

Filière Energie et techniques environnementales

Orientation Energies renouvelables

Travail de bachelor Diplôme 2022

Vincent Federici

*Analyse multicritère de sites d'implantation
de micro-turbines sur un réseau d'eau
potable*

- Professeur
Cécile Münch-Alligné
- Expert
Roman Duprey
- Date de la remise du rapport
19.08.2022

Ce rapport est l'original remis par l'étudiant.
Il n'a pas été corrigé et peut donc contenir des inexactitudes ou des erreurs.

Filière / Studiengang ETE	Année académique / Studienjahr 2021-22	No TB / Nr. BA ER/2022/44
Mandant / Auftraggeber <input type="checkbox"/> HES—SO Valais <input checked="" type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire <i>Partnerinstitution</i>	Etudiant / Student Vincent Federici Professeur / Dozent Cécile Münch-Alligné	Lieu d'exécution / Ausführungsort <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input checked="" type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire <i>Partnerinstitution</i>
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit <input type="checkbox"/> oui / ja <input checked="" type="checkbox"/> non / nein	Expert / Experte (données complètes) Roman DUPREY rd@bisasierre.ch Av. du Rothorn 10 - Case Postale 92 - 3960 Sierre	

Titre / Titel

**Analyse multicritère de sites d'implantations de micro-turbines
sur un réseau d'eau potable**

Description / Beschreibung

Afin d'estimer une liste de sites potentiels de micro-turbinage dans les réseaux urbains sur la région de Sierre, une méthode multicritère de sélection sera développée sur la base des données cartographiques existantes, d'informations prises au près d'exploitation et de visite sur site. Ce travail sera réalisé chez le partenaire industriel, le bureau BISA.

Objectifs / Ziele

- Définir le critère de sélection des installations recherchées (retour expérience, sites pilotes, biblio)
- Collecter les données cartographiques des réseaux d'eau et d'électricité dans une base de données sur plusieurs communes (5-6 à définir)
- Collecter des informations auprès des exploitants (position des brises énergie, des caractéristiques du réseau électrique, éventuellement visites...)
- Choisir et justifier une méthode multicritère (par ex AHP, plugin Qgis),
- Apprendre les bases de Qgis / Postgis
- Créer une analyse spatiale multicritères pour choisir les sites potentiels
- Chiffrer les potentiels des sites (kWh, éventuellement estimation sommaire des travaux).

Signature ou visa / Unterschrift oder Visum

Responsable de l'orientation /
Leiter der Vertiefungsrichtung:

Cécile Münch-Alligné
.....

¹ Etudiant / Student :

Vederici
.....

Délais / Termine

Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags:
16.05.2022Présentation intermédiaire / Zwischenpräsentation:
20-21.06.2022Remise du rapport final / Abgabe des Schlussberichts:
19.08.22, 12:00Expositions / Ausstellungen der Diplomarbeiten:
24-28.08.2022Défense orale / Mündliche Verfechtung:
Semaine/Woche 36 (5-9.09.2022)



Analyse multicritère de sites sur un réseau d'eau potable

Diplômant/e Vincent Federici

Objectif du projet

Développer une méthodologie afin d'obtenir une liste de sites potentiels de micro-turbinage sur les réseaux d'eau potable. Cette étude est réalisée sur les communes de Crans-Montana et d'Anniviers à l'aide d'une analyse multicritère.

Méthodes | Expériences | Résultats

L'analyse multicritère a été réalisée au moyen de la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process). Cette méthode utilise la comparaison par paires en utilisant les critères suivants : le prix de revient, l'énergie annuelle, la distance du site à un transformateur et la distance du site à une route d'accès.

Sur la commune de Crans-Montana, deux analyses ont été faites en prenant en compte soit uniquement les sites avec des courbes de débits classés soit également des sites sans mesure de débit. Le site des Briesses ressort en 1ère position dans les deux cas. Une analyse approfondie de ce site a permis d'estimer une production d'énergie de 64 MWh et un coût d'investissement de 97'500 CHF en considérant une subvention du projet de 50%. Avec une durée d'amortissement de 25 ans, un TRI de 4.5 %, une VAN de 17'400CHF et un retour sur investissement de 15 ans sont attendus.

Sur la commune d'Anniviers, une analyse a été faite en prenant en compte tous les sites potentiels. N'ayant aucune mesure de débit sur Anniviers, le classement donne un résultat indicatif. Les sites apparaissant dans les premières places devraient bénéficier de mesures de débits avant un possible approfondissement.

Travail de diplôme | édition 2022 |

Filière

*Energie et techniques
environnementales*

Domaine d'application

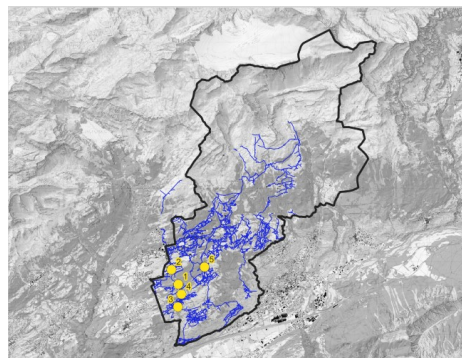
Energies renouvelables

Professeur responsable

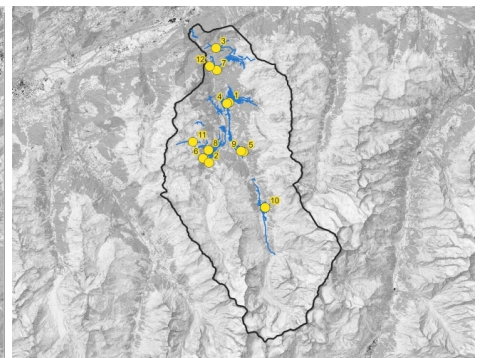
*Cécile Münch-Alligné
Cecile.muench@hevs.ch*

Partenaire

*BISA SA
Roman Duprey*



Carte des sites potentiels de la solution 1 sur la commune de Crans-Montana. La représentation spatiale a été réalisée avec le logiciel QGIS.



Carte des sites potentiels de l'analyse effectuée sur la commune d'Anniviers. La représentation spatiale a été réalisée avec le logiciel QGIS.

TABLE DES MATIERES

1.	Introduction.....	9
1.1.	Énergie en Suisse	9
1.2.	Objectifs.....	11
1.3.	Cahier des charges	11
1.4.	Planification du travail.....	11
2.	Etat de l'art	12
2.1.	Petite centrale hydraulique (PCH).....	12
2.1.1.	Production par les PCH	12
2.1.2.	Caractéristiques techniques d'une PCH.....	12
2.1.3.	Soutien au PCH	13
2.1.4.	Types d'installation d'une PCH sur le réseau d'eau potable.....	14
2.1.5.	Dimensionnement d'une PCH	16
2.1.6.	Calcul rapide du coût d'investissement d'une PCH.....	20
2.1.7.	VAN et prix de revient.....	22
2.1.8.	Exemple d'une PCH sur un réseau d'eau potable déjà existant	23
2.2.	Analyse multicritère	24
2.2.1.	Méthode des sommes pondérées et la multiplication de ratio	25
2.2.2.	Méthode multicritère du type ELECTRE-TRI	25
2.2.3.	Méthode AHP (Analytic Hierarchy Process).....	26
2.3.	Logiciel QGIS.....	28
3.	Méthodologie.....	29
4.	Choix de l'analyse multicritère	30
4.1.	Choix de la méthode.....	30
4.2.	Liste des critères utilisés	30
4.2.1.	Potentiel énergétique.....	31
4.2.2.	Prix de revient.....	32
4.2.3.	Distance au transformateur	32
4.2.4.	Accès	33
4.3.	Standardisation des critères	33
5.	Description des couches utilisées sur QGIS	34
5.1.	Couche Swissimage Hintergrund	34
5.2.	Couche limites communales.....	34
5.3.	Couches réseau d'eau.....	34
5.4.	Couche routes	35
5.5.	Couche transformateurs	35
5.6.	Couche MNT.....	35

5.7.	Couche sites potentiels	35
5.8.	Couche population.....	35
5.9.	Schéma source de données.....	35
6.	Application sur la commune de Crans-Montana	37
6.1.	Description de la commune	37
6.2.	Choix des sites potentiels.....	37
6.3.	Analyse multicritère	38
6.3.1.	Solution 1 : courbe des débits classés	38
6.3.2.	Solution 2 : courbes des débits classés et fictifs	41
6.4.	Analyse de sensibilité des critères	43
6.5.	Approfondissement du site 51 - Briesses R4020	45
6.5.1.	Pertes de charges.....	45
6.5.2.	Choix de la turbine.....	45
6.5.3.	Dimensionnement de la turbine.....	45
6.5.4.	Calcul de la production d'énergie	47
6.5.5.	Investissement et rentabilité	47
6.5.6.	Différence entre analyse multicritère et approfondissement	48
7.	Application sur la commune d'Anniviers	49
7.1.	Description de la commune	49
7.2.	Choix des sites potentiels.....	49
7.3.	Analyse multicritère	49
7.4.	Analyse sensibilité des critères	52
7.5.	Améliorations pour la commune d'Anniviers	53
8.	Conclusion.....	53
9.	Références	54
10.	Annexes	56
10.1.	Pertes dans une petites centrale hydraulique	56
10.2.	Explication fiche Excel rentabilité	57
10.3.	Différence entre calcul d'investissement empirique et fiche Excel.....	59
10.4.	Exemple AHP : Choix d'un leader	61
10.4.1.	Standardisation des alternatives à l'aide de la méthode de comparaison par paires... 61	
10.4.1.	Pondération des critères à l'aide de la méthode de comparaison par paires	64
10.4.2.	Classement final des alternatives	65
10.5.	Débit et calcul de l'énergie sans les courbes de débits classés	66
10.5.1.	Méthode du calcul du débit sur la population	66
10.5.2.	Méthode des mesures prises aux sources.....	66
10.5.3.	Méthode du débit fictif	66
10.5.4.	Conclusion	66
10.6.	Description et traitement des couches utilisées sur QGIS	67
10.6.1.	Couche Swissimage Hintergrund	67

10.6.2.	Couche limites communales.....	67
10.6.3.	Couche réservoirs selon les données DPE.....	68
10.6.4.	Couche réducteurs de pression.....	69
10.6.5.	Couche conduites d'eau	69
10.6.6.	Couche routes	70
10.6.7.	Couche transformateurs	71
10.6.8.	Importation des couches MNT de Crans Montana sur le logiciel QGIS.....	71
10.6.9.	Couche des sites potentiels.....	73
10.6.10.	Couche population.....	73
10.7.	Traitement des critères sur QGIS.....	75
10.7.1.	Critère Energie.....	75
10.7.2.	Critère Distance au Transformateur	75
10.7.3.	Critère Accès	75
10.8.	Schéma récapitulatif des données QGIS	76

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Production énergétique en Suisse pour l'année 2019. [1]	9
Figure 2: Centrale de Ryburg – Schwörstadt [3]	9
Figure 3: Barrage de Luzzone [5]	10
Figure 4: Barrage du Vieux-Emosson et d'Emosson [6]	10
Figure 5: Planning du travail	11
Figure 6: Schéma descriptif du turbinage dans un réseau d'eau potable	12
Figure 7: Turbinage entre 2 réservoirs [16]	14
Figure 8: Turbinage entre chambre de captage et réservoir [16]	14
Figure 9: Turbinage entre deux zones de pressions [16]	15
Figure 10: Turbinage sur les trop-pleins [16]	15
Figure 11: Coût d'investissement spécifique pour les centrales d'exploitation accessoires [11]	20
Figure 12: % des coûts d'investissement en fonction de la puissance de l'installation [11]	21
Figure 13: Centrale hydraulique de Mettental Sachseln [24]	23
Figure 14: Seuil de la problématique Electre-Tri [28]	25
Figure 15: Méthodologie du travail	29
Figure 16: Exemple fonction de standardisation	33
Figure 17: Schéma récapitulatif données QGIS	35
Figure 18: Aperçu de la commune de Crans-Montana et de son réseau d'eau	37
Figure 19: Emplacement des sites potentiels sur Crans-Montana (solution 1)	38
Figure 20: Sites potentiels avec couleurs en fonction du classement (solution 1)	40
Figure 21: Emplacement des sites potentiels sur Crans-Montana (solution 2)	41
Figure 22: Position des sites potentiels avec couleurs en fonction du classement (solution 2)	43
Figure 23: Dimensions caractéristiques d'un auget de turbine Pelton	46
Figure 24: Courbe des débits classés	47
Figure 25: Investissement pour le site 51- Briesses R4020	47
Figure 26: Aperçu de la commune d'Anniviers et de son réseau d'EP	49
Figure 27: Emplacement des sites potentiels sur Anniviers	50
Figure 28: Position des sites potentiels avec couleurs en fonction du classement	52
Figure 29: Pertes dans une PCH [34]	56
Figure 30: Graphique du coût d'investissement selon la puissance de l'installation [20]	59
Figure 31: Critères et alternatives de l'exemple [35]	61
Figure 32: Pondération et classement des alternatives selon les critères sur QGIS	65
Figure 33: Aperçu de la couche "SwissHintergrund" pour la commune de Crans-Montana	67
Figure 34: Exemple extraction données sur GeoPol.ch pour la commune de Crans-Montana	67
Figure 35: Aperçu couche limites communales pour Crans-Montana	68
Figure 37: Aperçu couche réservoirs pour la commune de Crans-Montana	68
Figure 38: Aperçu couche réducteurs de pression pour la commune de Crans-Montana	69
Figure 39: Aperçu de la couche conduites d'eau	70

Figure 40: Aperçu couche routes sur la commune de Crans-Montana	70
Figure 41: Aperçu couche transformateurs sur la commune de Crans-Montana	71
Figure 42: Index Suisse des couches d'altimétrie sur Crans-Montana	72
Figure 43: Raster virtuel sur la commune de Crans-Montana	72
Figure 44: Aperçu sites potentiels pour la commune de Crans-Montana	73
Figure 45: Aperçu de la couche population pour la commune de Crans-Montana.....	74
Figure 46: Schéma récapitulatif données QGIS.....	76

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Objectif 2050 production hydraulique [9].....	10
Tableau 2: Caractéristiques des différentes turbines [16].....	15
Tableau 3: Hauteur de sable équivalente [17].....	17
Tableau 4: Formules dimensionnement turbine Pelton.....	19
Tableau 5: Les problématiques de références extraites de [27].....	24
Tableau 6: Echelle de comparaison par paires [27].....	26
Tableau 7: Matrice de Saaty.....	26
Tableau 8: Tableau récapitulatif de l'indice aléatoire [27].....	28
Tableau 9: Récapitulatif des sites potentiels choisis (solution 1).....	38
Tableau 10: Résumé standardisation des critères (solution 1).....	39
Tableau 11: Comparaison par paires dans matrice de Saaty.....	39
Tableau 12: Pondération des critères de l'analyse.....	39
Tableau 13: Classement final de l'analyse (solution 1).....	40
Tableau 14: Récapitulatif des sites potentiels choisis (solution 2).....	41
Tableau 15: Résumé standardisation des critères (solution 2).....	42
Tableau 16: Classement final de l'analyse (solution 2).....	42
Tableau 17: Matrice 1.....	44
Tableau 18: Matrice 2.....	44
Tableau 19: Matrice 3.....	44
Tableau 20: Matrice 4.....	44
Tableau 21: Classement des différentes matrices.....	45
Tableau 22: Résumé des conduites.....	45
Tableau 23: Résultats pertes de charges.....	45
Tableau 24: Tableau de dimensionnement de la turbine.....	46
Tableau 25: Dimension des augets selon le nombre d'injecteurs.....	46
Tableau 26: Tableau rentabilité site 51 - Briesses R4020.....	48
Tableau 27: Différence entre estimation et approfondissement.....	48
Tableau 28: Récapitulatif des sites potentiels choisis.....	50
Tableau 29: Résumé standardisation des critères.....	51
Tableau 30: Classement final de l'analyse.....	51
Tableau 31: Classement des différentes matrices.....	52
Tableau 32: Fiche Excel rentabilité [19].....	57
Tableau 33: Frais de fonctionnement en fonction du coup d'investissement [11].....	57
Tableau 34: Exemple formules TRI et VAN sur 20 ans sur Excel.....	58
Tableau 35: Coût d'investissement selon la formule empirique pour les sites de Crans-Montana.....	59
Tableau 36: Configuration de la fiche pour le test des sites potentiels [19].....	60
Tableau 37: Ecart entre formule empirique et fiche Excel.....	60

Tableau 38: Comparaison par paires du critère expérience	61
Tableau 39: Matrice normalisée pour le critère expérience	62
Tableau 40: Standardisation des alternatives pour le critère expérience	62
Tableau 41: Résultat des vecteurs Ws et C pour le critère expérience	63
Tableau 42: Standardisation des alternatives pour le critère éducation	63
Tableau 43: Standardisation des alternatives pour le critère charisme	64
Tableau 44: Standardisation des alternatives pour le critère âge	64
Tableau 45: Pondération des critères selon l'objectif	64
Tableau 46: Classement des alternatives	65
Tableau 47: Classement des alternatives sur Wikipédia [35]	65
Tableau 48: Ecart entre résultats Excel, Wikipédia et extension QGIS	65

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Terme	Description
A	Commune d'Anniviers
AHP	Analytic Hierarchy Process (Processus d'Analyse Hiérarchique)
BT	Basse tension
CI	Contribution d'investissement
CM	Commune de Crans-Montana
EP	Eau potable
FFS	Financement des frais supplémentaires
HT	Haute tension
OFEN	Office fédéral de l'énergie
PCH	Petite centrale hydraulique
RPC	Rétribution à prix coûtant
SRI	Rétribution à l'injection
TRI	Taux de retour sur investissement
VAN	Valeur actuelle nette

Remerciements

J'aimerais remercier toutes les personnes qui ont participé à la réalisation de ce travail.

