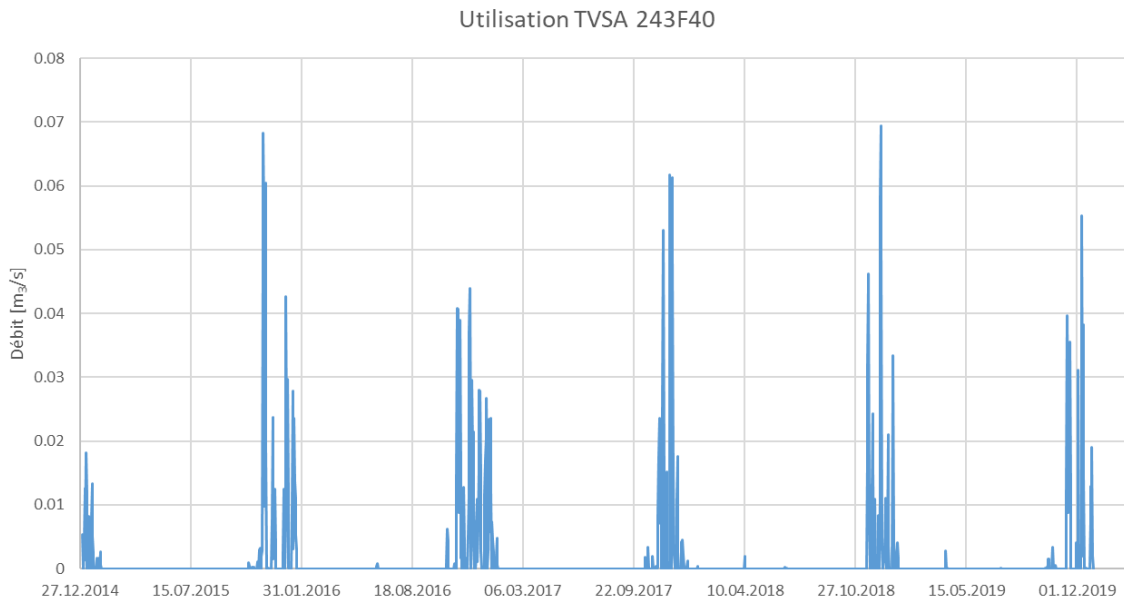


Figure 26 : Débits mesurés par le capteur 243F40, correspondant à l'utilisation d'eau pour l'enneigement

Si l'on observe alors la moyenne des volumes utilisés sur la Figure 27, on constate que l'eau pour l'enneigement est utilisée entre novembre et janvier. En novembre, on atteint un maximum d'utilisation de l'eau, car les pistes sont préparées tôt dans la saison de ski lorsque la couche de neige est encore trop faible pour pratiquer les sports de glisse. Le volume total utilisé par Téléverbier est d'environ 50'000 m³ et que le volume pompé dans le bassin ou aux canons est de 40'000 m³. La différence provient des apports du bassin versant de Moneyeu. Ces apports sont faibles, car pendant la période d'enneigement, les précipitations sont principalement sous forme nivale, il n'y a donc que peu d'écoulement dans le réservoir vu l'altitude du réservoir.



Figure 27 : Utilisation annuelle moyenne du bassin de Moneyeu

Il se pourrait que les besoins en eau pour l'enneigement augmentent avec les années, il se pourrait même qu'ils disparaissent, passé un certain temps vu l'augmentation des températures. Étant donné que les pistes de Bruson se trouvent à une altitude relativement élevée et qu'elles profitent d'une orientation favorable (N-NE), on peut imaginer qu'elles soient exploitées encore longtemps. On fera donc l'hypothèse que la demande en eau pour l'enneigement artificiel restera constante au fil des années, dans le modèle. Cette dernière ne représente en outre, qu'une part infime dans les volumes d'eau consommés dans la région.

5.6 Hydroélectricité

La future minicentrale hydroélectrique de Versegères doit être modélisée pour pouvoir être utilisée dans le modèle RS Minerve et ainsi prévoir les consommations d'eau de la centrale et sa production d'électricité pour chaque scénario.

La MCH a été dimensionnée pour pouvoir turbiner des débits allant de 50 à 140 l/s pour un débit d'équipement de 100 l/s. La chambre de mise en charge du Tseppiet sera construite à 1746 m, et la turbine de Versegères à 884 m pour une chute brute de 862 m. Les informations sur le dimensionnement de l'installation étant indisponibles, un dimensionnement a été fait dans le cadre de cette étude. Le tracé de la conduite forcée en fonte a été estimé à 3 km (Figure 9), avec un

diamètre de 300 mm les pertes de charge de la conduite devraient se situer autour des 14 m, à charge nominale (100 l/s).

Équation 6 : Vitesse spécifique n_q de la machine

$$n_q = n' \frac{\sqrt{Q_{eq}}}{H^{3/4}} = 3000 \frac{\sqrt{0.1}}{848^{3/4}} = 19.1$$

Étant donné le débit et la chute disponible à ses bornes, on obtient une vitesse spécifique n_q de 19.1, la turbine est une turbine de type Pelton à 2 injecteurs (Figure 28).

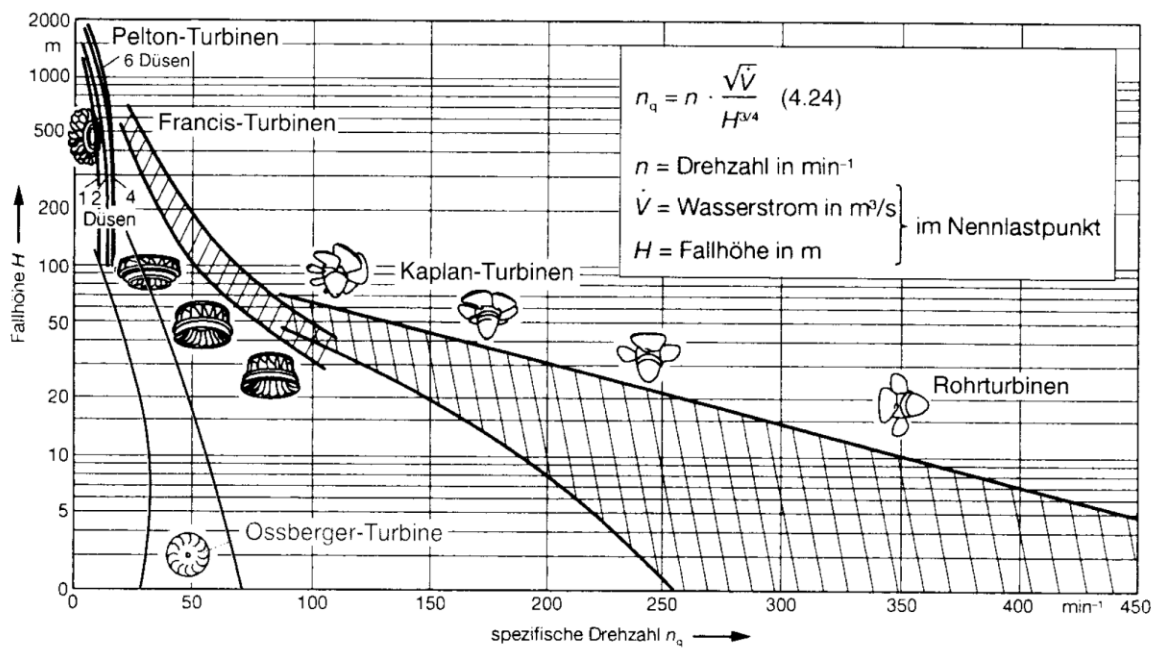


Figure 28 : Géométries appropriées des roues en fonction de la vitesse spécifique n_q et de la chute H (Bohl, "Strömungsmaschinen I")

À partir de ce dimensionnement, on peut obtenir les caractéristiques principales de l'installation, dont une courbe débit-rendement, qui pourront être entrées dans le modèle numérique afin de déterminer la production d'électricité de la centrale lors des simulations (Figure 29).

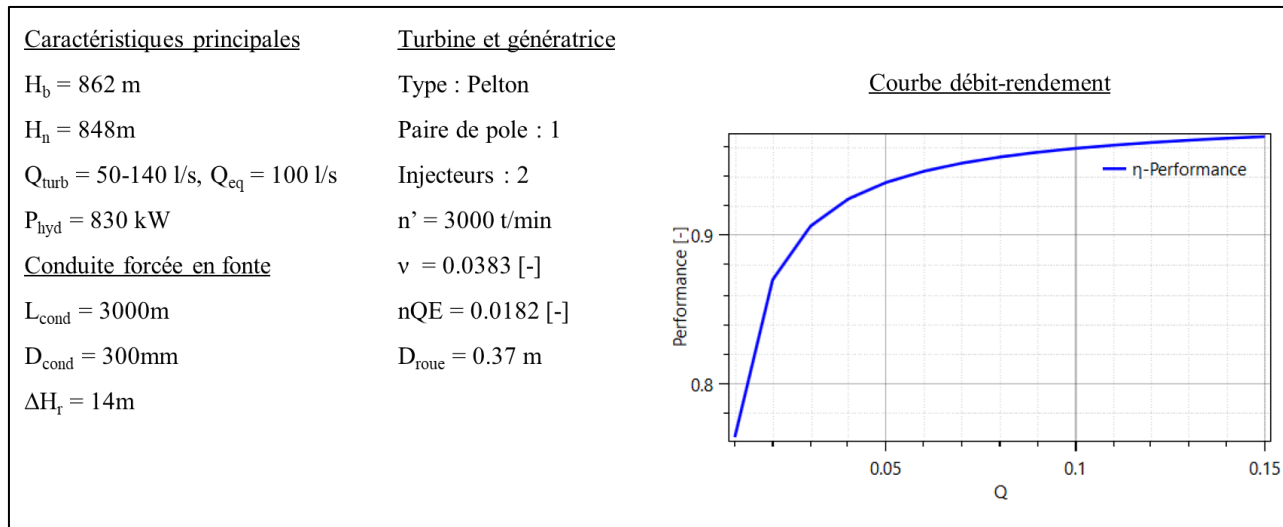


Figure 29 : Caractéristiques principales de l'installation hydroélectrique

6 Modèle numérique RS Minerve

Le modèle numérique a été réalisé sur le logiciel RS Minerve. Ce programme a été développé par le CREALP, HydroCosmos SA, l'EPFL et l'UPV (École polytechnique de Valence)⁵, il permet de simuler des flux d'un système pouvant allier les approches hydrologiques et hydrauliques.