Mme Cécile Münch-Alligné, Professeure à la HES-SO Valais, pour sa disponibilité et son suivi durant toute la période de ce travail ainsi que pour les réponses apportées aux questions techniques.

M. Jean Decaix, Adjoint scientifique à la HES-SO Valais, pour son suivi, sa disponibilité et ses précieux conseils lors de ce projet. Merci également pour son accompagnement lors des séances avec les fontainiers.

M. Roman Duprey, Bureau BISA, pour ses explications et sa collaboration lors de ce projet.

M. José Zufferey, Bureau ORSIVA, pour son aide sur la récolte de données sur la commune d'Anniviers.

M. Dominique Barmaz, Fontainier de la commune d'Anniviers, pour les informations données sur le réseau d'eau.

M. Louis Berclaz, Fontainier de la commune de Crans-Montana, pour les informations données sur le réseau d'eau.

Mme Line Moret, Diplômante à la HES- SO Valais, pour l'entraide quotidienne durant ces 14 semaines.

Je souhaite aussi remercier mes camarades de classe, mes amis et ma famille qui m'ont soutenu durant cette période de travail de diplôme.

1. Introduction

1.1. Énergie en Suisse

Les statistiques de production d'électricité en Suisse de 2019 (dernière année avant le Covid) montrent que la production totale s'élève à 68 milliards de kWh, dont 56.4% est issue des centrales hydroélectriques. Elles sont la principale source de production d'électricité du pays et un des moyens qui s'adaptent le mieux aux besoins. Les diverses centrales se répartissent entre la petite (puissance installée inférieure à 10 MW) et la grande (puissance installée supérieure à 10MW) hydraulique. Les cantons qui participent le plus à la production hydraulique sont le Valais, les Grisons, le Tessin et Uri [1].

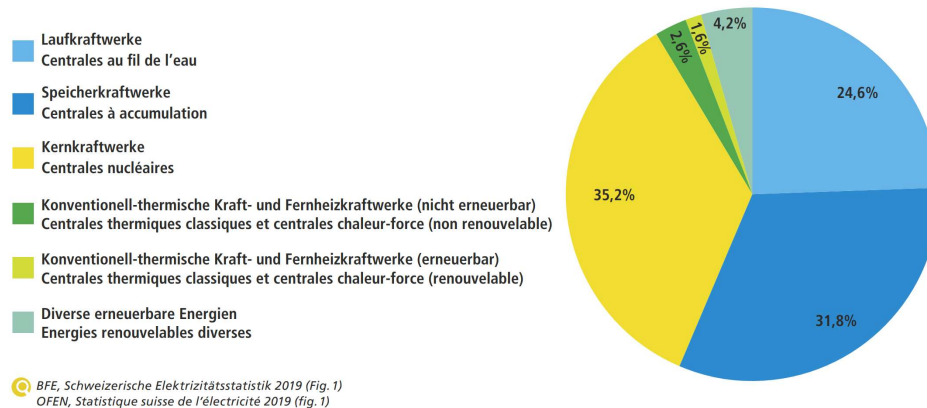


Figure 1: Production énergétique en Suisse pour l'année 2019. [1]

La grande hydraulique est composée principalement de :

- Centrales au fil de l'eau comme la centrale de Ryburg – Schwörstadt en Argovie

Cette centrale a été construite en 1930 et se situe sur le Rhin. Elle possède 4 turbines Kaplan ayant chacune une puissance de 30 MW. Sa production annuelle est de 705 GWh [2].



Figure 2: Centrale de Ryburg – Schwörstadt [3]

- Centrales à accumulation comme la centrale de Blenio au Tessin

Cette centrale est entrée en service entre 1959 et 1963 selon le groupe Alpiq. Elle possède :

- 1 turbine Francis à Luzzzone
- 2 turbines Pelton à Olivone
- 4 turbines Pelton à Biasca

Sa puissance totale est de 400 MW et sa production annuelle est de 835 GWh [4].



Figure 3: Barrage de Luzzone [5]

- Centrales de pompage-turbinage comme la centrale de Nant de Drance en Valais.
 Cette centrale a été mise en service en 2022. Elle possède 6 turbines Francis de 150 MW pour une production annuelle d'environ 2 500 GWh [6] [7].

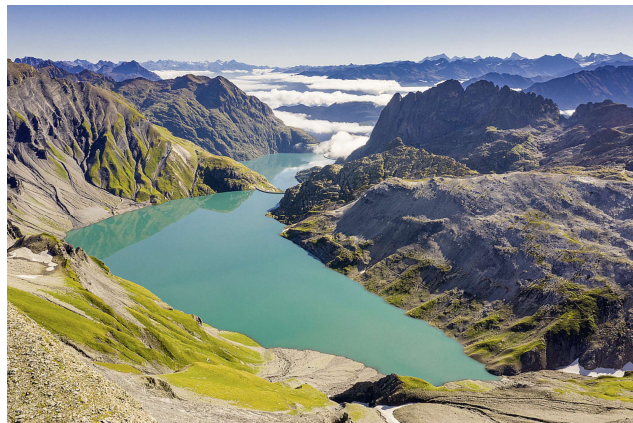


Figure 4: Barrage du Vieux-Emosson et d'Emosson [6]

La petite hydraulique est quant à elle beaucoup plus variée, grâce au turbinage de :

- L'eau d'irrigation
- Des eaux usées
- De l'eau potable
- Des cours d'eau
- Des canons à neige

La stratégie 2050 vise à augmenter d'environ 1.5 TWh la production hydroélectrique en Suisse [8]. Ce potentiel se trouve en partie dans la petite hydraulique, car elle a des impacts négligeables sur l'environnement et les coûts peuvent être diminués du fait d'installations déjà existantes. C'est le cas pour une installation de turbinage sur un réseau d'eau potable ou sur des eaux usées. Dans le Tableau 1, on peut voir les objectifs 2050 pour l'hydraulique et les autres énergies renouvelables [9].

En GWh	Production actuelle	Objectif 2035	Objectif 2050
Hydraulique (grosse et petite)	Env. 36'750 ⁵	Au moins 37'400	Au moins 38'600
Energies renouvelables (sans l'hydraulique)	Env. 2'708	Au moins 11'500	Au moins 24'200

Tableau 1: Objectif 2050 production hydraulique [9]

Il est peu probable que cet objectif 2050 soit atteint, si les conditions cadres du turbinage de l'eau ne changent pas comme par exemple les mesures prises sur les débits résiduels [9]. C'est pour cette raison qu'il faut continuer à encourager les PCH pour qu'elles s'étendent sur les réseaux d'eau potable, d'eaux usées et d'irrigation.

1.2. Objectifs

Le but de ce projet est de développer une méthodologie, afin d'avoir une liste de sites potentiels de micro-turbinage sur les réseaux d'eau potable. Cette étude se fera sur plusieurs communes à commencer par celle de Crans-Montana. Pour cela, une recherche de plusieurs critères puis une analyse multicritère seront menées à l'aide de données cartographiques existantes.

1.3. Cahier des charges

Les étapes suivantes ont été fixées :

- Définir les critères de sélection des installations recherchées
- Collecter les données cartographiques des réseaux d'eau et d'électricité dans une base de données de plusieurs communes
- Collecter des informations auprès des exploitants
- Choisir et justifier une méthode multicritère
- Apprendre les bases de QGIS
- Créer une analyse spatiale multicritère pour choisir les sites potentiels
- Chiffrer les potentiels des sites (au niveau des kWh et éventuellement une estimation des travaux)

1.4. Planification du travail

PLANNING		Mai			Juin			Juillet			Août				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
TACHES															
Gestion	Travail de Bachelor														
	Présentation intermédiaire														
	Rédaction Rapport														
	Libre														
Documentation	Turbinage eau potable														
	Tutoriel QGIS														
	Analyse multicritère														
Méthodologie	Définir les critères de sélection des installations recherchées														
	Essai QGIS avec données fictives														
	Choisir et justifier une méthode multicritère (par ex AHP, plugin Qgis)														
Réalisation	Collecter les données cartographiques des réseaux d'eau et d'électricité CM														
	Traitement des données pour implémentation QGIS CM														
	Créer une analyse spatiale multicritère pour choisir les sites potentiels CM														
	Collecter les données cartographiques des réseaux d'eau et d'électricité A														
	Traitement des données pour implémentation QGIS A														
Synthèse	Créer une analyse spatiale multicritère pour choisir les sites potentiels A														
	Chiffrer les potentiels des sites														
	Discussion des résultats														

M1 Choix des critères utilisés pour l'étude
M2 Fin de la collecte des données pour Crans-Montana
M3 Fin du traitement des données pour Crans-Montana

Figure 5: Planning du travail

2. Etat de l'art

2.1. Petite centrale hydraulique (PCH)

2.1.1. Production par les PCH

En Suisse une centrale hydraulique est considérée comme une PCH, lorsque sa puissance moyenne n'excède pas les 10 MW. En 2019 leur nombre a été évalué à 1'400 installations pour une puissance installée totale d'environ 980 MW et une production annuelle d'environ 4'000 GWh [9].

Elles sont des sources d'énergie locale et renouvelable pour les communes et peuvent être installées sur plusieurs sources d'eau, que ce soit une rivière, un réseau d'évacuation des eaux usées ou un réseau d'eau potable. Ces installations se distinguent surtout des grandes installations hydrauliques par leur prix peu coûteux, ainsi que par leur capacité à fonctionner avec un minimum de surveillance.

Pour l'installation d'une PCH, il faut prendre en compte la protection de la nature et plus particulièrement la législation sur les cours d'eaux contre la pollution de la nature et des sites ainsi que s'assurer des débits minimaux légaux.

2.1.2. Caractéristiques techniques d'une PCH

Ce chapitre va se concentrer sur les PCH installées sur les réseaux d'eau potable et commencer par une description des principaux composants se trouvant sur le schéma explicatif de la Figure 6.

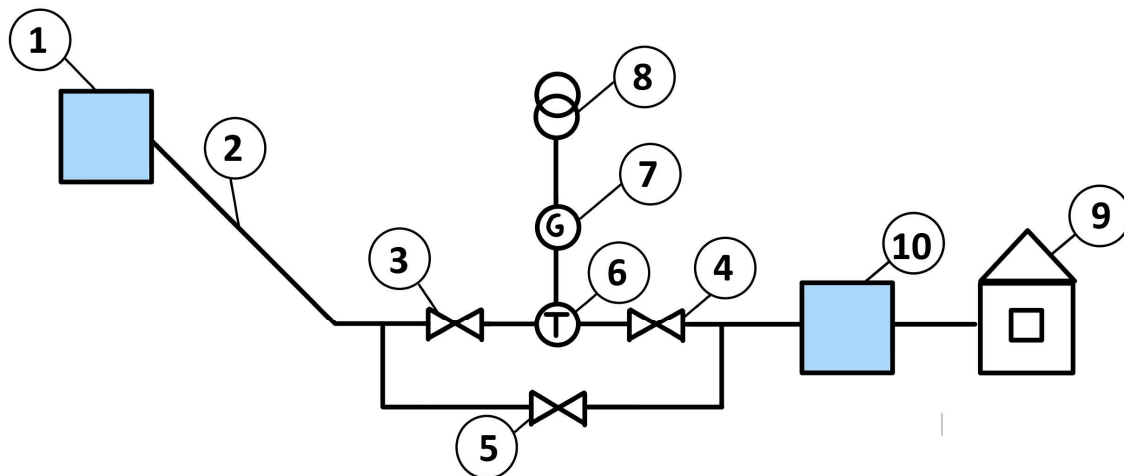


Figure 6: Schéma descriptif du turbinage dans un réseau d'eau potable

1. Réservoir d'eau : Il permet de maintenir un niveau de pression constant dans le réseau.
2. Conduite forcée : Les conduites forcées utilisées pour l'eau potable sont des conduites standard disponibles sur le marché. Leur matière va changer en fonction de la chute et donc de la pression que la conduite doit supporter. Il faut prendre en compte cette matière ainsi que la rugosité de l'état de surface de la conduite pour calculer les pertes de charges.
3. Vanne de garde : Une vanne de garde doit être installée afin de pouvoir protéger la turbine en cas de problème ou de maintenance. Son temps de fermeture doit être réglé afin de ne pas subir de coup de bélier direct.
4. Vanne de maintenance : Cette vanne permet d'isoler complètement la turbine
5. Vanne réductrice de pression et By-Pass : Elle permet de court-circuiter la turbine en cas de problème ou de débit non fonctionnel et de maintenir de manière sûre l'approvisionnement en eau de la commune. Elle permet aussi de réduire la pression en freinant l'écoulement à l'aide du phénomène de perte de charge. Ce qui permet de ne pas dépasser la pression maximale admise. Si le réseau possède des redondances et peut approvisionner tous les consommateurs même avec un arrêt de la turbine, alors le By-Pass est facultatif.

6. Turbine : La turbine permet de transformer de l'énergie hydraulique en énergie mécanique avec un certain rendement. Son type est choisi en fonction de sa chute et de son débit d'équipement. Le débit du réseau peut fortement varier puisqu'il se calque sur la demande en eau potable. Elle remplace également le réducteur de pression sur sa partie du circuit excepté lorsque le débit est nul. Dans ce cas, seul le réducteur peut assurer la réduction de pression. <
7. Génératrice : La génératrice va transformer de l'énergie mécanique en énergie électrique avec un certain rendement.
8. Transformateur : Le transformateur va permettre de passer de la Basse Tension (BT) fournie par la génératrice à de la Haute ou Moyenne Tension (HT et MT) pouvant être reliée au réseau Suisse.
9. Consommateurs : L'eau potable continue sa mission principale, c'est-à-dire fournir en eau potable les habitants de la commune.
10. Réservoir tampon : Il permet à la conduite de rester sous-pression et de contrôler le niveau de pression dans le réseau de distribution.

Pour une installation il faut s'assurer que l'eau ne sera pas polluée par un composant du système comme de l'huile. Le matériel utilisé est spécifique et utilise des joints et composants spéciaux comme pour des machines travaillant dans l'alimentaire.

Il est également important de connaître les points importants permettant de choisir un lieu de turbinage adéquat. Pour cela il faut analyser la topographie du site afin de dire si une construction peut avoir lieu à cet endroit. Si des installations techniques existent déjà, il faut aussi évaluer le potentiel énergétique du site en fonction de sa chute et de son débit. Réfléchir au matériel à installer, aux impacts possibles sur l'environnement et évaluer le prix du projet ainsi que sa rentabilité.

2.1.3. Soutien au PCH

La production d'énergie hydraulique en Suisse est très répandue. Cela est dû aux subventions qui ont permis aux centrales d'être rentables et donc de se développer. Fin 2022, il n'y aura plus de subventions pour les centrales se classant dans la petite hydraulique. Une subvention à la contribution d'investissement semblable à celle des panneaux solaires est actuellement en phase de discussion.

Les subventions existantes ou ayant existé sont les suivantes :

- FFS (Financement des Frais Supplémentaires) : Ce système est le modèle de subvention venant avant la RPC et est géré par Pronovo. Il consiste à racheter l'énergie pour un montant moyen de 15 ct/kWh ou 16 ct/kWh. Pronovo paye donc la différence entre le prix du marché et le montant moyen. Ce système a été remplacé en 2009, mais les installations sous contrat de cette rétribution continuent à toucher cette subvention jusqu'au maximum fin 2035 [10].
- RPC (Rétribution à Prix Coûtant) : Ce système a été introduit en 2009 et est géré par Swissgrid. Le prix de rachat est composé d'un forfait de base établi en fonction de la puissance et est périodiquement adapté par l'OFEN. En 2016, la rétribution maximale était de 38 ct/kWh. Depuis 2018, il est intégré à la SRI [11].
- SRI (Système de Rétribution à l'Injection) : Ce système a été introduit en 2018 et est géré par Pronovo. Il prend fin en 2022. Les centrales entre 1 et 10 MW y sont éligibles. La rétribution se compose du prix du marché de l'électricité ainsi que de la prime d'injection [12].

Le développement de la petite hydraulique en Suisse s'est donc fait à travers ces 3 subventions, qui ont chacune à leur manière encouragé les énergies renouvelables.

Dès janvier 2023, une initiative a été acceptée pour continuer à promouvoir les énergies renouvelables en attendant qu'un nouveau modèle de rétribution soit mis en place. Elle consiste à faire bénéficier aux installations entre 1 et 10 MW d'une contribution d'investissement (CI) d'au maximum 50% lors de l'installation de la centrale [12]. Pour les centrales en dessous de 1 MW, des exceptions sont prévues pour les installations liées au réseau d'eau potable selon l'article 9 de l'Ordonnance sur l'encouragement de la production d'électricité issue d'énergies renouvelables [13].

2.1.4. Types d'installation d'une PCH sur le réseau d'eau potable

Une installation de turbinage de l'eau potable est une des solutions les plus avantageuses, car elle permet de produire de l'énergie renouvelable tout en économisant une grande partie de l'installation puisque son utilité première est l'approvisionnement en eau. Elle a donc un impact moindre sur l'environnement, car le réseau d'eau potable est déjà construit. D'un point de vue financier, elle doit couvrir uniquement les frais supplémentaires liés à son installation. La source d'eau doit également déjà être présente, car la priorité est à l'eau potable et finalement les équipements ont une durée de vie qui se situe au-delà de 40 ans, ce qui permet d'avoir une durée de vie se rapprochant des conduites d'eau [14]. Pour qu'un projet soit faisable, il est recommandé d'avoir un débit d'eau minimum 10 l/s et une chute d'au moins 100 m. Si le débit est plus élevé, alors la chute peut être abaissée [15].

Il y a 4 lieux possibles pour l'installations d'une turbine [16] :

- Entre deux réservoirs : Il est possible de jouer sur la différence d'altitude entre deux réservoirs pour turbiner et produire de l'énergie.

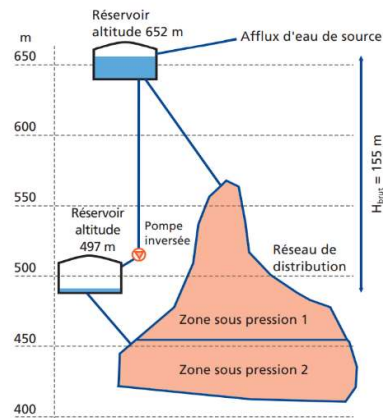


Figure 7: Turbinage entre 2 réservoirs [16]

- Entre une chambre de captage et un réservoir : Si la conduite supporte la pression de turbinage, alors il est possible de remplacer la vanne de réduction de pression avec une turbine.

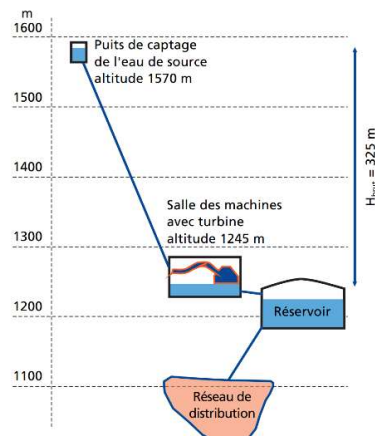


Figure 8: Turbinage entre chambre de captage et réservoir [16]

- Entre deux zones de pression : Il est possible de jouer sur la différence de pression entre deux zones du réseau d'eau potable qui sont en général équipées d'un réducteur de pression. Ceci se fait en remplaçant le réducteur de pression par une turbine. Il faut cependant assurer la pression nécessaire en aval de la turbine.

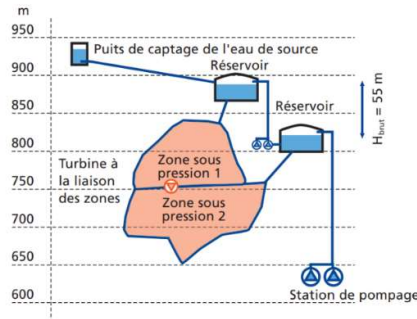


Figure 9: Turbinage entre deux zones de pressions [16]

- Sur les trop pleins : S'il y a une trop grande quantité d'eau par rapport à la demande de la commune, il est possible d'installer une turbine sur la conduite restituant l'eau à un cours d'eau.

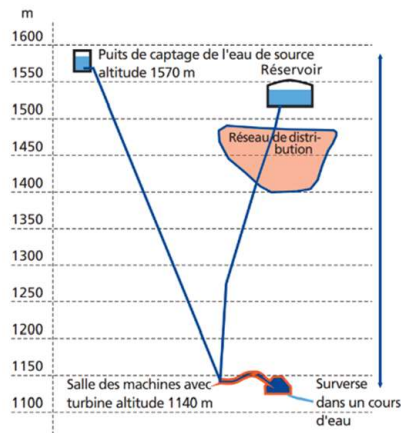


Figure 10: Turbinage sur les trop-pleins [16]

Les turbines ont un fonctionnement optimal en fonction de la chute et du débit. Le Tableau 2 résume les caractéristiques des turbines.

Type de turbine	Domaine de fonctionnement				
	Rendement [%]	Hauteur de chute [m]	Débits [l/s]	Comportement face à la variabilité des débits	Investissement
Pelton	84 à 92	80 à 600	10 à 1200	Très bonne	Elevé
Francis	84 à 90	5 à 100	100 à 10 000	Bonne	Très élevé
Axiale à pales de roue et distributeur mobiles	84 à 92	2 à 30	900	Bonne	Très élevé
Flux traversant	78 à 84	5 à 80	200 à 10 000	Moyenne	Faible à moyen
Pompe inversée	75 à 90	15 à 250	10 à 400	Très mauvais	Faible
Pelton à contre-pression	84 à 90	80 à 600	10 à 1'200	Très bonne	Elevé
Pompe fonctionnant en turbine avec réglage du débit	75 à 88	10 à 100	20 à 500	Moyenne à bonne	Moyen

Tableau 2: Caractéristiques des différentes turbines [16]

2.1.5. Dimensionnement d'une PCH

Pour avoir une meilleure idée du potentiel et de la rentabilité d'un site, un dimensionnement peut être effectué. Les points suivants vont être discutés :

- Perte de charge dans la conduite forcée
- Calcul de la chute nette et rendement de la conduite
- Choix de la turbine
- Dimensionnement de la turbine
- Calcul de la production d'énergie
- Investissement et rentabilité

Perte de charge dans la conduite forcée

Pour calculer les pertes d'énergie dans une conduite, les données et calculs suivants sont nécessaires.

- Calcul de la vitesse moyenne de l'écoulement :

$$C = \frac{Q_e}{A} \quad \text{Equation 1}$$

Avec:

C = Vitesse moyenne de l'écoulement [$\frac{m}{s}$]

Q_e = Débit d'équipement [$\frac{m^3}{s}$]

A = Section de la conduite [m^2]

- Calcul du nombre de Reynolds afin de connaître le régime d'écoulement dans la conduite. Si $Re > 2300$ alors l'écoulement est turbulent, sinon il est laminaire.

$$Re = \frac{\rho \cdot C \cdot D_h}{\mu} \quad \text{Equation 2}$$

Avec:

Re = Nombre de Reynolds [-]

ρ = Masse volumique [$\frac{kg}{m^3}$] $\rightarrow 997$ [$\frac{kg}{m^3}$] pour de l'eau

D_h = Diamètre hydraulique de la conduite [m]

μ = Viscosité dynamique [$\frac{N \cdot s}{m^2}$] $\rightarrow 0.001$ [$\frac{N \cdot s}{m^2}$] pour de l'eau

Les pertes de charges singulières ne sont pas prises en compte, car elles sont en général faibles par rapport aux pertes de charges régulières.

Pour les pertes de charges régulières, il faut déterminer le coefficient de perte de charges λ . Cela se fait à l'aide de la formule de Colebrook.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + 0,27 \cdot Rv \right) \quad \text{Equation 3}$$

Avec:

Rv = Rugosité relative [-]

λ = Coefficient de pertes de charges [-]

La formule de Colebrook se base sur le nombre de Reynolds et la hauteur de sable équivalente.

La formule de la rugosité relative est la suivante :

$$Rv = \frac{D_h}{k} \quad \text{Equation 4}$$

Avec: k = Hauteur de sable équivalente [m]

Les principales valeurs de hauteur de sable équivalente sont notées dans le Tableau 3. Cependant, il faut noter que celles-ci peuvent varier selon le vieillissement de la conduite.

Tuyau	Rohrart	Etat	Zustand	K [mm]
Etiré ou extrudé, en cuivre, laiton, bronze, aluminium, verre, plastique		neuf, techniquement lisse		0,0013
Caoutchouc		neuf, techniquement lisse		0,0016
Fonte		Neuf		0,4
		légèrement rouillé	<i>angerostet</i>	1,3
		très rouillé	<i>stark verrostet</i>	3,3
Acier		neuf, sans soudure	neuf, soudure	0,04
		axiale		0,07
		légèrement rouillé		0,3
		très rouillé		3
Béton		Lisse		0,6
		moyen		1,5

Tableau 3: Hauteur de sable équivalente [17]

Calcul des pertes de charges régulières :

$$\Delta H_r = \lambda \cdot \frac{L_c}{D_h} \cdot \frac{C^2}{2 \cdot g} \quad \text{Equation 5}$$

Avec:

ΔH_r = Pertes de charges linéaires [m]

L_c = Longueur de la conduite [m]

Calcul de la chute nette et rendement

La chute nette se calcule avec la formule suivante :

$$H_n = H_b - \Delta H_r \quad \text{Equation 6}$$

Avec:

H_n = Chutte nette [m]

H_b = Chutte brute [m]

Le rendement de la conduite peut donc être calculé :

$$\eta_c = \frac{H_n}{H_b} \cdot 100 \quad \text{Equation 7}$$

Avec:

η_c = Rendement de la conduite [%]

Choix de la turbine

Le Tableau 2 vu précédemment permet de choisir le type de turbine le plus propice à la situation du site. Il prend en compte la chute nette ainsi que le débit d'équipement.

Dimensionnement de la turbine

Il faut commencer par déterminer la vitesse de rotation de l'installation. La machine hydraulique est couplée à une machine électrique. C'est cette machine qui va imposer la vitesse de rotation en fonction du nombre de ses pôles. La formule est la suivante :

$$n' = \frac{f \cdot 60}{z_p} \quad \text{Equation 8}$$

Avec:

n' = vitesse de rotation [rpm]

f = fréquence du réseau [Hz] → En Suisse: 50 Hz

z_p = Nombre de paires de pôles [-]

Pour une turbine Pelton, la vitesse de rotation doit être choisie de sorte à avoir une vitesse spécifique se situant entre 0.025 et 0.125.

Voici la formule de la vitesse spécifique :

$$v = n \cdot \frac{\sqrt{Q_e}}{(2 \cdot g \cdot H_n)^{3/4}} \cdot 2 \cdot \sqrt{\pi} \quad \text{Equation 9}$$

Avec:

v = Vitesse spécifique [-]

n = Vitesse de rotation $\left[\frac{tr}{s}\right]$

Q_e = Débit d'équipement $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

H_n = Chute nette [m]

Le nombre d'injecteurs doit être choisi de sorte que la vitesse spécifique reste entre les valeurs suivantes :

$$0.005 \cdot Z_0^{0.5} \leq 0.474 \cdot v \leq 0,025 \cdot z_0^{0.5}$$

Avec:

v = Vitesse spécifique [-]

Z_0 = Nombre d'injecteurs [-]

Les calculs suivants permettent de dimensionner la turbine Pelton :

Vitesse théorique du jet	$C_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}$
Vitesse d'entraînement	$U_1 = 0.45 \cdot \frac{C_0}{2}$
Vitesse réelle du jet	$C_2 = 0.98 \cdot C_0$
Rayon du jet R2	$R_2 = \frac{Q_e}{C_2 \cdot \pi}$
Vitesse de rotation en rad/s	$w = n' \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60}$
Rayon de la roue R1	$R_1 = \frac{U_1}{w}$
Nombre d'augets	$z_b = 0.5 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 15$

Tableau 4: Formules dimensionnement turbine Pelton

Calcul de la production d'énergie

Le calcul de l'énergie se fait à l'aide de la courbe des débits classés journaliers et doit prendre en compte les pertes dans :

- La turbine
- La génératrice
- Le changement de la chute nette en fonction du débit

L'Annexe 10.1 résume les différentes pertes à prendre en compte.

$$P_{elec} = P_h \cdot \eta_T \cdot \eta_G$$

Equation 10

Avec:

P_{elec} = Puissance électrique [kW]

P_h = Puissance hydraulique [kW]

η_T = rendement turbine [%]

η_G = rendement génératrice [%]

L'énergie se calcule à l'aide des débits classés faits précédemment, la chute nette en fonction du débit et la puissance électrique.

Le calcul de la chute nette en fonction du débit se fait de la manière suivante [18] :

$$\Delta H_r = \frac{\lambda \cdot L_c \cdot 8}{D_h^5 \cdot g \cdot \pi^2} \cdot Q_e$$

Equation 11

Investissement et rentabilité

L'investissement se base sur le cours de rentabilité des machines hydrauliques où les prix suivants sont pris en compte [19] :

- Prix de la conduite forcée
- Prix de la prise d'eau
- Prix de la vanne de maintenance
- Prix du local
- Prix de la turbine
- Prix de la vanne de garde
- Prix de la connexion au réseau
- Prix du transport et du montage

La nouvelle subvention sur les PCH devrait entrer en vigueur en début d'année 2023. Elle consiste en une contribution d'investissement (CI) de 50% maximum. Il faut donc la prendre en compte dans l'investissement final. Une CI de 50% est estimée pour cette analyse.