Le modèle numérique RS Minerve va permettre de simuler chaque scénario en fonction des entrées et des dimensions des réservoirs qui ont été modélisées plus haut.

Avec les estimations des apports en eau ainsi que des consommateurs, le modèle permet d'identifier d'éventuels déficits en eau. Le modèle a été simplifié non seulement pour surmonter la complexité du réseau d'eau réel, mais aussi pour pallier certaines informations manquantes.

L'architecture du modèle numérique réalisé est illustrée par la Figure 30, le modèle contient l'ensemble des éléments principaux des réseaux d'eau de la rive gauche du Val de Bagnes. En haut se trouvent les sources d'apports en eau et en bas les consommateurs. À chacun des consommateurs d'eau est associé un planeur permettant de bloquer le débit demandé quand les conditions d'apports en eau ou de remplissage des réservoirs ne sont pas satisfaites.

Les flèches bleues indiquent un flux d'eau direct et instantané entre les éléments, cela permet de simuler les échanges d'eau dans des conduites en charge. Avec cette méthode, la dynamique

⁵ <https://www.crealp.ch/fr/accueil/outils-services/logiciels/rs-minerve.html>

d'écoulement des fluides n'est pas modélisée de façon parfaite, mais elle est acceptable dans le cadre de ce travail. L'élément d'écoulement à surface libre « conduite » représente la conduite d'amenée des prises d'eau du torrent des Places, sous le Mont Rognieux, qui est une conduite à surface libre. La turbine « Pompage Moneyeu » permet de simuler le pompage d'eau depuis les prises d'eau jusque dans le bassin de Moneyeu pour l'enneigement.

Les méthodes de calcul des modules présents dans la Figure 30 sont détaillées dans la documentation technique RS Minerve (Centre de recherche sur l'environnement alpin (CREALP) & HydroCosmos SA, 2020).

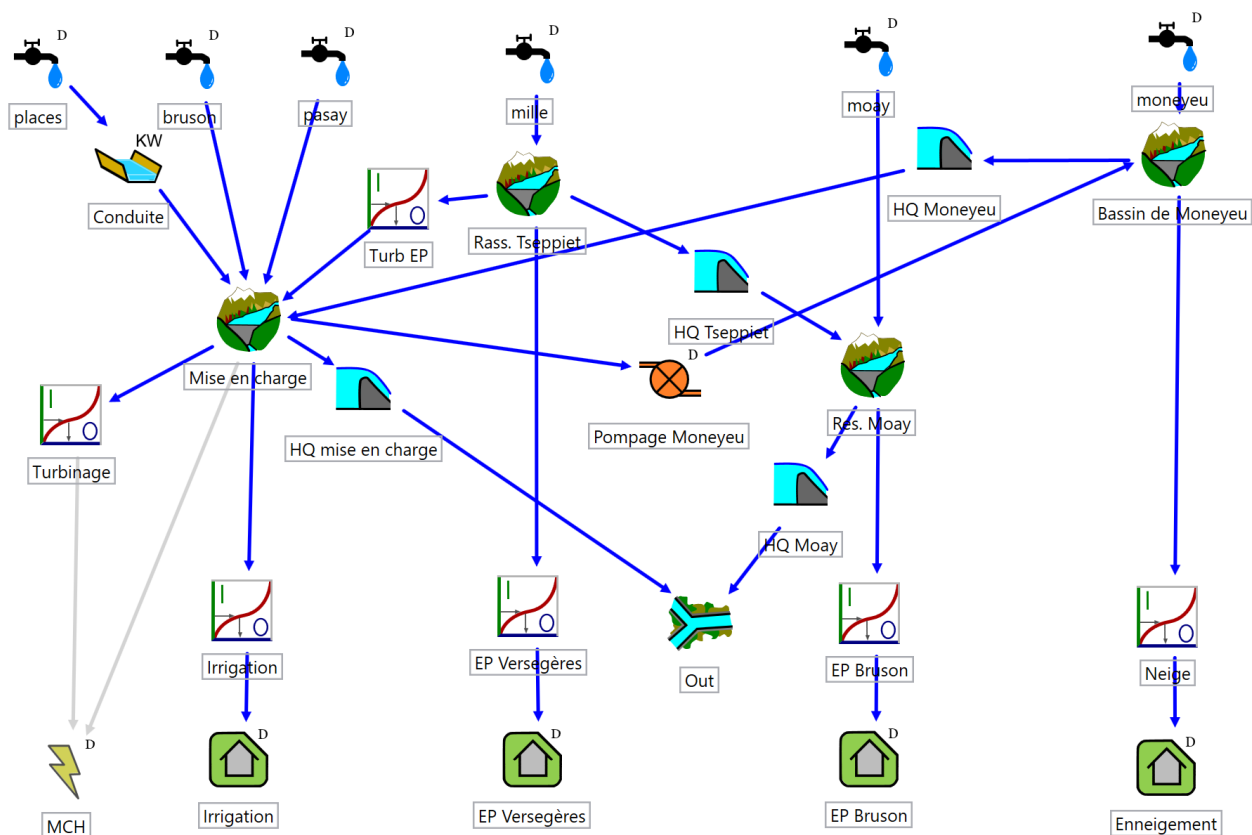


Figure 30 : Schéma du modèle numérique RS Minerve de la zone d'étude

Le module HydroPower a été ajouté sur la chambre de mise en charge permettant de simuler la production hydroélectrique de la centrale de Versegères. Ce dernier a été programmé de façon à turbiner l'eau qui provient des apports à un débit maximal de 140 l/s. Tant que le réservoir « Mise en charge » est en dessus 1745 msm, le planeur délivre de l'eau au module HP. Par cette technique,

on assure le turbinage maximal des apports d'eau en surplus des autres consommateurs. Le planeur « Turb EP » a été ajouté sur la chambre de mise en charge, cela correspond à un trop plein permettant de turbiner l'eau potable provenant des sources de Mille.

Pour simplifier le modèle, il a été décidé de soutirer la consommation d'irrigation directement de la chambre de mise en charge. On a rassemblé toutes les prises d'eau brute en un même point (Mise en charge). Ainsi, de l'eau qui, d'ordinaire, aurait dû être pompée pour être turbinée (torrent de Bruson et torrent de la Pasay) se retrouve directement prête à être turbinée. Cette simplification permet d'éviter l'ajout d'un modèle de stratégie de pompage. Il faut prendre cela en compte dans la production hydroélectrique, car une partie de l'eau turbinée devrait en réalité être pompée depuis la station de la Tarpe.

On a fait l'hypothèse que le bassin de Moneyeu déverse son trop-plein directement dans la chambre de mise en charge. Cette hypothèse est tout à fait plausible étant donné que le bassin de Moneyeu est plus haut de 200 m que la chambre de mise en charge du Tseppiet. Bien que passant par la station de la Tarpe qui est à 1580 msm, l'eau de Moneyeu peut être déviée et remonter au Tseppiet (1748 msm) sans passer par les pompes. Toutes ces simplifications sont illustrées par la Figure 31.

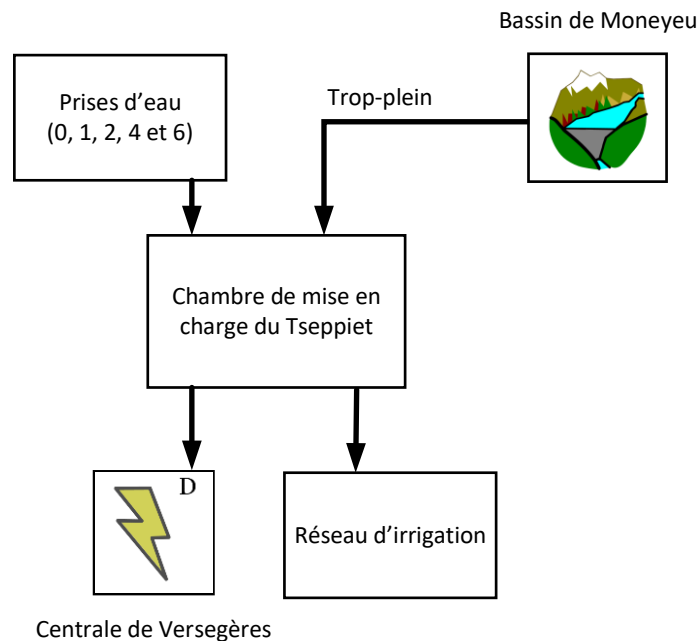


Figure 31 : Schéma des flux simplifiés attribués au modèle Minerve

Les quatre réservoirs du modèle sont liés à une courbe hauteur-volume ainsi qu'un déversoir avec une courbe hauteur-débit, ces dernières ne sont pas connues, mais on connaît en outre le volume de certains d'entre eux (Tableau 7).

Tableau 7 : Réservoirs du modèle avec leur altitude et leur volume

Réservoirs	Volume [m ³]	Altitude [msm]	Courbe H-V	Courbe H-Q
Moneyeu	15000	1950	*	*
Tseppiet (EP)	500*	1750	*	*
Tseppiet (mise en charge)	50*	1746	*	*
Moay (EP)	500	1704	*	*

*donnée estimée

La courbe H-V des réservoirs a été estimée en fonction de leur volume maximal. Une courbe du second ordre a été attribuée au bassin du Moneyeu et des courbes du premier ordre ont été attribuées aux autres réservoirs (ces réservoirs sont de forme parallélépipédique). Les courbes H-Q des déversoirs sont linéaires.