Pour la rentabilité, il faut prendre en compte les coûts de maintenance par année. Le prix de revient, le TRI (Taux de Rentabilité Interne), la VAN (Valeur Actuelle Nette) et le retour sur investissement seront calculés en considérant une durée d'amortissement de 25 ans. Une fiche Excel du cours d'aménagement hydraulique est utilisée pour cela [19].

L'annexe 10.2 explique le fonctionnement de la fiche de calculs.

2.1.6. Calcul rapide du coût d'investissement d'une PCH

1^{ère} méthode

Le graphique ci-dessous (Figure 11) montre le prix du kW en fonction de la puissance installée. Cela va permettre de calculer le coût d'investissement d'une installation.

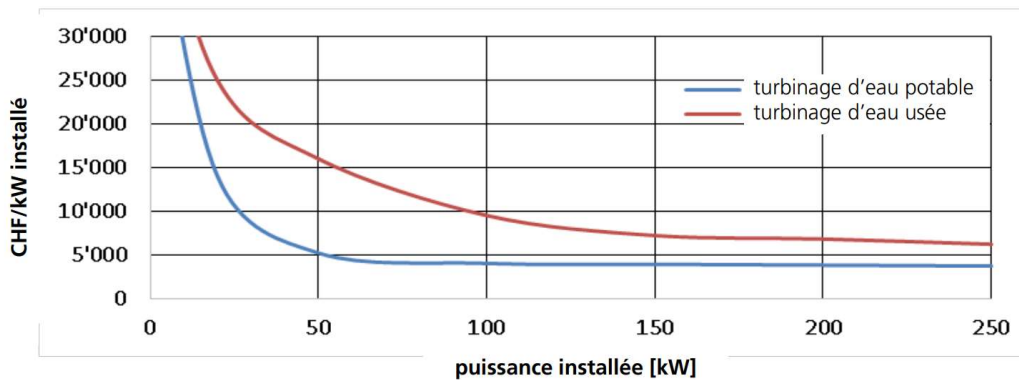


Figure 11: Coût d'investissement spécifique pour les centrales d'exploitation accessoires [11]

La Figure 12 permet de connaître les frais de fonctionnement en fonction du coût d'investissement. Il est donc possible d'évaluer le coût d'exploitation et le coût de maintenance.

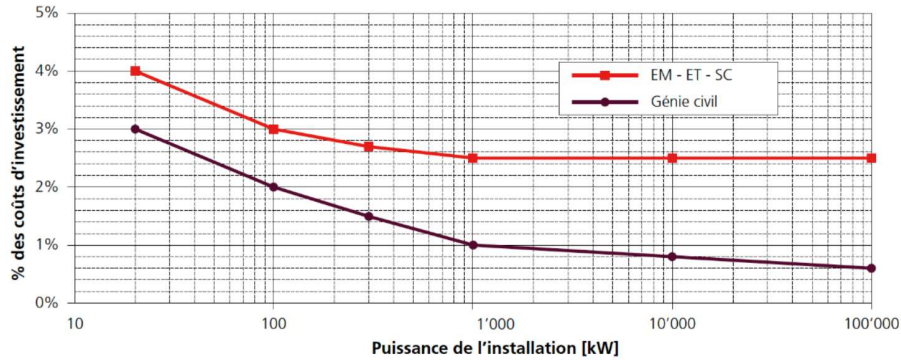


Figure 12: % des coûts d'investissement en fonction de la puissance de l'installation [11]

Il faut considérer que plus la hauteur de chute est faible et plus les coûts de production spécifique par kW installé sont élevés. Cependant si la hauteur de chute est trop élevée et dépasse la pression admise par la conduite, il faut la remplacer par une conduite forcée spécifique et donc le prix sera également élevé.

2^{ème} méthode :

Les tableaux d'investissements (Figure 11 et Figure 12) donnent des prix trop élevés pour les puissances trop basses. Elles se situent sur la partie de la courbe avec une pente élevée C'est pourquoi la 2^{ème} méthode va être utilisée pour donner une estimation du prix de chaque site potentiel. Les coûts de l'investissement, de la maintenance et de l'exploitation sont calculés à l'aide des formules empiriques suivantes [20].

$$C = 10^3 \cdot (34,12 + 16,99 \cdot P^{0,91} \cdot H_n^{-0,14}) \quad \text{Equation 12}$$

Avec:

C = Coût d'investissement [CHF]

P = Puissance électrique de l'installation [kW]

H_n = Chute nette [m]

$$e = 900 \cdot P^{0,6} \quad \text{Equation 13}$$

Avec:

e = Coût de maintenance et exploitation [CHF]

P = Puissance électrique de l'installation [kW]

L'annexe 10.3 compare les formules empiriques avec la fiche Excel d'estimation du coût d'investissement du cours d'hydraulique [19].

Lorsqu'un site potentiel remplace plusieurs réducteurs de pression, alors un supplément du prix de la conduite devra être pris en compte. Un malus de 85 CHF/m de conduite est ajouté selon une moyenne des prix du catalogue de tuyaux Vonroll – hydro [21].

2.1.7. VAN et prix de revient

Afin de connaître la VAN (valeur actuelle nette) de l'installation à l'année 0, la formule suivante est utilisée [22] :

$$VAN = \text{Revenu} - (\text{Coût d'investissement} + \text{Coût d'exploitation} + \text{Coût de maintenance}) \quad \text{Equation 14}$$

Les coûts d'investissement considèrent les parties suivantes :

- La construction de l'installation (partie génie civil)
- Le coût de la conduite forcée
- Le coût de la turbine
- Le coût de la partie électromécanique

Pour connaître la VAN sur un certain nombre d'années, il faut actualiser les prix de la manière suivante [23] :

$$VAN = \sum_{j=0}^n \frac{C_j}{(1+a)^j} \quad \text{Equation 15}$$

Avec:

$C_j = \text{Revenu} - \text{coût d'exploitation et maintenance de l'année } j \text{ [CHF]}$

$j = \text{Année [an]}$

$a = \text{Taux d'interêt [%]}$

Si le résultat de la VAN est positif, alors l'investissement est avantageux, s'il ne l'est pas il ne faut pas investir. Les revenus sont constitués par l'énergie produite ainsi que par le prix de vente.

Différentes équations du prix de revient existent. En voici trois :

- L'équation du prix de revient actualisé [22] :

$$P_r = \frac{C_i}{r \cdot (1+r)^{20}} \cdot E \quad \text{Equation 16}$$

Avec:

$P_r = \text{Prix de revient} \left[\frac{\text{CHF}}{\text{kWh}} \right]$

$C_i = \text{Coût d'investissement [CHF]}$

$r = \text{Taux d'actualisation [%]}$

$E = \text{Energie annuelle [kWh]}$

- L'équation du prix de revient statique :

$$P_r = \frac{C_i + C_a}{E} \quad \text{Equation 17}$$

Avec:

$$P_r = \text{Prix de revient} \left[\frac{\text{CHF}}{\text{kWh}} \right]$$

$$C_a = \text{Charges annuelles [CHF]}$$

$$D = \text{Durée d'amortissement [an]}$$

- Prix de revient de manière empirique :

$$P_r = 0,02 \cdot P^{-1} \cdot (a \cdot C_i + e) \quad \text{Equation 18}$$

Avec:

$$P_r = \text{Prix de revient} \left[\frac{\text{cts}}{\text{kWh}} \right]$$

$$a = \text{Coefficient d'annuité [-]}$$

$$e = \text{Coût de maintenance et exploitation [CHF]}$$

$$P = \text{Puissance électrique de l'installation [kW]}$$

2.1.8. Exemple d'une PCH sur un réseau d'eau potable déjà existant

La centrale de Mettental Sachseln installée dans le canton d'Obwald possède une chute de 919 m ainsi qu'un débit variant de 4 à 40 l/s. Elle est équipée d'une turbine Pelton, a une puissance nominale de 300 kW et produit plus de 1'000 MWh par année. Le système de subvention est celui de la rétribution à prix unique. La Figure 13 montre en rouge le tracé de la conduite d'eau potable entre le réservoir et le lieu de turbinage. C'est l'une des centrales sur un réseau d'eau potable ayant la plus haute chute [24]. Son coût de construction s'élève à 2.2 millions et son prix de revient est de 14 ct/kWh [25].



Figure 13: Centrale hydraulique de Mettental Sachseln [24]

2.2. Analyse multicritère

Cette partie prend comme référence le livre d'Alain Schärli [26]. Une analyse multicritère se base sur une méthode visant à dégager une solution optimale prenant en compte tous les environnements en effectuant un travail de synthèse. Cette méthode renonce à trouver une solution optimale pour chacun des critères.

Au-delà des critères techniques, il faut aussi considérer l'aspect humain qui dans ce cas se nomme la multiplicité de valeurs. Par exemple, un intervenant pourra être plus en faveur de l'environnement alors qu'une autre personne aura des préférences pour la performance. Cela consiste donc à ne pas rejeter la complexité de l'Homme.

A considérer aussi que tous les critères ne sont pas commensurables, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent pas être traduits en un coût et sont souvent en contradiction les uns des autres. C'est là que se trouve toute la difficulté de l'approche multicritère. Il faut prendre en compte tous les critères pouvant entraîner des conséquences sur le projet et trouver la meilleure solution, bien qu'il y ait des contradictions. Il est également important de traiter le problème sans le détacher de son contexte.

Plusieurs méthodes multicritères se dégagent, mais elles ont toutes les points suivants en commun :

- Dresser la liste des solutions possibles ou envisageables

Cette partie peut être développée au fur et à mesure en sachant quel est l'objet de la décision.

- Dresser la liste des critères à prendre en considération

La liste des critères doit permettre de prendre en compte tous les problèmes. Il est cependant possible de négliger des détails qui a priori sont sans importance. Une technique consiste à réfléchir aux conséquences de l'action et à décomposer par la suite les conséquences qui seront les critères.

- Juger chacune des solutions aux yeux de chacun des critères
- Agréger ces jugements pour désigner la solution qui jouit globalement des meilleures évaluations

Ce point consiste à bien connaître la problématique avant de choisir une méthode, car elles sont nombreuses et ne fonctionnent pas pour toutes les problématiques. En effet certaines méthodes ont été inventées uniquement pour certains types de domaine. Ce travail utilisera la problématique appelée Beta, qui consiste à trier les actions comme on peut le voir avec le Tableau 5.

Problématique	Objectif	Procédure	Résultat
Alpha : α	Eclairer la décision par le choix d'un sous-ensemble aussi restreint que possible en vue d'un choix final d'une seule action	Une Procédure de Sélection	Choix
Bêta : β	Eclairer la décision par un tri résultant d'une affectation de chaque action à une catégorie, les catégories étant définies à priori en fonction de normes ayant trait à la suite à donner aux actions qu'elles sont destinées à recevoir.	Une Procédure d'Affectation	Tri
Gamma : γ	Eclairer la décision par un rangement obtenu en regroupant tout ou partie (les «plus satisfaisantes») des actions en classes d'équivalence, ces classes étant ordonnées, de façon complète ou partielle, conformément aux préférences.	Une procédure de Classement	Rangement
Delta : δ	Eclairer la décision par une description, dans un langage approprié, des actions et de leurs conséquences.	Une procédure Cognitive	Description

Tableau 5: Les problématiques de références extraites de [27]

Afin d'analyser ces problématiques, il existe de nombreuses méthodes d'analyse dont quelques-unes vont être expliquées dans les chapitres suivants.

2.2.1. Méthode des sommes pondérées et la multiplication de ratio

C'est une des méthodes les plus utilisées aujourd'hui. Elle consiste à pondérer les différents critères selon leur importance. Il faut que ces critères soient comparables et aient une échelle commune. Elle peut également être facilement implémentée dans un logiciel SIG. La difficulté de cette méthode se porte sur l'appréciation de la pondération qui peut facilement changer d'une personne à l'autre. Il faut garder un esprit critique sur cette analyse [26].

$$\text{Evaluation sommes pondérées} = \frac{E_1 \cdot P_1 + E_2 \cdot P_2 + \dots + E_n \cdot P_n}{P_1 + P_2 + \dots + P_n} \quad \text{Equation 19}$$

Avec:

E = Evaluation

P = Pondération

La multiplication de ratios reprend la même logique, mais au lieu d'additionner les ratios, il faut les multiplier et le poids du critère est placé en puissance de celui-ci. Ce qui fait que les mauvais résultats sont plus fortement pénalisés. Il est donc plus difficile de bien se classer lorsqu'un des critères reçoit un mauvais résultat [26].

$$\text{Evaluation multiplication de ratio} = E_1^{P_1} \cdot E_2^{P_2} \cdot \dots \cdot E_n^{P_n} \quad \text{Equation 20}$$

2.2.2. Méthode multicritère du type ELECTRE-TRI

5 méthodes ELECTRE ont été développées par Bernard Roy. Le principe de base consiste à comparer les actions par paires en partant du principe, que si une action est meilleure dans un critère et équivalente dans les autres, alors elle surpassera l'autre.

C'est la méthode Electre-Tri qui va être approfondie dans ce chapitre, car elle permet de répondre à la problématique Beta. Il y a de nouveau des alternatives qui vont être évaluées à l'aide de critères possédant une pondération. Ces alternatives ne sont pas comparées entre elles, mais à un seuil traduisant les frontières entre les différentes classes préétablies [28].

Dans la Figure 14 on voit :

- Critère $n, g_n \rightarrow$ Chaque ligne représente un critère.
- $C_1 \rightarrow$ Ce sont des classes prédéfinies pour le classement des alternatives.
- $B_h \rightarrow$ Ce sont les séparations entre chaque classe C .

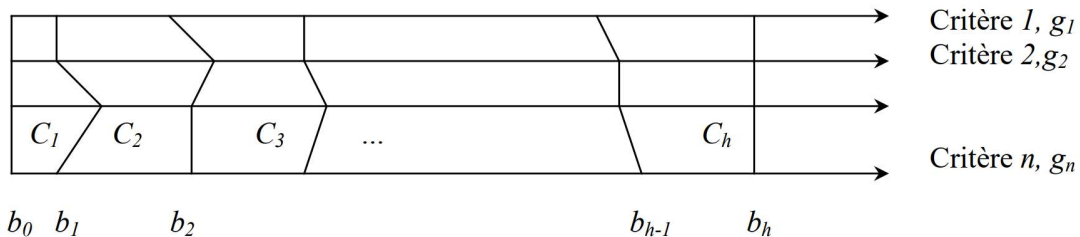


Figure 14: Seuil de la problématique Electre-Tri [28]

Pour surpasser une frontière, une alternative doit être aussi bonne ou meilleure que la frontière sur tous les critères. Cela permet d'avoir une classification complète des alternatives.

2.2.3. Méthode AHP (Analytic Hierarchy Process)

Ce chapitre se base sur le travail de M. Chevallier [27] et de Mme Conjard [29]. C'est une méthode permettant de réaliser une hiérarchie entre les différents critères de l'objectif principal. Cette hiérarchie peut être de plusieurs niveaux. Il faut décomposer le problème en plusieurs sous-problèmes, afin de faciliter la compréhension de celui-ci. Ces sous-problèmes vont ensuite être comparés deux par deux, selon l'échelle de comparaison par paires, en prenant comme référence l'impact étant en dessus d'eux dans la hiérarchie. Saaty (1980) a créé cette échelle afin d'avoir une comparaison de critères qui soit le même pour tous [27].