Pour la simulation, on implémente une Database, pour chacun des scénarios envisagés, au modèle numérique. Chaque Database contient les séries temporelles journalières pour chacune des entrées. Les stations du Tableau 8 correspondent aux sources et aux consommateurs du modèle. L'emplacement spatial n'a pas été spécifié dans ce cas (X, Y, Z).

Tableau 8 : Données des Database RS Minerve et leurs caractéristiques

Station	X	Y	Z	Sensor	Category	Unit	Interpolation
places	0	0	0	RGS	Flow	m3/s	Linear
moneyeu	0	0	0	RGS	Flow	m3/s	Linear
tseppiet	0	0	0	RGS	Flow	m3/s	Linear
moay	0	0	0	RGS	Flow	m3/s	Linear
bruson	0	0	0	RGS	Flow	m3/s	Linear
pasay	0	0	0	RGS	Flow	m3/s	Linear
conso_irrig	0	0	0	Users	Flow	m3/s	Linear
conso_versegeres	0	0	0	Users	Flow	m3/s	Linear
conso_mayens	0	0	0	Users	Flow	m3/s	Linear
conso_neige	0	0	0	Users	Flow	m3/s	Linear
pompage_moneyeu	0	0	0	Users	Flow	m3/s	Linear

Les paramètres de simulation, les paramètres des planeurs ainsi que les courbes H-V et H-Q sont détaillés en annexe (Paramètres du modèle numérique). Lors des simulations, plusieurs pas de temps (2 sec, 10 sec, 10 min, 1 h) ont été testés et il apparaît que les résultats sur la dynamique temporelle du modèle convergent autour d'un pas de temps de 10 secondes. C'est pourquoi toutes les simulations ont été faites avec un pas de temps de 10 secondes.

6.1 Rappel des hypothèses et sources d'incertitudes

Avant de présenter les résultats des simulations, il est important de rappeler que de nombreuses caractéristiques liées au modèle numérique ont été estimées et ne proviennent pas de mesures. Dans ce chapitre seront listées les hypothèses qui ont été faites pour réaliser les simulations. Il est également important de préciser que des sources d'incertitudes sont présentes pour tous les résultats quantitatifs qui suivront.

Les données climatiques :

Sont fournies par le WSL, ces données ne sont pas exactes, d'une part, car les modèles utilisés sont difficiles à valider, mais surtout, car les scénarios RCP proviennent d'estimation de réchauffement planétaire hypothétique qui peuvent grandement varier de l'un à l'autre. C'est pour cette raison que 3 scénarios climatiques sur 39 ont été retenus. Il n'est pas possible de valider ces données avec

certitude. De plus, les valeurs utilisées (hormis Moneyeu) proviennent du sous-bassin 2 « Bagnes lower part » du WSL (Figure 9) qui a une très grande taille. Cela implique que des petits découpages dans ce grand bassin peuvent s'éloigner de la moyenne considérée dans ce grand bassin versant.

Le modèle d'apport en eau :

Se base sur la valeur RGS des données du WSL. Ce modèle estime les quantités d'eau disponible à chaque ouvrage de captage d'eau en fonction de la surface de son bassin versant. Les bassins versants correspondants ont été découpés en fonction de la topographie du terrain, mais leur surface n'est pas exacte. De plus, pour chaque prise d'eau une capacité maximale liée à la taille des conduites a été calculée sans prendre en compte la réduction ou l'augmentation de section des conduites. Il se peut que les valeurs de débits maximaux dans les conduites présentées diffèrent légèrement de la réalité.

Le modèle d'irrigation :

Se base sur un modèle de la FAO relativement simpliste qui est fonction des précipitations et de l'évapotranspiration. Les paramètres de ce modèle ont été choisis sur la base des informations disponibles, mais elles pourraient être mal estimées. De plus, aucune mesure n'est prise sur le réseau d'irrigation ce qui complique la validation du modèle retenu. La surface correspondant à la demande en eau pour l'irrigation correspond à la surface agricole du cadastre communal, il se peut que cette surface soit surestimée.

La consommation d'eau potable :

Se base sur des mesures d'Altis. Le profil de consommation est construit sur deux années de mesures utilisables seulement. L'estimation du nombre d'habitants fourni en eau potable se base sur la population des villages de Bruson et Versegères et a été volontairement réduite vu que le versant gauche ne distribue pas à lui seul les villages.

La centrale hydroélectrique :

A été redimensionnée, car les infos sur le dimensionnement final ne sont pas disponibles. Certaines de ses caractéristiques pourraient être différentes lors de sa construction.

Le modèle numérique :

Son architecture est basée sur les réseaux d'eau brute et d'eau potable de la zone d'étude. Le modèle est par endroit simplifié pour permettre une simulation fonctionnelle. Certains des paramètres du

modèle, comme les courbes hauteur-volume des réservoirs ou les courbes hauteur-débit des déversoirs ont été estimées par manque d'informations.

7 Résultats

7.1 Usages de l'eau

Les usages de l'eau sont très inégaux entre chacun des utilisateurs. Une moyenne des trois scénarios a été faite pour les trois années de référence pour avoir un ordre de grandeur des parts d'eau utilisée pour l'eau potable, l'irrigation, la production hydroélectrique et l'enneigement artificiel. La Figure 32 représente la part de l'utilisation annuelle de l'eau en fonction des différents usages de la région.

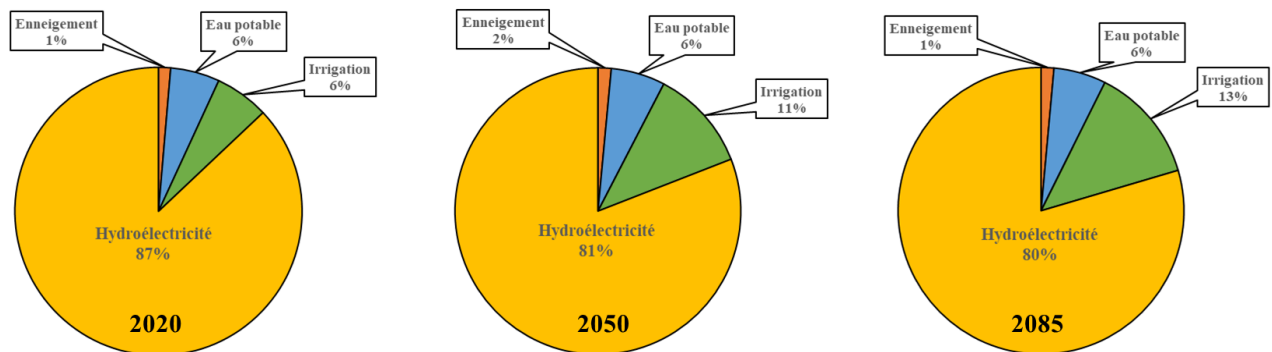


Figure 32 : Ordre de grandeur des parts d'eau utilisées par chacun des usagers

On constate que l'hydroélectricité représente une part importante de l'utilisation de l'eau. Ceci est dû au fait que la région bénéficie d'eau en abondance et que par conséquent le surplus d'eau peut être valorisé sous forme d'électricité. Les proportions pour l'eau potable, si l'on ne tient pas compte de l'augmentation de la population, et l'enneigement devraient rester constantes au fil des années et représentent les plus petites parts d'utilisation d'eau. La demande en eau pour l'irrigation semble à l'avenir augmenter nettement sa part entre 2020 et 2085. Ceci est dû au changement des régimes de précipitations et à la hausse des températures.

Les résultats diffèrent fortement selon les trois scénarios retenus, il est donc nécessaire de comparer chacun d'entre eux séparément. Ainsi sont représentés pour chacun des scénarios, les bilans de flux d'eau par mois avec les apports prévus et les volumes consommés par les différents usagers. Pour les différents scénarios, les résultats diffèrent dès l'an 2020, ceci s'explique par le fait que les boucles climatiques ayant été simulées par le WSL commencent à l'an 2010 et que par conséquent les valeurs prévues ont déjà quelque peu divergé. Il est également important de rappeler que les données pour les années 2020, 2050 et 2085 utilisées pour cette étude sont en réalité une moyenne des dix ans autour de l'année cible (Figure 11). Ceci explique encore la différence parfois marquée entre les années 2020 de chaque scénario.

Le scénario « S008 » humide représente la situation la plus favorable sur le point de vue hydrique. Sur la Figure 33, on voit que, chaque mois, les apports dépassent largement les consommations liées à l'eau potable, l'enneigement et l'irrigation. Le surplus la plupart du temps est utilisé par l'hydroélectricité. Lorsque les apports dépassent la demande, c'est que la capacité maximale de la turbine est atteinte. Pour les mois de mai, juin et juillet 2020, on constate que la turbine est sous-dimensionnée, car seulement la moitié des apports sont utilisés. Étant donné les apports bien plus faibles durant les mois d'hiver, il ne serait pas bénéfique d'augmenter la capacité de la turbine, vu que cela engendrerait des coûts supplémentaires non négligeables. Ce scénario présente la particularité de bénéficier plus d'eau à l'horizon 2085 qu'à l'horizon 2050, en effet, ce scénario humide prévoit une rapide diminution des émissions de gaz à effet de serre et rapide stabilisation des températures. La situation sur le plan hydrique se dégrade donc à l'horizon 2050 pour devenir meilleure pour 2085 avec des apports en eau nettement supérieurs. On constate quand même un changement majeur pour 2085 ; les apports durant les mois d'hiver sont plus élevés, on a ainsi une répartition temporelle de l'eau disponible moins hétérogène entre les mois au cours de l'année.