Degré d'importance	Définition de la valeur
9	Le critère est absolument plus important que l'autre
7	Le critère est beaucoup plus important que l'autre
5	Le critère est plus important que l'autre
3	Le critère est un peu plus important que l'autre
1	L'importance des deux critères est équivalente
1/3	Le critère est un peu moins important que l'autre
1/5	Le critère est moins important que l'autre
1/7	Le critère est beaucoup moins important que l'autre
1/9	Le critère est absolument moins important que l'autre

Tableau 6: Echelle de comparaison par paires [27]

Pour définir le poids des critères nécessaires à l'étude, la matrice de Saaty doit être complétée afin de réaliser la méthode. Les critères vont être comparés deux par deux en fonction de l'échelle de comparaison vue précédemment. Cette matrice appelée S a une dimension de $m \times m$ qui correspond au nombre de critères utilisés dans l'analyse.

Chaque case de la matrice permet de comparer un critère avec un autre, en mettant un terme A_{ij} où i est égal à la $i^{\text{ème}}$ ligne et j est égal à la $j^{\text{ème}}$ colonne.

Pour l'exemple, la matrice a une dimension 3×3 .

Critères	Critère 1	Critère 2	Critère 3
Critère 1	A_{11}	A_{12}	A_{13}
Critère 2	A_{21}	A_{22}	A_{23}
Critère 3	A_{31}	A_{32}	A_{33}

Tableau 7: Matrice de Saaty

La diagonale de la matrice aura des termes égaux à 1, puisque le critère est comparé à lui-même. Les critères sont comparés deux fois entre eux. Par exemple le terme A_{12} sert à comparer le critère 1 par rapport au critère 2 et le terme A_{21} sert à comparer le critère 2 au critère 1. Le total de ces deux termes doit être égal à 1 et donc le terme A_{12} est l'inverse de A_{21} . La moitié de la matrice peut donc être trouvée de cette manière.

Une fois que la matrice a été remplie, il faut procéder à la normalisation de celle-ci en divisant chaque terme par la somme de la colonne.

$$A_{ij}N = \frac{A_{ij}}{\sum_{i=1}^m A_{ij}} \quad \text{Equation 21}$$

Avec:

$A_{ij}N = \text{Terme normalisé}$

$A_{ij} = \text{Terme non normalisé}$

Après avoir normalisé la matrice, le poids de chaque critère peut être ressorti en effectuant la moyenne de chaque ligne du tableau.

$$W = \frac{\sum_{j=1}^m A_{ij}N}{m} \quad \text{Equation 22}$$

Avec:

$A_{ij}N = \text{Terme normalisé}$

$m = \text{Nombre de critères}$

$W = \text{Vecteur du poids des critères}$

Paramètre λ

Pour vérifier le poids des critères, un justificateur de cohérence peut être mis en place. Il faut calculer un vecteur faisant le produit entre la matrice de Saaty non normalisée et le vecteur du poids des critères.

$$w_s = A \cdot W \quad \text{Equation 23}$$

Avec:

$w_s = \text{Vecteur } w_s$

$A = \text{Matrice de Saaty non normalisée}$

$W = \text{Vecteur du poids des critères}$

Le paramètre λ est trouvé en effectuant la somme du vecteur de cohérence. Sa valeur doit être supérieure au nombre de critères.

$$C = w_s \cdot \frac{1}{W} \quad \text{Equation 24}$$

$$\lambda = \frac{\sum_{j=1}^m C}{m} \quad \text{Equation 25}$$

Avec:

$C = \text{Vecteur de cohérence}$

$w_s = \text{Vecteur } w_s$

$W = \text{Vecteur du poids des critères}$

$\lambda = \text{Paramètre}$

Ratio de cohérence

Pour avoir le ratio de cohérence, il faut d'abord calculer :

- L'indice de cohérence dit IC

$$IC = \frac{\lambda - m}{m - 1} \quad \text{Equation 26}$$

- L'indice aléatoire dit IA permet de pondérer IC en fonction du nombre de critères que l'analyse possède. Un tableau récapitulatif créé par Saaty pour un nombre de critères < 10 donne la valeur de l'indice aléatoire.

<i>m</i>	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IA	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,51

Tableau 8: Tableau récapitulatif de l'indice aléatoire [27]

Grâce à ces deux facteurs, le ratio de cohérence peut être trouvé de la manière suivante :

$$R_c = \frac{IC}{IA} \quad \text{Equation 27}$$

Si RC est inférieur à 0.1, alors les critères peuvent être jugés comme cohérents. Sinon il faut réétudier la matrice pour pouvoir utiliser les résultats.

Un exemple concret de la méthode AHP se trouve dans l'annexe 10.4.

2.3. Logiciel QGIS

Afin de visualiser les sites potentiels de turbinage identifiés à l'aide de l'analyse multicritère, les résultats sont affichés sur une carte géographique avec le logiciel QGIS.

QGIS est un logiciel SIG (Système d'Information Géographique) qui permet de réaliser des analyses spatiales ainsi que ses propres cartes. Ce logiciel facilite l'acquisition, le traitement et l'analyse de données. C'est un outil très puissant utilisé par de nombreux bureaux d'ingénieurs et villes en Suisse. Le bureau d'ingénieur BISA est membre du groupe d'utilisateurs de QGIS Suisse regroupé en association.

C'est un logiciel libre et open-source, il permet de remplacer des logiciels payants et donc de réduire les coûts d'une étude de cas. Une utilisation simultanée d'une méthode multicritère et d'un logiciel SIG amène une complémentarité à tous les niveaux. On traite ainsi les notions spatiales avec le SIG et les notions techniques avec la méthode multicritère [27].

Afin de prendre en main ce logiciel, des tutoriels venant du ministère de l'agriculture et de l'alimentation de l'état Français ont été suivis [30].

3. Méthodologie

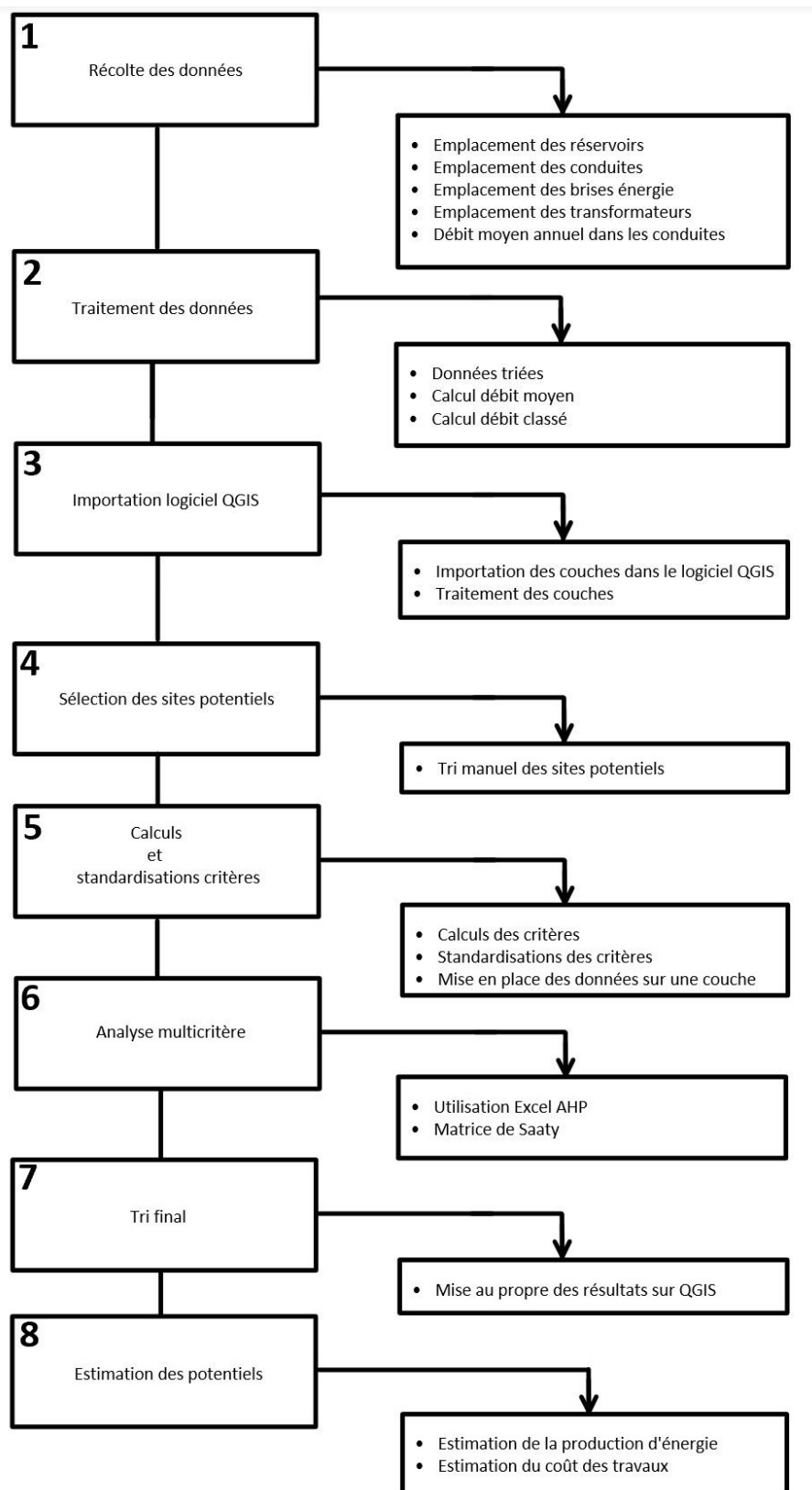


Figure 15: Méthodologie du travail

Cette section décrit plus précisément la méthodologie de la Figure 15.

1. Recherche et prise d'informations auprès des communes, afin d'avoir accès aux mesures ainsi qu'aux couches de leur SIT. Une fois les accès reçus, les données suivantes vont pouvoir être utilisées :
 - a. Emplacement des réservoirs
 - b. Emplacement des réducteurs de pression
 - c. Emplacement des transformateurs
 - d. Débit moyen dans les conduites
2. Traitement des données reçues, afin de pouvoir les implémenter dans le logiciel QGIS. C'est dans cette partie que les données peuvent être triées, rassemblées et préparées en faisant les calculs nécessaires pour la suite du projet. Les courbes de débits classées doivent être créées afin de trouver le débit d'équipement.
3. Implémentation des données sur le logiciel QGIS. Cette étape permet d'insérer les couches ainsi que leur table d'attributs. Les calculs restants peuvent directement être effectués sur le logiciel ou sur Excel.
4. Sélection des points d'intérêts principaux :
 - a. Les réducteurs de pression
 - b. Les grandes chambres de vannes
 - c. Les déversoirs
 - d. Les réservoirs

Cette sélection se fait manuellement avant de procéder au premier tri.

5. Standardisation des sites. Les sites vont être standardisés pour tous les critères, afin de pouvoir les comparer entre eux. Cela se fait à l'aide de fonctions linéaires pour chaque critère. Avant de pouvoir utiliser l'Excel AHP, il faut également avoir les données et leurs standardisations sur une seule couche QGIS.
6. Mise en place de l'Excel AHP. Une fois que les sites ont été standardisés, l'Excel AHP peut être utilisé. Cette fiche Excel permet de trier les sites sélectionnés du meilleur potentiel au moins bon et donc d'avoir la catégorisation finale.
7. Tri final des sites. Une fois la catégorisation finale obtenue, une mise au propre des résultats pourra être faite avec un classement et une représentation QGIS.
8. Estimation du potentiel. En prenant le meilleur site, une évaluation plus spécifique du prix ainsi que du potentiel énergétique peut être effectuée. Cela afin d'avoir une plus grande précision sur le site.

Ce travail sera fait une première fois pour la commune de Crans-Montana, puis par la suite étendu à d'autres communes. Les étapes seront sensiblement les mêmes, bien qu'une réflexion sur les critères et le traitement des données puissent être différents. Ce travail permet de pouvoir trier les sites ayant un potentiel jugé bon pour le turbinage de l'eau potable. C'est la première étape avant de pouvoir optimiser et estimer de manière plus précise chaque site.

4. Choix de l'analyse multicritère

4.1. Choix de la méthode

La méthode AHP a été choisie pour ce travail. La problématique et la comparaison par paires sont complémentaires. De plus la matrice de Saaty permet d'avoir une pondération cohérente entre chaque critère et s'applique bien à la situation.

4.2. Liste des critères utilisés

Pour trouver les sites possédant le meilleur potentiel dans une commune, il faut recenser les sites connus et trouver des critères pour les juger et les classer. Certains critères qui vont suivre ont été repris d'une analyse sur les STEP, afin de pouvoir créer la base de réflexion de départ de l'étude [31]. D'autres ont été rajoutés pour compléter la base de départ, les voici :

- Critère topographique : Consiste en la possibilité du lieu de l'installation et l'accès depuis la route.
- Critère électrique : Consiste en la distance du site au transformateur.
- Critère environnemental : Consiste à juger l'impact environnemental de l'installation.
- Critère technique : Consiste à définir le potentiel de l'installation.
- Critère social : Consiste à connaître les projets et l'intérêt des conseils communaux.
- Critère économique : Consiste à définir la rentabilité possible du projet avec le prix de revient ou la VAN

Les critères approfondis par la suite sont les suivants :

- Potentiel énergétique
- Prix de revient
- Distance au transformateur
- Accès

Les critères sont divisés en 3 familles, le critère financier avec le prix de revient, le critère technique avec le potentiel énergétique et les critères géographiques avec la distance des transformateurs et l'accès.

Ils sont nécessaires afin de pouvoir ressortir un classement lors d'une analyse multicritère.

4.2.1. Potentiel énergétique

Le critère du potentiel est étroitement lié au critère financier, puisque le coût de l'installation va dépendre de la puissance installée et de la hauteur de chute. Ce critère estime l'énergie produite par l'installation.

Le calcul de la puissance d'une installation est le suivant :

$$P_{el} = \rho \cdot g \cdot Qe \cdot (H_b - \Delta H_r - Pr_{min}) \cdot \eta_T \cdot \eta_G \quad \text{Equation 28}$$

Avec:

$$\rho = 1000 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$Qe = \text{débit de l'installation} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$P_{el} = \text{Puissance de l'installation} [W]$$

$$g = 9.81 \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

$$H_b = \text{Chute brute} [m]$$

$$\Delta H_r = \text{Perte de charge} [m]$$

$$Pr_{min} = \text{Pression minimale du réseau d'eau potable} [m]$$

$$\eta_T = \text{Rendement turbine} [\%]$$

$$\eta_G = \text{Rendement génératrice} [\%]$$

Pour juger le potentiel des lieux possibles, les pertes de charges peuvent être estimées dans un premier temps à 10% de la chute brute. La pression minimale pour le secteur privé est de 4 bars. Pour les industries, le besoin est de 10 bars. Cette pression doit être réduite uniquement, si le turbinage se fait sans réservoir en aval de la turbine. Un malus de 40 m, l'équivalent de 4 bars est appliqué sur les sites potentiels remplaçant un réducteur de pression.

Le calcul de la production d'énergie se calcule ensuite à l'aide de la courbe de débits classés et de la formule suivante :

$$E = P_{el} \cdot j \quad \text{Equation 29}$$

Avec:

E = Energie produite par l'installation en 1 année [kWh]

P_{el} = Puissance électrique de l'installation selon la courbe de débit classé [kW]

j = journée de la courbe de débit classé [h]

Si la courbe de débits classés n'est pas disponible, l'annexe 10.5 montre comment calculer le débit ainsi que l'énergie.