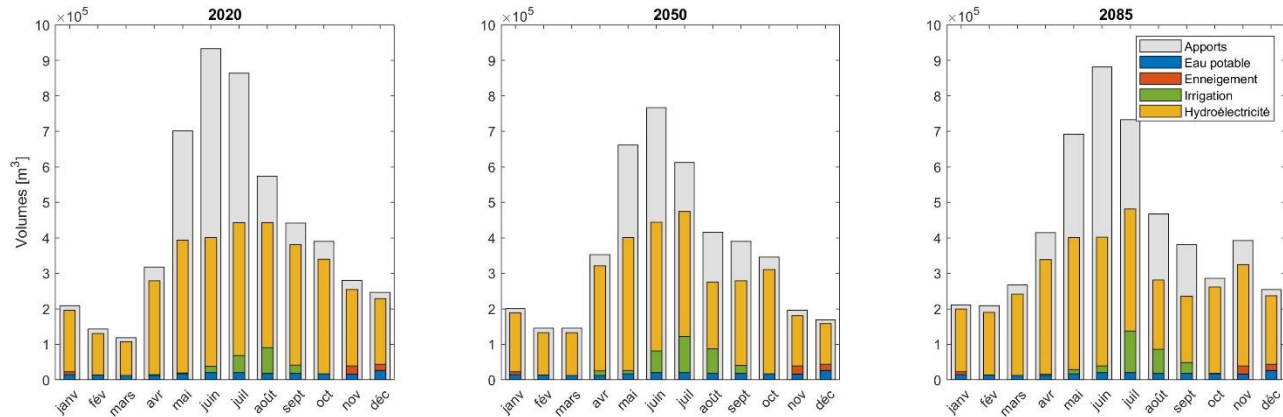


Figure 33 : Bilan des volumes d'eau mensuels pour le scénario humide (S008)

Sur la Figure 34 qui montre le scénario intermédiaire, on voit que les apports en eau dépassent toujours les consommations, mais que cette marge est nettement moins grande que pour le scénario humide. La demande pour l'irrigation est plus grande entre 2050 et 2085. Pour 2050 et 2085, on observe qu'un écart se creuse entre les mois humides et les mois plus secs. Les mois secs prévoient d'assez faibles quantités d'apports en eau. Les mois de mai, juin et juillet pour 2050 et, les mois de mai et juin pour 2085 ressortent avec d'importantes quantités d'eau. À l'horizon 2085, on observe une importante diminution des quantités d'eau utilisées pour produire de l'électricité, cela laisse supposer que des périodes de sécheresse pourraient provenir et ainsi limiter l'utilisation de l'eau à disposition aux habitants et à l'agriculture. Notamment, car la demande en eau pour l'irrigation augmente clairement par rapport au scénario humide.

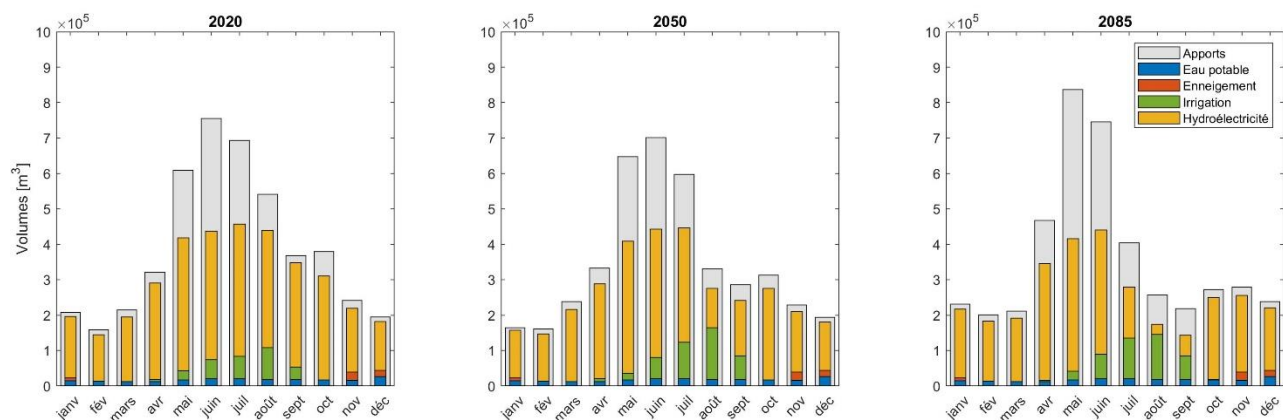


Figure 34 : Bilan des volumes d'eau mensuels pour le scénario médium (S023)

Le scénario sec (Figure 35) présente la particularité de jouir de beaucoup d'eau lors de l'année 2020. Dès l'horizon 2050, la tendance observée pour le scénario médium, soit un pic de débit d'apport lors des mois de mai, juin et juillet, s'accélère. C'est alors qu'à l'horizon 2085 on observe des volumes d'apports beaucoup plus faibles en mai et juin, et des apports beaucoup plus importants lors des mois hivernaux où les précipitations sous forme de neige devraient avoir disparu.

L'horizon 2085 est marqué par une période critique très intense où la demande dépasse largement les apports en eau pendant les mois d'août et septembre. On peut voir que parallèlement à la baisse des quantités d'eau disponibles, la demande en eau pour l'irrigation augmente beaucoup. Cette période de pénurie se solde par un éventuel déficit en eau d'environ 300'000 m³. Les apports supplémentaires des mois de mai et juin seraient suffisants pour éviter les pénuries s'il y avait un moyen de les stocker.

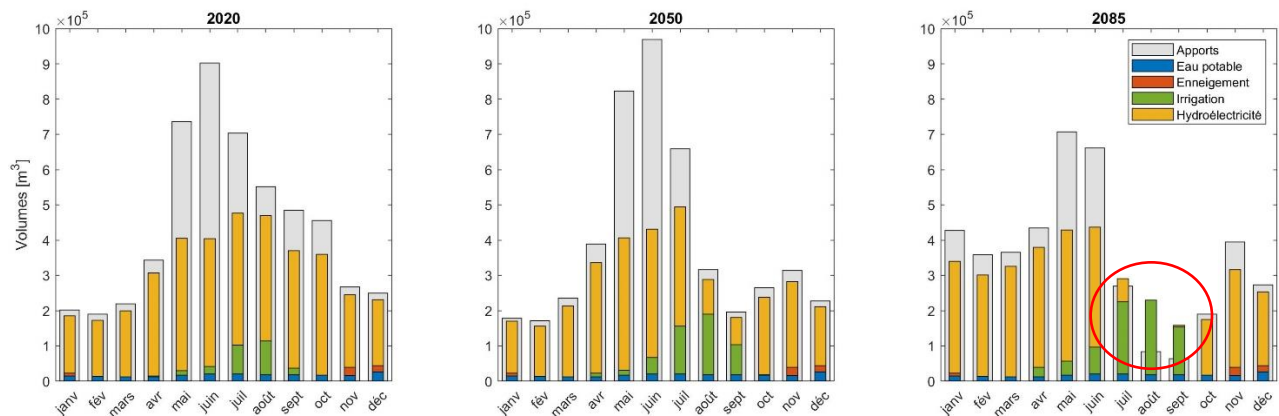


Figure 35 : Bilan des volumes d'eau mensuels pour le scénario sec (S001)

À partir des simulations réalisées, il est possible d'observer les périodes critiques pour chaque scénario. Dans le logiciel RS Minerve, au terme de la simulation, on peut identifier chaque jour, si la demande d'un consommateur n'a pas été satisfaite. Il en ressort alors des périodes critiques qui sont présentées dans la Figure 36.

Les résultats suivants sont à considérer avec précaution, car ils semblent dépendre de la sensibilité du modèle numérique. Plusieurs simulations ont été faites avec des pas de temps différents. Étant donné la petite taille des réservoirs du système et des données au jour, le modèle pourrait ne pas se comporter exactement comme dans la réalité si l'on veut observer une dynamique journalière, voire

hebdomadaire. Les barres verticales de la Figure 36 recensent les jours où il y a un potentiel déficit des apports en eau. La courbe noire représente les précipitations prévues. L'indication de couleur sur la criticité des déficits est fonction des volumes en jeu.

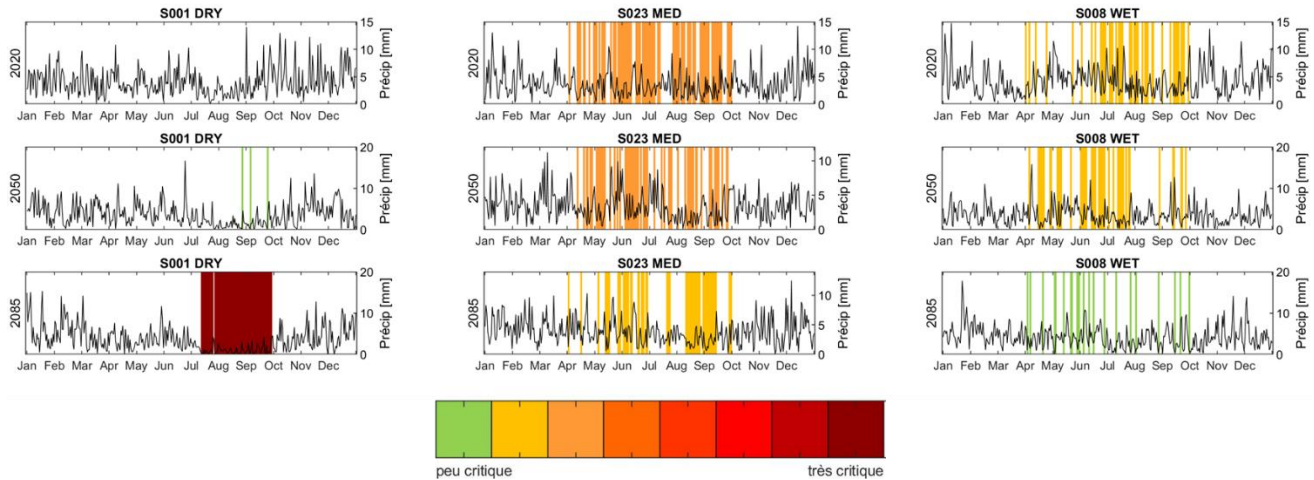


Figure 36 : Périodes critiques pour chaque simulation avec la courbe des précipitations

Si l'on observe les périodes critiques de chaque scénario, il apparaît alors que des déficits ponctuels surviennent même lors des scénarios médium et humide. Quant au scénario sec, il semble que les déficits apparaissent seulement à l'horizon 2085, mais ces déficits sont beaucoup plus critiques du point de vue des volumes d'eau en jeu.

Lors des scénarios médium et humide, on constate une diminution des périodes critiques avec le temps qui est due au changement de régime de précipitation et à la baisse de la demande en eau pour l'irrigation. Effectivement, les périodes critiques surviennent principalement pendant la période d'irrigation des cultures.

Il est étonnant de constater que les périodes critiques sont plus nombreuses dans les scénarios intermédiaire et humide que dans le scénario sec pour la période 2020 à 2050. Cette différence est due aux apports prévus par le WSL ainsi qu'aux besoins en eau pour l'irrigation qui varient fortement selon les scénarios. Ces résultats sont, en partie, causés par des phénomènes journaliers aléatoires et par le fait que la capacité de stockage de l'eau est quasiment nulle, cela a une influence sur la dynamique du modèle numérique.

7.2 Production d'électricité

La production de la centrale de Verségères est calculée par les simulations du modèle RS Minerve.

Le calcul est donné par les équations suivantes :

Équation 7 : Calcul de la puissance de la centrale dans Minerve

Équations de Colebrook - White	Équations de Darcy - Weisbach
$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} \right)$	$Z_{net} = (Z_{water} - Z_{central}) - f \frac{8 \cdot L \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot D^5}$
$Re = v \cdot \frac{D}{\nu}$	$Power = \eta \cdot 1000 \cdot Q \cdot g \cdot Z_{net}$

Avec : le niveau d'implantation de la centrale $Z_{central}$, la longueur de la conduite L , le diamètre de la conduite D , la rugosité de sable k , la viscosité cinématique ν et la courbe de rendement caractéristique η .

Il est alors possible de visualiser la variation de puissance de la centrale dans le temps, comme illustré dans la Figure 37.

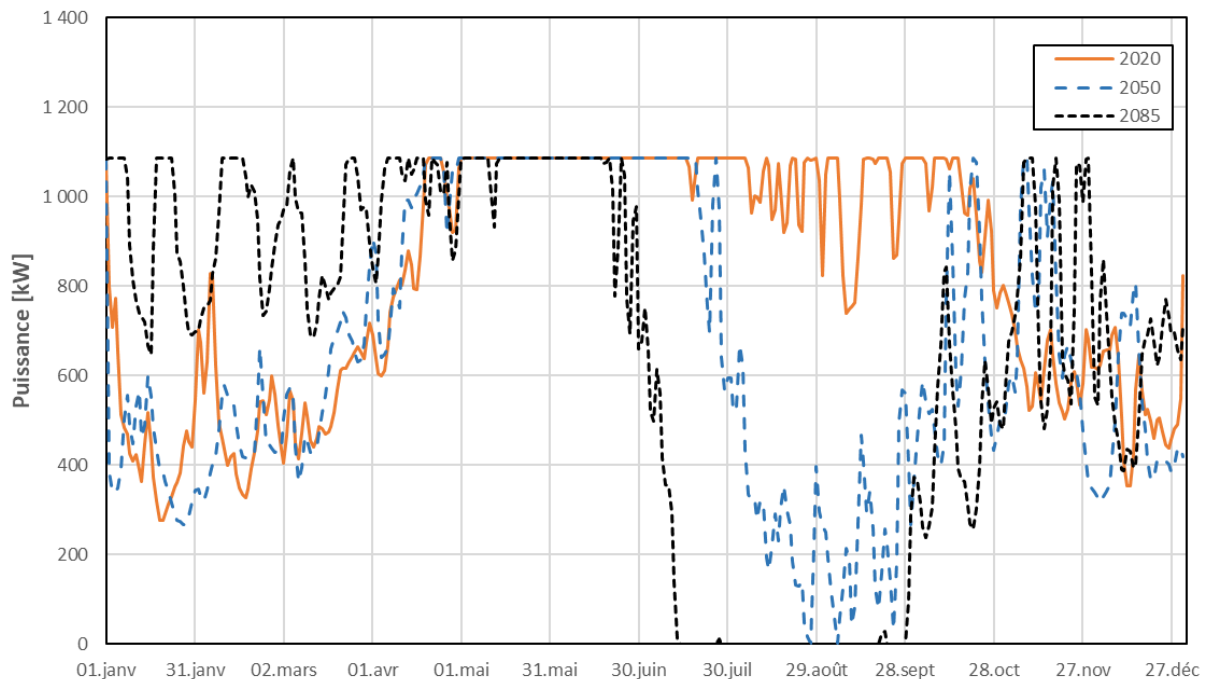


Figure 37 : Exemple de courbes de puissance délivrée par la centrale (scénario S001, sec)

Les résultats des simulations montrent des différences de production d'électricité en fonction des scénarios. La production dépend de la disponibilité de l'eau en fonction des besoins de consommation. La production annuelle estimée selon les scénarios et les périodes varie entre environ 7 GWh et 5 GWh. Cela représente la consommation annuelle de 1800 à 1200 ménages en Suisse.

Tableau 9 : Productions annuelles estimées de la centrale de Versegères

Scénario	2020	2050	2085
SEC	7.19 [GWh]	5.78 [GWh]	5.78 [GWh]
MEDIUM	6.70 [GWh]	5.67 [GWh]	5.28 [GWh]
HUMIDE	6.84 [GWh]	5.96 [GWh]	6.65 [GWh]

Dans le Tableau 9, on constate que le scénario sec n'est pas le pire du point de vue de la production hydroélectrique estimée. On observe tout de même une baisse de la production pour 2050, mais cette baisse semble ne pas durer, car la production estimée à l'horizon 2085 est la même que pour 2050.

Le scénario intermédiaire est celui qui prévoit la plus basse production d'électricité en moyenne avec une diminution progressive au fil du temps.

Le scénario humide est le plus favorable pour l'avenir du point de vue de la production de la MCH.

La production devrait légèrement diminuer à l'horizon 2050, mais remonter jusqu'à 2085.

La Figure 38 présente les estimations de production de la centrale par mois.

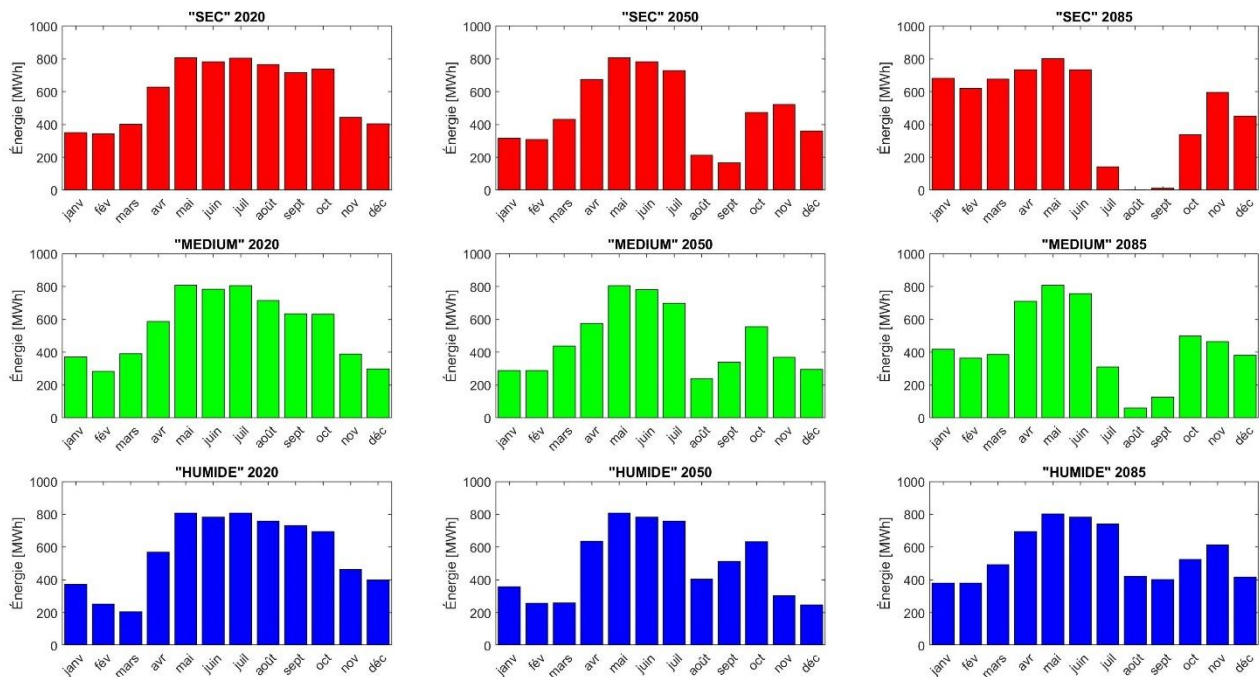


Figure 38 : Prévisions de production hydroélectrique par mois

Pour le scénario sec, on constate une baisse progressive de la production estivale. Avec le changement de régime d'écoulement prévu, on atteint une production quasi nulle lors des mois de juillet, août et septembre alors que la production hivernale augmente beaucoup à cause des précipitations hivernales sous forme de pluie et non plus de neige.