4.2.2. Prix de revient

Ce critère permet de prendre en compte le coût d'un kWh produit par le site potentiel durant sa durée de vie. Le calcul se fait selon la formule empirique suivante [20] :

$$P_r = 0.02 \cdot P^{-1} \cdot (a \cdot C + e) \quad \text{Equation 30}$$

Avec:

C = Coût d'investissement [CHF]

e = Coût de maintenance et exploitation [CHF]

a = Annuité constante [-]

P = Puissance électrique de l'installation [kW]

4.2.3. Distance au transformateur

Ce critère permet de juger la distance la plus courte entre une installation et un transformateur. Plus le transformateur se situe proche de l'installation et plus les travaux seront simples à réaliser. Le prix sera également plus bas. Les calculs suivants vont être utilisés [19] :

$$P_c = (0,0007 \cdot I^2 + 0,1009 \cdot I + 2,7522) \cdot D \quad \text{Equation 31}$$

Avec:

P_c = Prix du câble [CHF]

I = Courant dans le câble [A] $\rightarrow I = \frac{P [W]}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos(\varphi)}$

D = Distance de raccordement [m]

Si le tube passe au même endroit que la conduite

$$P_{ft} = 0$$

Sinon

$$P_{ft} = 155 \cdot D$$

Avec:

P_{ft} = Prix fouille et tube [CHF]

Finalement, le prix du raccordement s'exprime :

$$\text{PrixRaccordement} = P_c + Pft \quad \text{Equation 32}$$

4.2.4. Accès

Ce critère permet de juger si le site potentiel se situe dans une zone avec un accès facilité par une route proche ou non. Plus la distance est élevée, plus le chantier nécessitera la construction d'un chemin d'accès plus long. Si un accès se situe à moins de 40 m, alors un chemin d'accès spécifique ne sera pas nécessaire et l'utilisation d'une grue pourra être utilisée.

4.3. Standardisation des critères

Les critères peuvent être de nature différente. Une standardisation doit être effectuée afin de comparer des critères avec des données qui ne sont pas toutes à la même échelle. Une échelle de 0 à 10 constituée d'une fonction linéaire sera utilisée pour ce travail. Ce choix a été fait afin d'éviter des changements trop marqués entre différents paliers. Il permet également de restreindre le poids que joue l'humain dans la standardisation et de faire en sorte que tous les critères soient jugés de manière égale.

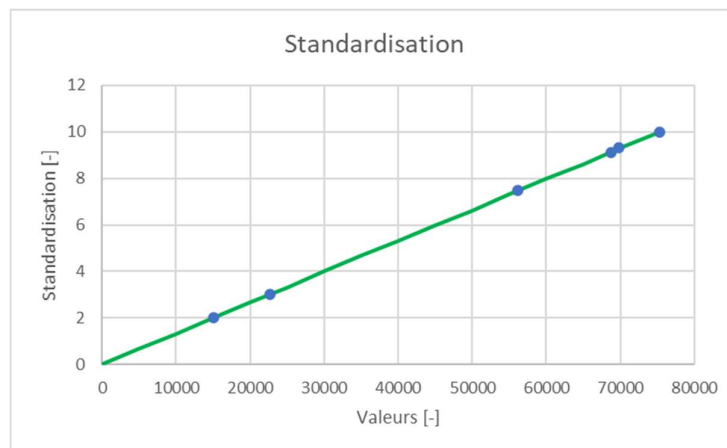


Figure 16: Exemple fonction de standardisation

- Pour les critères où le meilleur site doit avoir la plus grande valeur :

$$f(x) = \frac{10}{\text{Valeur max}} \cdot \text{Valeur} \quad \text{Equation 33}$$

- Pour les critères où le meilleur site doit avoir la plus petite valeur :

$$f(x) = 10 - \frac{10}{\text{Valeur max}} \cdot \text{Valeur} \quad \text{Equation 34}$$

Voici les calculs de standardisation pour les critères utilisés :

Critère potentiel énergétique

La standardisation de ce critère se fait selon l'équation suivante :

$$f(x) = \frac{10}{\text{Energie max}} \cdot \text{Energie site} \quad \text{Equation 35}$$

Critère prix de revient

La standardisation de ce critère se fait selon l'équation suivante :

$$f(x) = 10 - \frac{10}{\text{Prix de revient max}} \cdot \text{Prix de revient site} \quad \text{Equation 36}$$

Critère distance transformateur

La standardisation de ce critère se fait selon les équations suivantes en prenant comme référence le pourcentage du prix du câble sur le coût de l'installation totale :

$$\% \text{ du prix} = \frac{\text{Prix raccordement}}{\text{Coût d'investissement}} \cdot 100 \quad \text{Equation 37}$$

$$f(x) = 10 - \frac{10}{\% \text{ du prix max}} \cdot \% \text{ du prix site} \quad \text{Equation 38}$$

Critère Accès

La standardisation de ce critère se fait selon l'équation suivante :

$$f(x) = 10 - \frac{10}{\text{Distance max}} \cdot \text{Distance site} \quad \text{Equation 39}$$

5. Description des couches utilisées sur QGIS

Ce chapitre décrit les couches utilisées dans le logiciel QGIS. Pour le traitement de ces couches et des critères, les annexes 10.6 et 10.7 montrent le cas appliqué à la commune de Crans-Montana.

5.1. Couche Swissimage Hintergrund

Cette couche permet d'avoir les images satellites de la Suisse et de pouvoir situer plus facilement les lieux de la commune.

5.2. Couche limites communales

La couche des limites communales permet de délimiter les frontières de la commune.

5.3. Couches réseau d'eau

Le réseau d'eau doit être sorti du cadastre et les couches suivantes peuvent être créés :

- Une couche avec les conduites d'eau
- Une couche avec les réducteurs de pression
- Une couche avec les réservoirs

5.4. Couche routes

La couche recensant les routes en Suisse se nomme « TIm_Strasse » et se trouve sur le DataPoolVS. Elle permet de spatialiser toutes les routes sur le logiciel QGIS.

5.5. Couche transformateurs

Une demande doit être faite au distributeur d'énergie (par exemple OIKEN) pour avoir accès à la localisation des transformateurs sur la commune. Elle permet de spatialiser tous les transformateurs sur le logiciel QGIS.

5.6. Couche MNT

Ces couches permettent d'obtenir les altitudes des réservoirs et des réducteurs de pression de la commune jusqu'à 2000 mètres d'altitude.

5.7. Couche sites potentiels

Cette couche est créée à partir des couches et des données suivantes :

- Couche réservoirs selon les données DPE
- Couche réducteurs de pression
- Données DPE

Elle permet de noter les sites potentiels choisis manuellement.

5.8. Couche population

Cette couche est téléchargée sur le drive Géopol Data VS dans le dossier « Société, culture ». Elle permet de localiser la population et de savoir l'altitude des bâtiments les plus proche des réducteurs de pression.

5.9. Schéma source de données

La Figure 17 explique de manière synthétique d'où proviennent les données ainsi que les processus de traitement pour atteindre les critères recherchés. L'annexe 10.8 la montre à plus grande échelle.

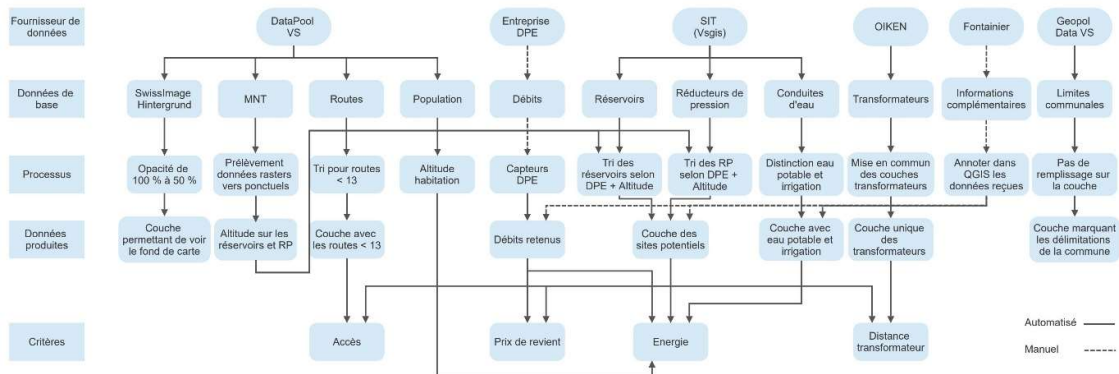


Figure 17: Schéma récapitulatif données QGIS

Les fournisseurs de données intervenant dans ce travail sont les suivants :

DataPool VS

Ce fournisseur permet d'avoir accès à la couche des routes, de la population ainsi que le MNT. Ces couches sont nationales et ne varient pas d'une commune à l'autre. Il permet d'avoir les données pour les critères de l'accès et l'énergie.

DPE

L'entreprise DPE permet d'avoir les données des capteurs de mesures, afin de faire les courbes de débits mensuelles et hebdomadaires. Il permet d'avoir les données pour le critère de l'énergie et du prix de revient. Ces données dépendent des capteurs installés sur la commune et peuvent donc varier d'une commune à l'autre.

SIT (Vsgis)

Ce fournisseur permet d'avoir les données du cadastre souterrain de la commune. Ces données aident au choix des sites potentiels et à la localisation des réservoirs et des réducteurs de pression. Les cadastres étant communaux, la précision des informations peut varier d'une commune à l'autre.

OIKEN

OIKEN permet d'avoir accès à la localisation des transformateurs sur la commune. Cela est utile pour le critère de la distance des transformateurs.

Fontainier

Le fontainier fournit des informations sur le réseau d'eau potable de la commune. Il partage également son expérience sur de possibles sites potentiels.

Geopol Data Vs

Ce fournisseur permet d'avoir accès à la couche des limites communales.

6. Application sur la commune de Crans-Montana

6.1. Description de la commune

Crans-Montana est une commune se situant en Suisse dans le canton du Valais. Elle est issue de la fusion des communes de Chermignon, Montana, Randogne et Mollens. Elle compte plus de 10'000 habitants, mais sa population varie en fonction des saisons et du tourisme. Située à une altitude moyenne de 1500 mètres, son territoire de 590 hectares s'étend de la plaine du Rhône à près de 3000 mètres d'altitude. Son réseau d'eau est divisé en une partie irrigation et une partie alimentation en eau potable. Sur la Figure 18, on voit la commune de Crans-Montana avec en brun la partie irrigation et en bleu la partie EP [32].

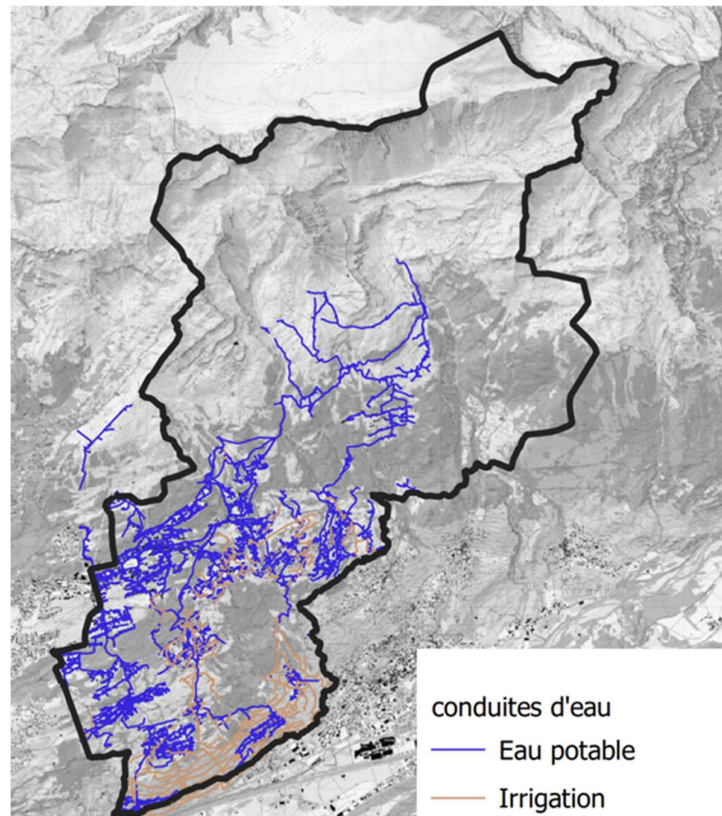


Figure 18: Aperçu de la commune de Crans-Montana et de son réseau d'eau

6.2. Choix des sites potentiels

Les sites potentiels sont choisis à l'aide du fontainier et du schéma de DPE qui permet d'identifier les débits limites. Ces débits limites sont situés aux alentours de 10 l/s avec une chute minimale de 100 m.

- Le premier tri s'effectue en traitant les données de DPE de manière à sortir un débit moyen pour chaque capteur. Les débits aux alentours ou au-dessus de 10 l/s sont gardés pour le 2^{ème} tri. Cette partie se fait en extrayant un débit mensuel pour les années 2018 à 2022.
- Le 2^{ème} tri s'effectue uniquement sur les débits proches ou au-dessus de 10 l/s et possédant une chute brute d'une hauteur maximale de 160 m. Ceci afin de ne pas sauter un réducteur de pression et de ne pas devoir redimensionner une conduite pour qu'elle puisse résister à la pression. Il consiste à sortir les données journalières de ces débits, afin d'effectuer les débits classés. Ce sont ces sites qui vont par la suite être sélectionnés pour la couche QGIS « Sites potentiels ».
- Pour les sites potentiels donnés par le fontainier et qui ne possèdent pas de capteur de débit, un débit fictif de 8 l/s est utilisé pour l'analyse.

6.3. Analyse multicritère

Deux solutions vont être présentées dans ce chapitre. La 1^{ère} solution ne prend en compte que les sites avec des courbes de débits classés. La 2^{ème} solution prend également en compte les sites n'ayant pas de mesures de débits et qui sont étudiés avec un débit d'équipement fictif de 8 l/s.

6.3.1. Solution 1 : courbe des débits classés

Une fois la récolte et le traitement des données effectués, les sites potentiels ont pu être triés, sélectionnés et placés sur le logiciel QGIS.

Les sites potentiels choisis avec leurs données principales sont représentés dans le Tableau 9. Leurs emplacements sont montrés dans la Figure 19. Les rendements pour passer de la puissance hydraulique à la puissance électrique sont de 0.9 pour le générateur et 0.85 pour la turbine.