Le scénario intermédiaire prévoit le même type de dynamique que le scénario sec avec des extrêmes moins marqués et une production totale légèrement plus basse.

Le scénario humide semble respecter la dynamique actuelle pour toutes les périodes avec un léger creux de la production estivale au fil du temps.

On observe donc de manière générale une baisse de la production dans le temps ainsi que des changements saisonniers de la production. Pour la situation actuelle, la production maximale se situe autour des mois d'été et à l'avenir cette production tend à croître lors des mois d'hiver et subit un creux pendant la fin de l'été.

8 Discussion

8.1 Discussion des résultats

Les quantités d'eau prévues pour les prochaines années sont largement suffisantes en comparaison des besoins de la région sur une année. C'est, en outre, la disponibilité de l'eau au cours des saisons qui variera beaucoup dans le Val de Bagnes. À l'avenir, il est probable que la rive gauche du Val de Bagnes se trouve dans des périodes de stress hydrique. Comme il a été montré précédemment, le scénario sec à l'horizon 2085 présente de graves déficits, mais ce n'est pas la seule situation où le manque d'eau risque de se faire ressentir. Les résultats de certaines simulations montrent des périodes critiques où la demande est supérieure aux apports en eau.

La future MCH de Versegères semble être une excellente solution pour revaloriser l'eau en surplus. La production électrique est peu dépendante des régimes d'écoulement saisonniers des différents scénarios. En fonction des scénarios et des années, la production risque de varier temporellement, mais il n'y a pas beaucoup d'impact au niveau de la production globale annuelle. Étant donné le contexte de SRI pour la mini-hydraulique, la variation de production dans le temps ne devrait pas trop influencer le rendement financier de l'installation.

Le réseau d'eau potable semble suffisamment solide pour assurer la distribution dans les années à venir, quel que soit le scénario envisagé.

Un des problèmes majeurs de la zone réside dans l'utilisation de l'eau pour l'irrigation. Comme déjà identifié dans d'autres études (p.ex. MontanAqua), les périodes de stress hydrique seront néfastes principalement pour l'agriculture et pour l'hydroélectricité dans une moindre mesure. La distribution d'eau potable ne devrait souffrir d'aucun déficit d'ici à 2085 sauf en cas de réelle explosion de la démographie de la région, ou encore de cas de sécheresse extrême. L'enneigement artificiel représente une part infime des volumes d'eau consommés et il semble qu'il ne devrait pas non plus souffrir de manque dans ce domaine vu les quantités d'eau disponible pendant la période d'enneigement.

Une partie de la solution face aux déficits prévus réside dans le stockage des surplus d'eau.

Sur la Figure 39, on voit que les volumes d'apports en surplus des mois de mai et juin pourraient être stockés pour permettre de combler la demande des mois de juillet, août et septembre. Une telle

solution de stockage pourrait également limiter les situations critiques des autres scénarios (Figure 36). Cette solution permettrait de régler le problème sans devoir diminuer la quantité d'eau turbinée en mai et juin et en augmentant sa part pour les mois suivants.

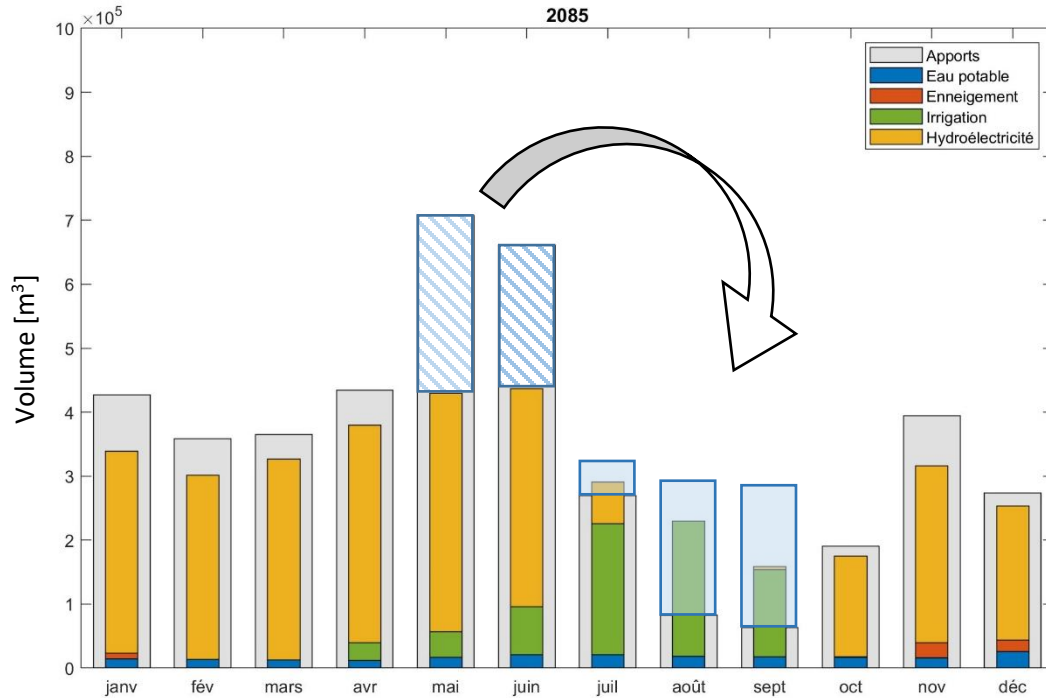


Figure 39 : Volumes captés et consommés avec stockage saisonnier, scénario sec

Actuellement, le bassin de Moneyeu est exploité par TVSA, mais il n'est pas vraiment utilisé à son plein potentiel, car environ 40'000 m³ d'eau sont pompés pour l'enneigement sur les 50'000 m³ utilisés au total (pour un volume de réservoir de 15'000 m³). Le bassin de Moneyeu pourrait alors être agrandi pour faire face à la demande future en stockage d'eau.



Figure 40 : Bassin de Moneyeu

Avec la station de pompage de la Tarpe qui va être agrandie pour une puissance totale d'environ 400 kW, il sera possible d'absorber les débits d'apports non utilisés à hauteur de 100 l/s, et de stocker le volume dans le bassin de Moneyeu.

Pour estimer l'impact d'une plus grande capacité de stockage du bassin de Moneyeu, ce dernier a été agrandi dans le modèle numérique et deux planeurs pour le stockage et le déstockage du bassin ont été implémentés. Le volume du réservoir a été fixé à environ 100'000 m³ et les scénarios ont été resimulés dans le but de voir comment évoluent les phases critiques des simulations précédentes.

Un tel agrandissement du réservoir semble ambitieux vu la place disponible, il ne sera pas traité ici de la faisabilité d'un éventuel agrandissement ni des coûts engendrés.

Sur la Figure 42, on voit que l'ajout d'un volume de stockage ferait grandement varier le risque de périodes critiques par rapport aux périodes critiques de la Figure 41. On constate de potentielles périodes de manque pour les scénarios sec et intermédiaire à l'horizon 2085 uniquement. Les périodes identifiées en vert restent peu critiques avec des volumes en jeu parfaitement gérables inférieurs à 30'000 m³. Selon les simulations, une augmentation de 50'000 m³ suffit à effacer les

périodes critiques des scénarios médium et humide, mais plongerait le scénario sec dans une phase plus critique à l'horizon 2085.

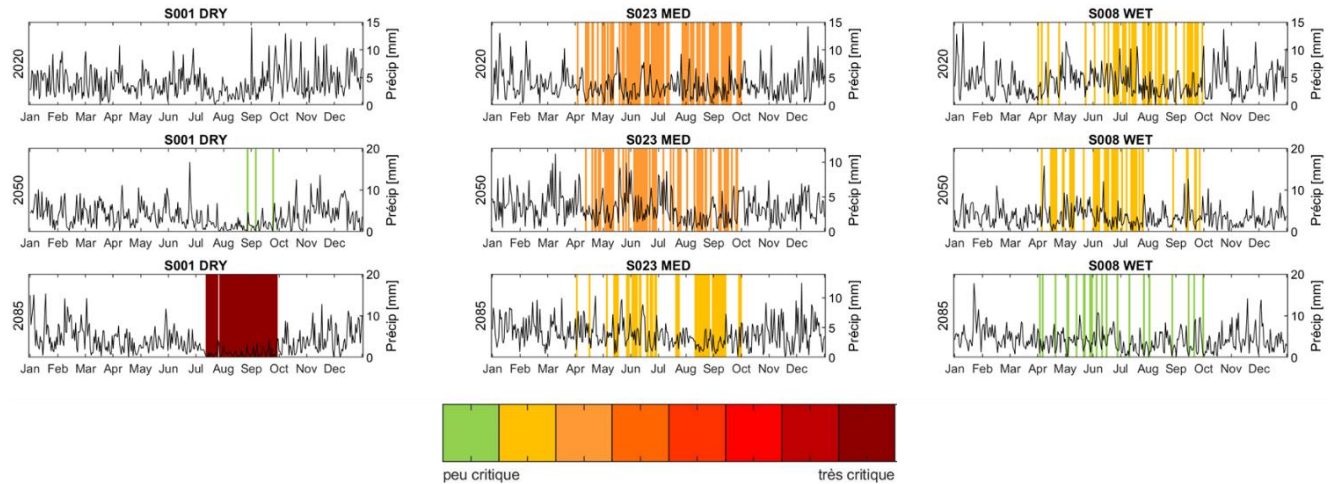


Figure 41 : Périodes critiques pour chaque simulation avec la courbe des précipitations

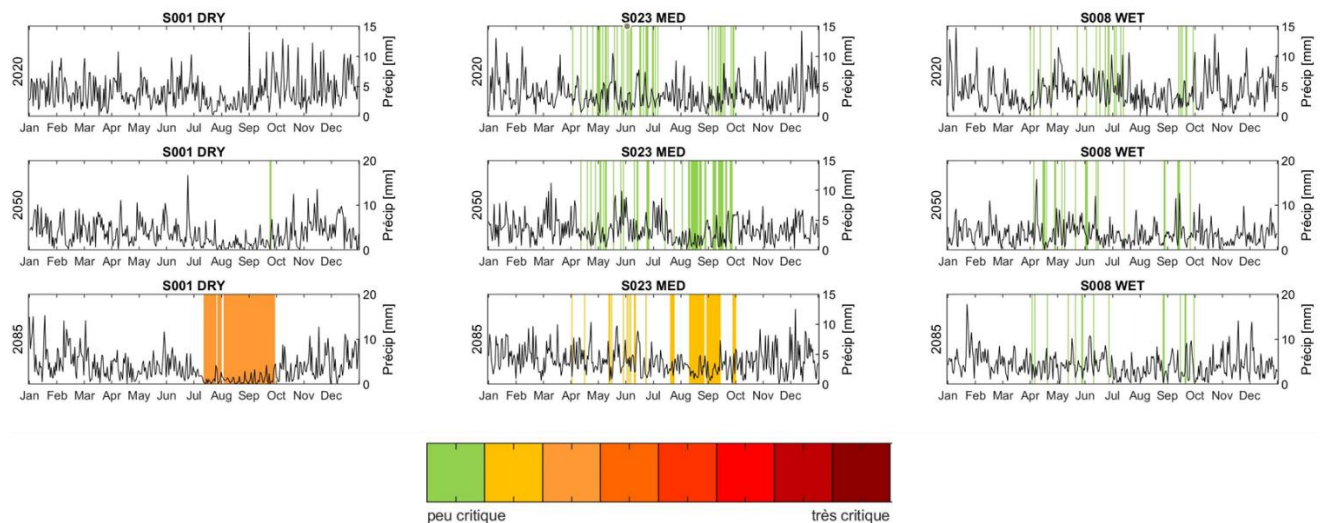


Figure 42 : Périodes critiques pour chaque simulation avec la courbe des précipitations avec le bassin de Moneyeu modifié

L'agrandissement du bassin de Moneyeu et l'ajout d'un espace de stockage supplémentaire permettraient de s'assurer que lors des périodes de sécheresse, l'approvisionnement en eau pour l'irrigation soit assuré. En outre, ceci permettrait d'augmenter légèrement la production hydroélectrique pour bénéficier d'une production plus souple en relation avec la demande en électricité et donc d'augmenter légèrement la rentabilité de la MCH de Versegères. Pour finir, si

des périodes de sécheresses extrêmes survenaient, le réservoir pourrait soutenir la distribution en eau potable si cette dernière venait à manquer. Il est important de rappeler que l'utilisation du bassin engendrerait des coûts liés à la consommation d'électricité pour remonter l'eau dans le bassin. Ces coûts pourraient être partagés entre les différents utilisateurs du bassin.

La principale problématique pour la gestion de l'eau de la région provient de l'irrigation des cultures. Il va de soi que l'amélioration de l'efficacité de l'arrosage pourrait jouer un rôle important dans la gestion des périodes critiques par la diminution des volumes utilisés pour arroser les cultures. L'ajout de volume supplémentaire de stockage reste incontestablement la meilleure façon de répondre aux problématiques rencontrées.

8.2 Limites du modèle et perspectives

Les résultats présentés ne peuvent pas être validés expérimentalement pour l'heure. La calibration du modèle devrait passer par de nombreuses prises de mesure sur le réseau d'irrigation et sur les ouvrages de captage d'eau. Ces données étant indisponibles, le modèle présent est encore théorique. De plus, les scénarios retenus ne reflètent pas l'avenir exact, car ils sont issus de simulations climatiques qui ne sont pas fiables à 100% d'où le choix d'avoir pris trois scénarios différents.

Il faut retenir que les résultats obtenus dans l'étude permettent essentiellement de montrer des tendances et l'importance d'un système de stockage à usage multiple. Il en ressort des indications qualitatives plutôt que quantitatives.

Il serait intéressant de valider le modèle, car cela permettrait un dimensionnement précis du volume de stockage supplémentaire nécessaire. Pour valider le modèle, il faudrait, en plus des nombreuses mesures à prendre, attendre la fin de la construction de la centrale de Versegères pour avoir un point de validation supplémentaire sur la production réelle de la centrale.

Il serait également intéressant de recalculer la consommation d'eau potable de façon plus précise. L'augmentation du stockage de Moneyeu offrirait une bonne occasion de faire du pompage-turbinage à petite échelle. La stratégie devrait être étudiée plus en profondeur pour aller plus loin et envisager de tels travaux.

9 Conclusion

Avec le changement climatique à venir, dans les prochaines décennies, le Val de Bagnes pourrait se retrouver dans des situations de stress hydrique. La gestion durable de la ressource en eau impliquera d'anticiper les effets de ce changement climatique pour garantir une bonne coordination entre les différents utilisateurs.

Grâce au modèle numérique réalisé, il a été possible de simuler les scénarios hydrauliques susceptibles de se produire dans les prochaines années.

Dans ce travail, il a été montré que des périodes critiques pour l'irrigation pourraient survenir déjà avant 2050. Dans le pire des cas, un scénario climatique sec conduirait à de très importants déficits en eau associés à des périodes de sécheresse prolongées à l'horizon 2085. Dans une optique de développement durable, la mise en place de la future minicentrale hydroélectrique est une excellente opportunité de revaloriser énergétiquement l'eau en surplus et devrait garder un bon rendement de production en tout cas jusqu'à l'horizon 2085.

La région de la rive gauche du Val de Bagnes est marquée par l'aspect très saisonnier de ses usages de l'eau : une irrigation intense en été ainsi qu'une consommation d'eau potable élevée et l'utilisation de canons à neige pendant la saison touristique, en hiver.

Les périodes de stress hydrique seront principalement caractérisées par des périodes critiques pendant la période d'irrigation tandis que les apports durant le début de l'été seront abondants.

C'est pourquoi la solution de réservoir multi-usage s'impose comme une solution durable, permettant le stockage de l'eau en réserve pour les épisodes de sécheresse. Le bassin de Moneyeu, bien que construit en 2015, semble trop petit pour subvenir, à lui seul, aux besoins cette région. D'après les résultats des simulations, il serait bénéfique d'augmenter la capacité de stockage de la région en augmentant le volume du bassin de Moneyeu.

Associé à des efforts sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau, particulièrement, dans l'irrigation des cultures, l'agrandissement du réservoir de Moneyeu pourrait faire bénéficier à la région d'une solution adéquate et solide pour faire face aux défis climatiques dans la gestion durable de l'eau.

10 Références

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome, 300(9)*, D05109.
- Branche, E. (2017). The multipurpose water uses of hydropower reservoir : The SHARE concept. *Comptes Rendus Physique*.
- Brunner, M. I., Gurung, A. B., 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.
- Brunner, M. I., Zappa, M., Thür, A., & Stähli, M. (2019). *Bagnes : Documentation hydrological simulations and products*. WSL.
- Centre de recherche sur l’environnement alpin (CREALP), & HydroCosmos SA. (2020). *RS MINERVE - Technical Manual, Version 2.25*.
- CERT, ingénierie S. (2012). *Prélèvement débits Moneyeu Campagne de mesure des débits Août/septembre 2012*.
- Heller, P. (2017). *Hydrologie de l’ingénieur*.
- NCCS. (2018). *CH2018—Climate Scenarios for Switzerland, Technical report*. National Centre for Climate Services.
- OFEN. (2019a). *Potentiel hydroélectrique de la Suisse*. Office fédéral de l’énergie.
- OFEN. (2019b). *Production et consommation totales d’énergie électrique en Suisse*. Office fédéral de l’énergie.
- OFEV. (2019). *La canicule et la sécheresse de l’été 2018*. Office fédéral de l’environnement.

- Reynard, E. (2000). Gestion patrimoniale et intégrée des ressources en eau dans les stations touristiques de montagne. *Université de Lausanne, Faculté des Lettres, Institut de Géographie, Lausanne.*
- Reynard, E., Bonriposi, M., Graefe, O., Herweg, K., Homewood, C., Huss, M., Kauzlaric, M., Liniger, H., Rey, E., & Rist, S. (2013). *MontanAqua. Anticiper le stress hydrique dans les Alpes? Scénarios de gestion de l'eau dans la région de Crans-Montana-Sierre (Valais): résultats finaux et recommandations.* Universités de Berne, Lausanne et Fribourg.
- Schaepli, B., Manso, P., Fischer, M., Huss, M., & Farinotti, D. (2019). The role of glacier retreat for Swiss hydropower production. *Renewable Energy.*
- Skhiri, A. (2017). *LES BASES DE L'IRRIGATION: Calcul des besoins en eau.*
- SVGW. (2018). *Consommation d'eau potable.* Eau Potable SVGW-SSIGE.
<http://trinkwasser.svgw.ch/index.php/index.php?id=874&L=1 =>
- SWV. (2012). *Droit de retour et renouvellement de concession des centrales hydroélectriques.* Association suisse pour l'aménagement des eaux.
- Thut, W., Weingartner, R., & Schädler, B. (2016). *Le changement climatique conduit à des pénuries d'eau pour l'homme et la nature. Des réservoirs à buts multiples assurent l'alimentation en eau et en énergie.*
- Weissbrodt, B. (2013). *La Suisse et le droit à l'eau : Du silence constitutionnel à l'engagement international.*

11 Annexes

11.1 Caractéristiques des conduites d'amenée

EP					
Conduite	Dist horiz [m]	Déniv [m]	L conduite [m]	Pente	Écoulement
Ecuries de Mille-Tseppiet	2113	400	2151	0.189304	En charge
Tseppiet-Mayens Bruson	2060	125	2064	0.06068	En charge