Placement	Site	Débit d'équipement [m ³ /s]	Puissance hydraulique [kW]	Puissance électrique [kW]	Energie annuelle [kWh]	Coût investissement final[CHF]	Coût maintenance et exploitation [CHF]	Prix de revient [cts]
1	51-Briesses R4020	0.01815	14.03	10.73	58913	85000	3738	18.42
2	R4010-51	0.01815	10.35	7.91	43443	85000	3114	23.40
3	R4030-58	0.00786	6.83	5.23	29763	85000	2427	32.81
4	R4020-R4030	0.01158	11.04	8.45	50865	85000	3238	22.22
5	R3060-R3070	0.00510	6.41	4.91	38856	85000	2337	34.58

Tableau 9: Récapitulatif des sites potentiels choisis (solution 1)

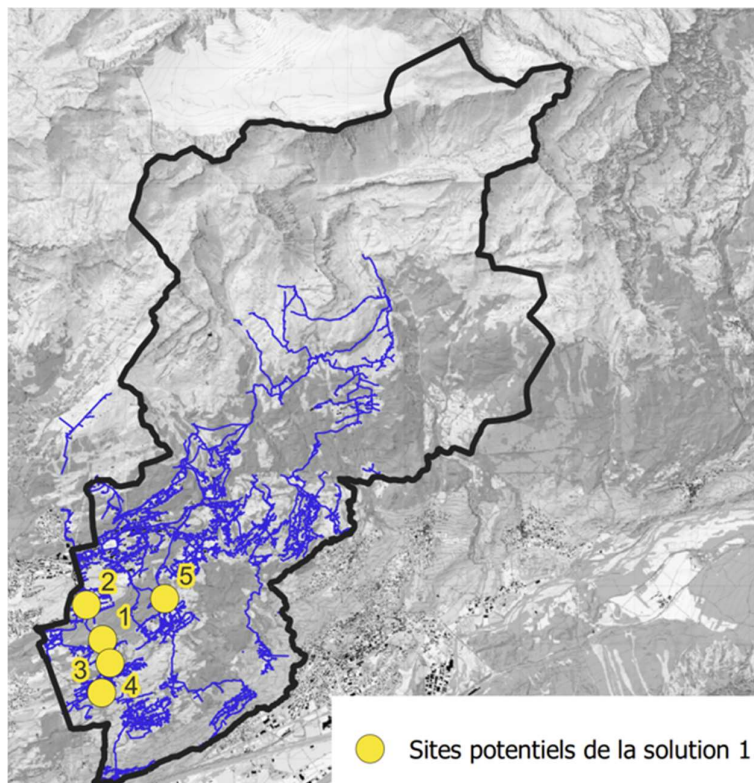


Figure 19: Emplacement des sites potentiels sur Crans-Montana (solution 1)

Les sites potentiels étant choisis, le calcul des critères ainsi que leur standardisation linéaire ont pu être effectués. La standardisation des critères donne les résultats suivants :

Site	Standardisation Prix de revient	Standardisation Energie	Standardisation Accès	Standardisation Transformateurs
51-Briesses R4020	4.67	10.00	4.59	0.00
R4010-51	3.23	7.37	9.62	3.75
R4030-58	0.51	5.05	4.04	8.39
R4020-R4030	3.57	8.63	0.00	2.81
R3060-R3070	0.00	6.60	2.95	4.04

Tableau 10: Résumé standardisation des critères (solution 1)

Il faut créer la matrice de Saaty pour avoir la pondération des critères afin de faire le classement final. La pondération des critères se fait avec la méthode AHP selon la comparaison par paires. Il a été choisi de juger le critère économique et le critère énergétique de manière équivalente. Les critères géographiques sont jugés un peu moins importants que les autres. Le résultat de la matrice est le suivant :

Critères	Energie	Prix revient	Accès	Distance Transformateurs
Energie	1	1	3	3
Prix revient	1	1	3	3
Accès	1/3	1/3	1	1
Distance Transformateurs	1/3	1/3	1	1
Somme	2.7	2.7	8.0	8.0
Facteur de cohérence	0.0			

Tableau 11: Comparaison par paires dans matrice de Saaty

La matrice de Saaty présentée dans le Tableau 11 donne la pondération suivante aux critères :

Critères	Poids critères
Energie	0.375
Prix revient	0.375
Accès	0.125
Distance Transformateurs	0.125
Somme	1

Tableau 12: Pondération des critères de l'analyse

La standardisation peut ensuite être multipliée par la pondération des critères. Le résultat ressortant de l'analyse multicritère place le site 51 – Briesses R4020 en 1^{ère} place.

Position	Site	Classement
1	51-Briesses R4020	6.08
2	R4010-51	5.65
3	R4020-R4030	4.93
4	R4030-58	3.64
5	R3060-R3070	3.35

Tableau 13: Classement final de l'analyse (solution 1)

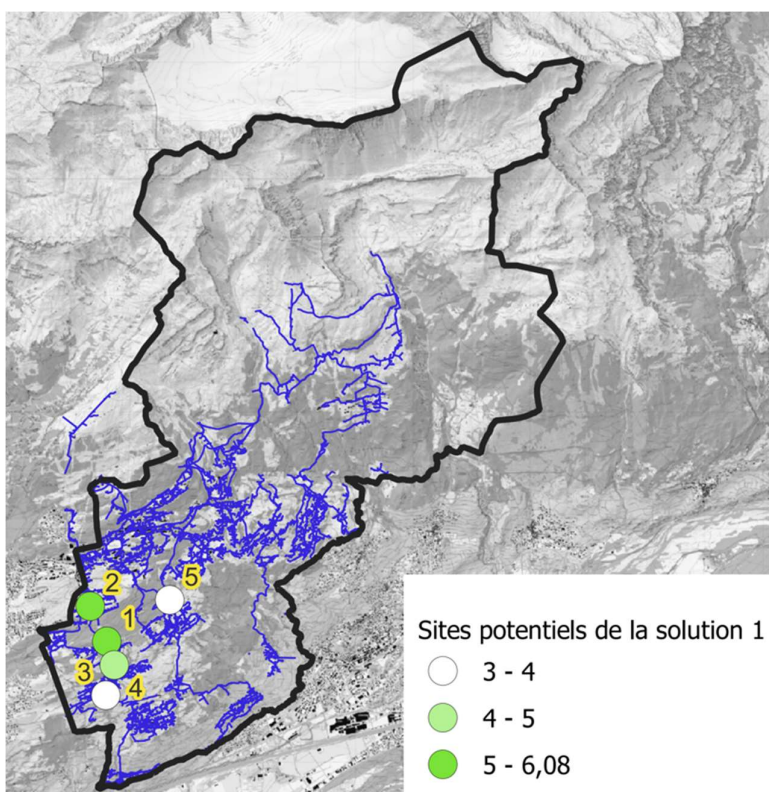


Figure 20: Sites potentiels avec couleurs en fonction du classement (solution 1)

6.3.2. Solution 2 : courbes des débits classés et fictifs

Les sites potentiels choisis avec leurs données principales sont représentés dans le Tableau 14. Leurs emplacements sont montrés dans la Figure 21. Les rendements pour passer de la puissance hydraulique à la puissance électrique sont de 0.9 pour le générateur et 0.85 pour la turbine.

Placement	Site	Débit d'équipement [m ³ /s]	Puissance hydraulique [kW]	Puissance électrique [kW]	Energie annuelle [kWh]	Coût investissement final[CHF]	Coût maintenance et exploitation[CHF]	Prix de revient [cts]
1	51-Briesses R4020	0.01815	14.03	10.73	58913	85000	3738	18.42
2	R4010-51	0.01815	10.35	7.91	43443	85000	3114	23.40
3	R4030-58	0.00786	6.83	5.23	29763	85000	2427	32.81
4	R4020-R4030	0.01158	11.04	8.45	50865	85000	3238	22.22
5	R3060-R3070	0.00510	6.41	4.91	38856	85000	2337	34.58
6	Trop-plein station-lac de Grenon	0.008	7.18	5.49	27474	85000	2502	31.47
7	Vermala R2030 -4	0.008	7.38	5.65	28237	85000	2543	30.77
8	Trop-plein Randogne R2100 - Lac	0.008	3.55	2.71	13568	85000	1638	57.37

Tableau 14: Récapitulatif des sites potentiels choisis (solution 2)

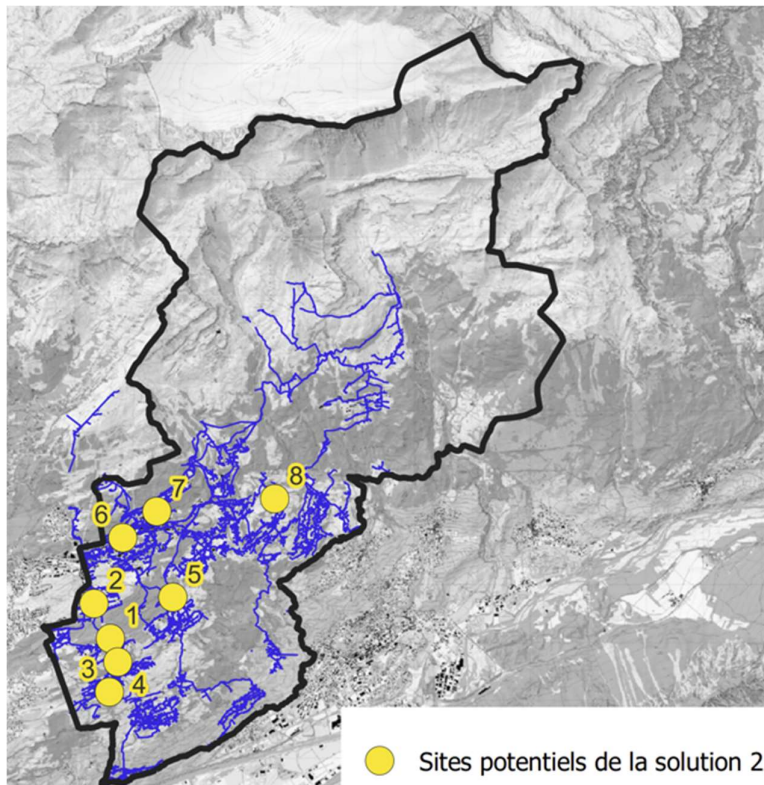


Figure 21: Emplacement des sites potentiels sur Crans-Montana (solution 2)

Les sites potentiels étant choisis, le calcul des critères ainsi que leur standardisation linéaire ont pu être effectués. La standardisation des critères donne les résultats suivants :

Site	Standardisation Prix de revient	Standardisation Energie	Standardisation Accès	Standardisation Transformateurs
51-Briesses R4020	6.79	10.00	4.59	0.00
R4010-51	5.92	7.37	9.62	3.77
R4030-58	4.28	5.05	4.04	8.40
R4020-R4030	6.13	8.63	0.00	2.83
R3060-R3070	3.97	6.60	2.95	4.08
Trop-plein station-lac de Grenon	4.51	4.66	6.72	8.37
Vermala R2030 -4	4.64	4.79	9.49	6.98
Trop-plein Randogne R2100 - Lac	0.00	2.30	9.42	2.95

Tableau 15: Résumé standardisation des critères (solution 2)

La pondération utilisée est la même que pour la solution 1 et le résultat ressortant de l'analyse multicritère place également le site 51 – Briesses R4020 en 1^{ère} place.

Position	Site	Classement
1	51-Briesses R4020	6.87
2	R4010-51	6.66
3	R4020-R4030	5.89
4	Vermala R2030 -4	5.59
5	Trop-plein station-lac de Grenon	5.33
6	R4030-58	5.05
7	R3060-R3070	4.84
8	Trop-plein Randogne R2100 - Lac	2.41

Tableau 16: Classement final de l'analyse (solution 2)

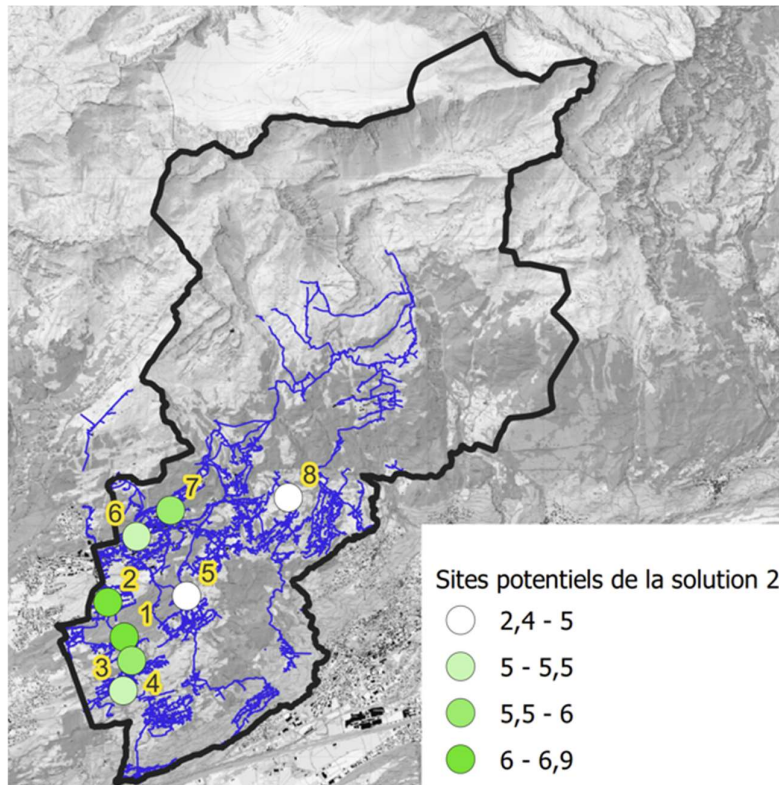


Figure 22: Position des sites potentiels avec couleurs en fonction du classement (solution 2)

Cette solution prend en compte des débits fictifs. Si un intérêt apparaît pour l'un de ces sites, il faudrait effectuer des mesures réelles sur ce débit avant de commencer une analyse de potentiel du site.

6.4. Analyse de sensibilité des critères

L'analyse de sensibilité et l'approfondissement du meilleur site n'est effectuée que sur la solution 1 puisqu'elle ne possède que des débits réels.

Les matrices AHP suivantes ont été créées, afin de voir la sensibilité de la pondération des critères en fonction de la matrice choisie précédemment (cf. Tableau 6). Les diverses matrices retenues sont les suivantes :

- 1) Les critères de l'énergie et du prix de revient ont la même importance et sont un peu plus importants que les critères transformateur et accès.
- 2) Les critères de l'énergie et du prix de revient ont la même importance et sont plus importants que les critères transformateur et accès.
- 3) Le critère de l'énergie est un peu plus important que le critère prix de revient et plus important que les critères transformateur et accès.
- 4) Le critère du prix de revient est un peu plus important que le critère énergie et plus important que les critères transformateur et accès.

Matrice 1					
Critères	Energie	Prix revient	Accès	Distance Transformateurs	Poids critères
Energie	1	1	3	3	0.375
Prix revient	1	1	3	3	0.375
Accès	1/3	1/3	1	1	0.125
Distance Transformateurs	1/3	1/3	1	1	0.125
Somme	2.7	2.7	8.0	8.0	1
Facteur de cohérence		0.0			

Tableau 17: Matrice 1

Matrice 2					
Critères	Energie	Prix revient	Accès	Distance Transformateurs	Poids critères
Energie	1	1	5	5	0.417
Prix revient	1	1	5	5	0.417
Accès	1/5	1/5	1	1	0.083
Distance Transformateurs	1/5	1/5	1	1	0.083
Somme	2.4	2.4	12.0	12.0	1
Facteur de cohérence		0.0			

Tableau 18: Matrice 2

Matrice 3					
Critères	Energie	Prix revient	Accès	Distance Transformateurs	Poids critères
Energie	1	3	5	5	0.555
Prix revient	1/3	1	3	3	0.252
Accès	1/5	1/3	1	1	0.097
Distance Transformateurs	1/5	1/3	1	1	0.097
Somme	1.7	4.7	10.0	10.0	1
Facteur de cohérence		0.013			

Tableau 19: Matrice 3

Matrice 4					
Critères	Energie	Prix revient	Accès	Distance Transformateurs	Poids critères
Energie	1	1/3	3	3	0.252
Prix revient	3	1	5	5	0.555
Accès	1/3	1/5	1	1	0.097
Distance Transformateurs	1/3	1/5	1	1	0.097
Somme	4.7	1.7	10.0	10.0	1
Facteur de cohérence		0.013			

Tableau 20: Matrice 4

Les matrices ressortent toutes une pondération de critères différente. Un classement des sites potentiels a été établi pour chacune d'entre elles. Le Tableau 21 montre les classements finaux. Pour toutes les pondérations, la position des sites dans le classement ne varie pas, à l'exception de la matrice 3 qui inverse les sites R4030-58 et R3060-R3070. L'analyse des sites de Crans-Montana n'est donc pas sensible à la variation de pondération des critères, car il y a un écart conséquent entre chaque site potentiel. Le site 51 – Briesses R4020 étant toujours en 1^{ère} place, un approfondissement de ce site va être effectué.