Eau brute					
Conduite	Dist horiz [m]	Déniv [m]	L conduite [m]	pente	
Les Pellissiers-Tseppiet	2445	241	2457	0.098569	Surface libre
Tseppiet-Mayens Bruson	1900	135	1905	0.071053	En charge
Mayens Bruson- SP St. Tarpe	850	40	851	0.047059	En charge
St-Tarpe-Moneyeu	1184	570	1314	0.481419	En charge

11.2 Paramètres du modèle numérique

Pas de temps : 10 secondes



Conduite surface libre :

Name	Value	Unit	
L	2400	m	
B0	0.1	m	
m	1	-	
J0	0.1	-	
K	90	m ^{1/3} /s	
N	1	-	

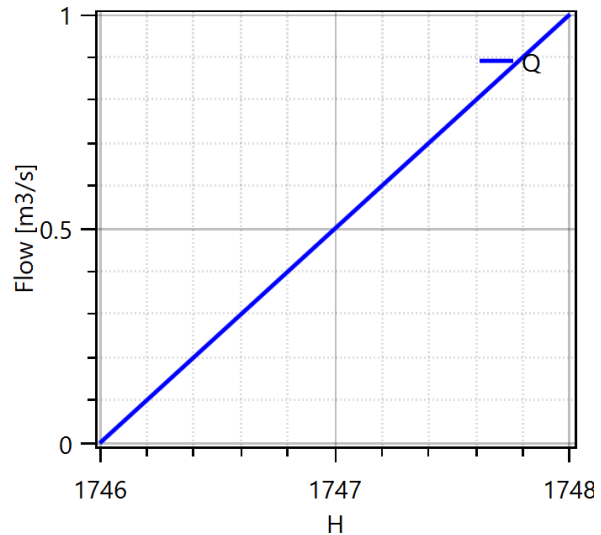
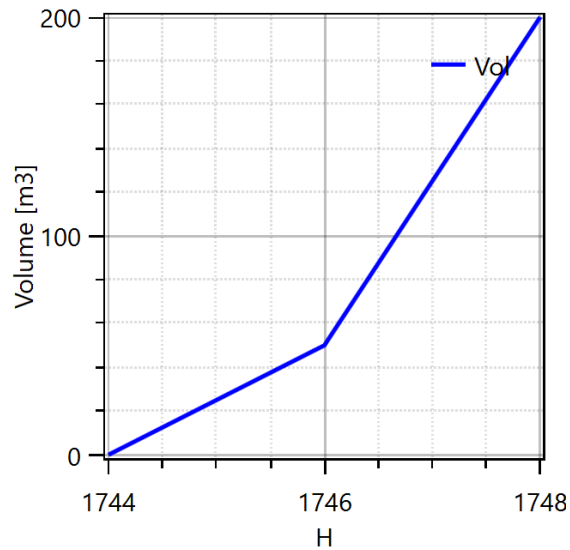
⬆ Initial conditions

Name	Value	Unit	
Qlni	0.1	m ³ /s	

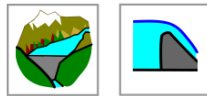


Réservoir « Mise en charge » :

Courbes H-V et H-Q

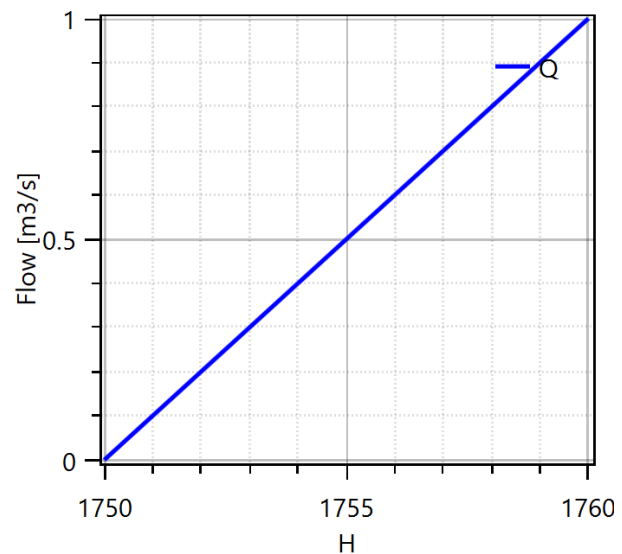
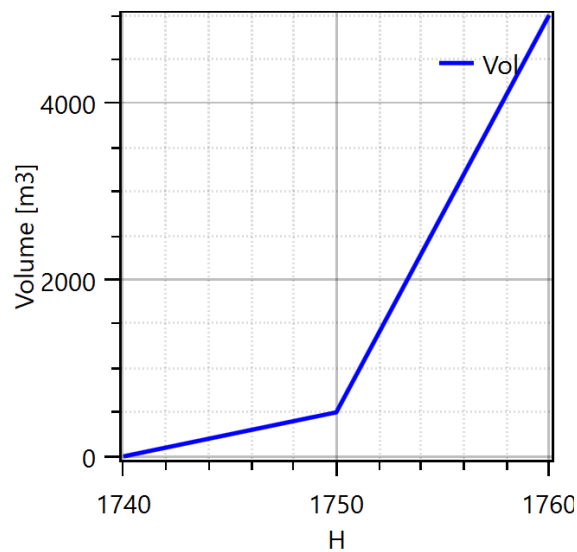


Hini = 1745.1 msm

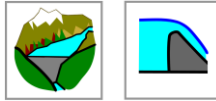


Réservoir « Ras. Tseppiet » :

Courbes H-V et H-Q

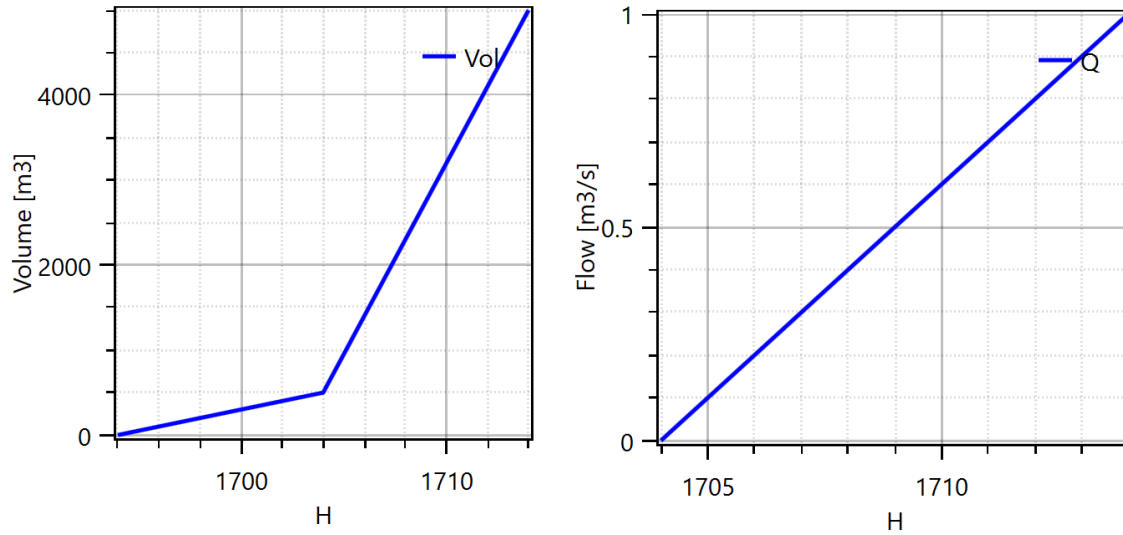


Hini = 1749 msm



Réservoir « Res. Moay » :

Courbes H-V et H-Q

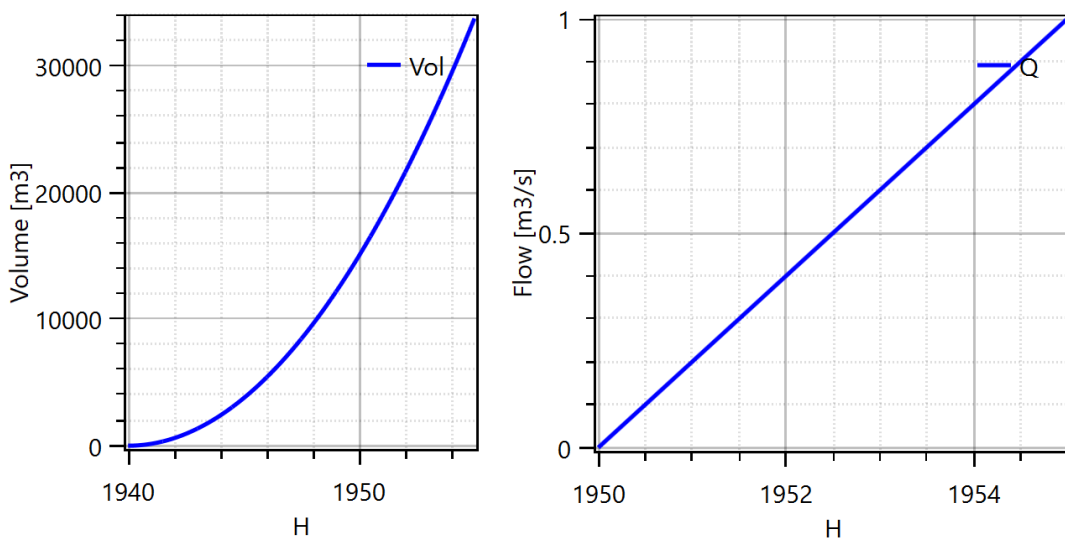


Hini = 1700 msm



Réservoir « Moneyeu » :

Courbes H-V et H-Q



Hini = 1950 msm