Matrice 1			Matrice 2			Matrice 3			Matrice 4		
Position	Site	Classement	Position	Site	Classement	Position	Site	Classement	Position	Site	Classement
1	51-Briesses R4020	6.08	1.00	51-Briesses R4020	6.50	1	51-Briesses R4020	7.17	1	51-Briesses R4020	5.55
2	R4010-51	5.65	2.00	R4010-51	5.54	2	R4010-51	6.20	2	R4010-51	4.94
3	R4020-R4030	4.93	3.00	R4020-R4030	5.32	3	R4020-R4030	5.96	3	R4020-R4030	4.43
4	R4030-58	3.64	4.00	R4030-58	3.35	4	R3060-R3070	4.34	4	R4030-58	2.76
5	R3060-R3070	3.35	5.00	R3060-R3070	3.33	5	R4030-58	4.13	5	R3060-R3070	2.34

Tableau 21: Classement des différentes matrices

6.5. Approfondissement du site 51 - Briesses R4020

Le site 51 – Briesses R4020 avec une chute brute de 87.83 mètres est le site qui arrive en tête de l'analyse multicritère. Il va donc être approfondi dans ce chapitre.

6.5.1. Pertes de charges

Voici les différentes conduites reliant le réducteur de pression au réservoir de Briesses.

ID conduite	Matériau	Diamètre [mm]	Année construction	Longueur [m]
9703410	Polyéthylène	125	2015	31.70
9703409	Acier, oxydable	150	1986	125.54
9713611	Polyéthylène, S5	200	2021	662.41
Total				820

Tableau 22: Résumé des conduites

Les résultats des coefficients de pertes de charges sont les suivants :

λ_{125}	λ_{150}	λ_{200}	ΔH_r total [m]	Chute nette [m]	Rendement conduite [%]
0.016	0.040	0.018	3.23	84.60	96.32

Tableau 23: Résultats pertes de charges

On observe une perte de charges dans la conduite de 3.23 mètres.

6.5.2. Choix de la turbine

La chute nette est de 84.6 m et le débit d'équipement de 0.0181 m³/s. La turbine la plus appropriée est donc une turbine Pelton (cf. Tableau 2).

6.5.3. Dimensionnement de la turbine

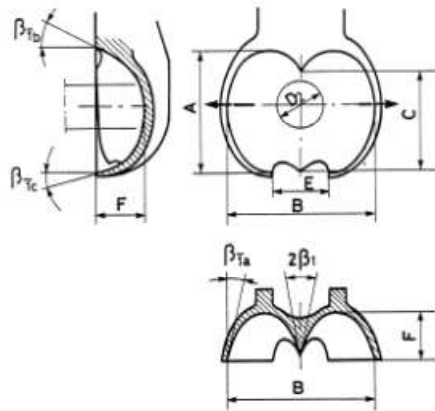
La vitesse de rotation de la turbine est de 1500 tr/min pour 2 paires de pôles. Sa vitesse spécifique est de 0.046 et se situe dans la zone recherchée.

	Nbr paire de poles					Unité
	5	4	3	2	1	
E	829.879	829.879	829.879	829.879	829.879	J/kg
Hn	84.595	84.595	84.595	84.595	84.595	m
Q	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	m ³ /s
Ph	15.016	15.016	15.016	15.016	15.061	kW
Co	40.740	40.740	40.740	40.740	40.740	m/s
f	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000	Hz
z _p	5.000	4.000	3.000	2.000	1.000	-
n	10.000	12.500	16.667	25.000	50.000	tour/sec
n'	600.000	750.000	1000.000	1500.000	3000.000	tour/min
w	62.832	78.540	104.720	157.080	314.159	rad/sec
U1	18.333	18.333	18.333	18.333	18.333	m/s
R1	0.292	0.233	0.175	0.117	0.058	m
D1	0.584	0.467	0.350	0.233	0.117	m
v	0.018	0.023	0.031	0.046	0.092	-
n _{QE}	0.009	0.011	0.015	0.022	0.044	-
n _Q	2.90	3.62	4.83	7.24	14.49	

Tableau 24: Tableau de dimensionnement de la turbine

Le nombre d'injecteurs a été défini au nombre de 2 pour un nombre de 22 augets.

Les dimensions des augets sont les suivantes :



$$A/D_2 = 2.8 \div 3.2$$

$$B/D_2 = 2.3 \div 2.8$$

$$C/D_2 = 1.4 \div 1.8$$

$$E/D_2 = 1.1 \div 1.2$$

$$F/D_2 = 0.6 \div 0.9$$

$$2\beta_1 = 10^\circ \div 30^\circ$$

$$\beta_{1a} = 7^\circ \div 15^\circ$$

$$\beta_{1b} = 20^\circ \div 40^\circ$$

$$\beta_{1c} = 0^\circ \div 5^\circ$$

Figure 23: Dimensions caractéristiques d'un auget de turbine Pelton

Dimensions augets en fonction du nbr d'injecteurs							Unité
D2	0.024	0.017	0.014	0.012	0.011	0.010	m
A	0.072	0.051	0.042	0.036	0.032	0.029	m
B	0.060	0.043	0.035	0.030	0.027	0.025	m
C	0.039	0.027	0.022	0.019	0.017	0.016	m
E	0.028	0.020	0.016	0.014	0.012	0.011	m
F	0.018	0.013	0.010	0.009	0.008	0.007	m

Tableau 25: Dimension des augets selon le nombre d'injecteurs

6.5.4. Calcul de la production d'énergie

L'énergie est de 64 MWh. Elle est calculée grâce à la courbe des débits classés, la hauteur de chute et les rendements de l'installation.

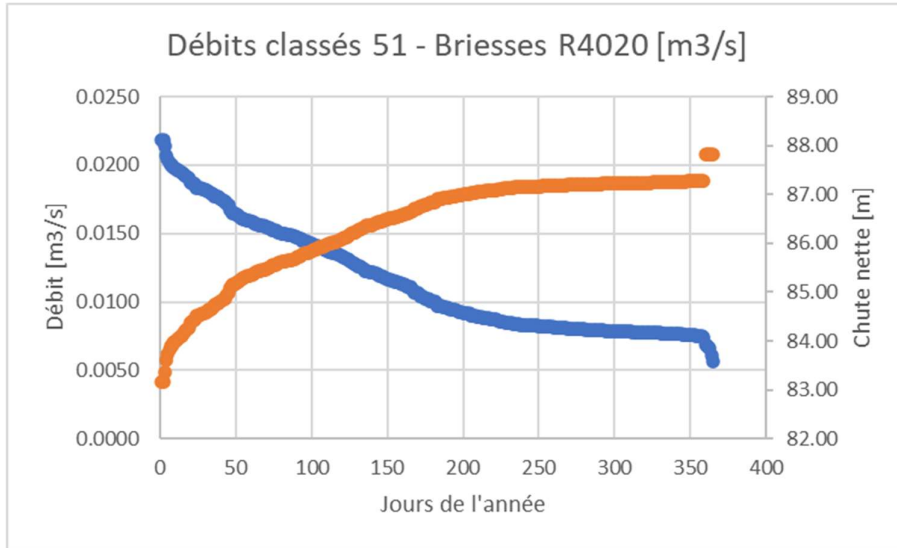


Figure 24: Courbe des débits classés

6.5.5. Investissement et rentabilité

Le prix total de l'investissement sans subvention est de 195'000 CHF avec la répartition suivante :

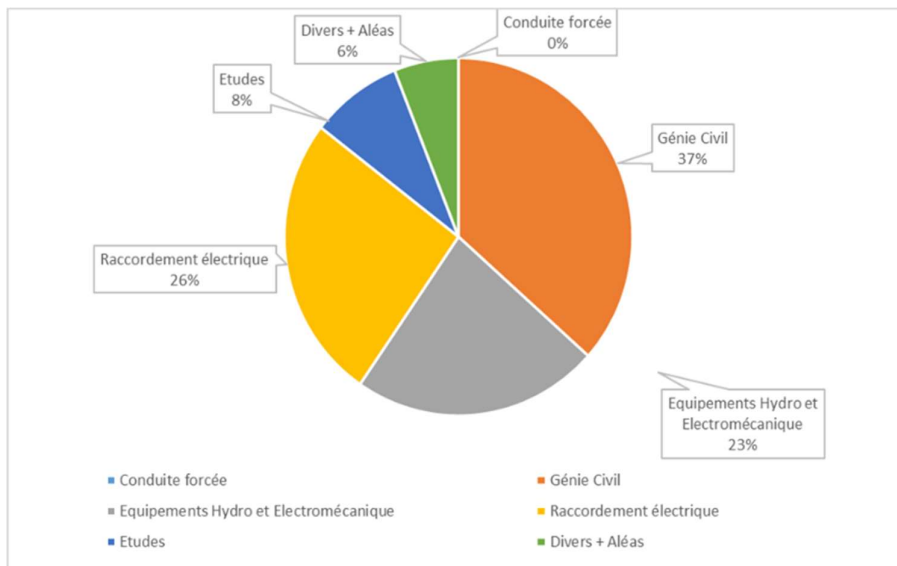


Figure 25: Investissement pour le site 51- Briesses R4020

Le prix de la conduite forcée n'est pas pris en compte puisqu'elle est déjà existante. Ce sont les équipements hydro et électromécaniques, le génie civil et le raccordement électrique qui constituent la plus grande part de l'investissement.

En considérant la CI, le coût total de l'installation est de 97'500 CHF. Pour une puissance électrique de 11.5 kW, le coût moyen revient à 8.5 CHF/W.

Pour la rentabilité, une étude d'influence sur le prix de vente a été faite à l'aide du Tableau 26.

Les calculs ont été faits avec un prix de revente du kWh de 15 ct/kWh, 20 ct/kWh et 22.1 ct/kWh. 22.1 ct/kWh est un prix permettant d'avoir à la fin un TRI de 4.5 % en 25 ans, ce qui est le standard des projets de OIKEN. On peut remarquer qu'avec un prix de revente de 15 et de 20 ct/kWh, l'installation n'est pas rentable. A 22.1 ct/kWh elle l'est. Le prix de revient statique est de 17.89 ct/kWh pour cette installation. De plus le retour sur investissement se trouve en dessous de 20 ans.

Calcul économique		15	20	OIKEN
Puissance hydraulique	kW	15.02	15.02	15.02
Investissement total	CHF	195 060.00	195 060.00	195 060.00
Subvention	CHF	97 530.00	97 530.00	97 530.00
Frais globaux annuels	%	2%	2%	2%
	CHF/an	1 950.60	1 950.60	1 950.60
Production annuelle	kWh/an	64 022.71	64 022.71	64 022.71
Prix de vente	cts/kWh	15	20	22.1
Chiffre d'affaires brut	CHF/an	9 603.41	12 804.54	14 149.02
Durée d'amortissement projet	an	25	25	25
Taux d'intérêt	%	0.03	0.03	0.03
Annuité constante	%	0.057	0.057	0.057
Charges annuelles	CHF/an	7 551.54	7 551.54	7 551.54
Bénéfice annuel	CHF/an	2 051.87	5 253.00	6 597.48
Prix de revient statique	cts/kWh	17.89	17.89	17.89
TRI sur 25 ans	%	-0.8%	2.4%	4.5%
VAN sur 25 ans	CHF	-61 800.55 CHF	-6 058.71 CHF	17 352.87 CHF
Retour sur investissement	an	48	19	15

Tableau 26: Tableau rentabilité site 51 - Briesses R4020

6.5.6. Différence entre analyse multicritère et approfondissement

Le coût d'investissement, les critères de l'énergie et du prix de revient de l'analyse multicritère vont être comparés avec les résultats de l'approfondissement.

Comparaison	Estimation	Approfondissement	Ecart [%]
Energie [kWh]	58913	64023	8.67
Prix de revient [cts/kWh]	18.42	17.89	2.97
Coût d'investissement [CHF]	85000	97530	12.85

Tableau 27: Différence entre estimation et approfondissement

L'écart est de moins de 15 % pour les 3 comparaisons. L'énergie est calculée une fois à partir de la courbe des débits classés journaliers et une fois à partir de la courbe des débits classés journaliers en prenant en compte la chute nette pour chaque débit. Pour le coût d'investissement et le prix de revient statique, la différence reste en dessous de 15 % avec des calculs empiriques lors de l'estimation.

7. Application sur la commune d'Anniviers

7.1. Description de la commune

Anniviers est une commune se situant en Suisse dans le canton du Valais. Elle est issue de la fusion des communes d'Ayer, de Chandolin, de Grimentz, de St-Jean, de St-Luc et de Vissoie. Elle a une population établie de 2702 habitants (2020), mais sa population varie en fonction des saisons et du tourisme. Anniviers est une vallée alpine qui s'étend de Sierre aux sommets de 4000 mètres. C'est la 2^{ème} plus grande commune du Valais avec une superficie de 243.4 km² [33].

Sur la Figure 26 on voit le réseau d'EP de la commune d'Anniviers.

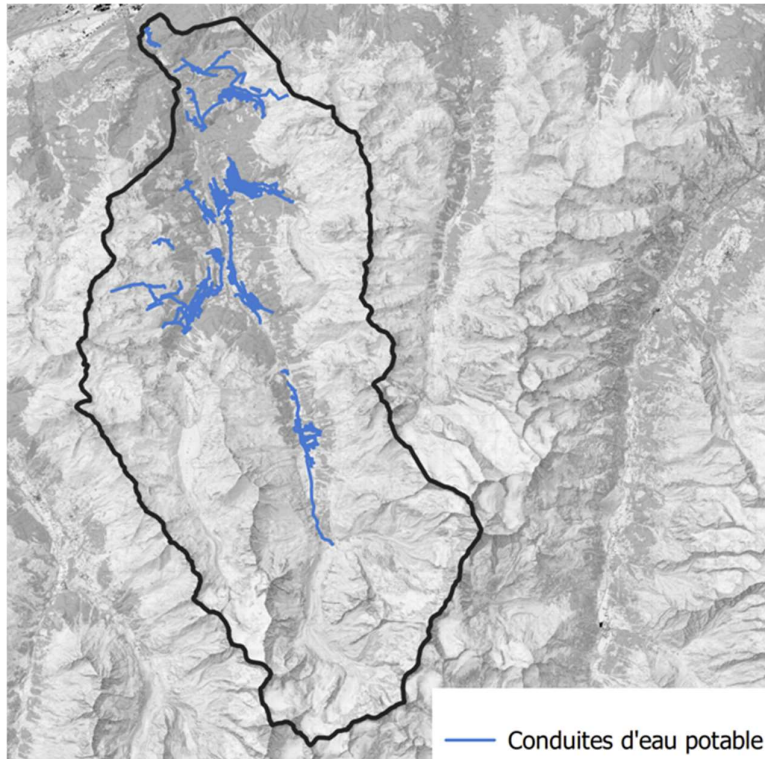


Figure 26: Aperçu de la commune d'Anniviers et de son réseau d'EP

7.2. Choix des sites potentiels

Les sites potentiels ont pu être sélectionnés à l'aide du fontainier et implémentés sur le logiciel QGIS. Les capteurs de débits n'étant pas disponibles, les méthodes des sources et du débit fictif (8 l/s) expliquées dans l'annexe 10.5 ont été appliquées.

7.3. Analyse multicritère

Les sites potentiels avec la méthode des débits fictifs (en jaune) et la méthode des sources (en vert) apparaissent dans le Tableau 28. Leurs emplacements sont montrés dans la Figure 27. Les rendements pour passer de la puissance hydraulique à la puissance électrique sont de 0.9 pour le générateur et 0.85 pour la turbine.

Les sites « Alimentation Vissoie - Rotsec R3100 » et « Prise d'eau Nava – La Combe R3100 » sont les seuls sites à remplacer plus d'un réducteur de pression. Ils vont donc devoir changer une partie ou la totalité de leurs conduites et un malus est ajouté au coût d'investissement.

Emplacement	Site	Débit moyen [m3/s]	Puissance hydraulique [kW]	Puissance électrique[kW]	Energie annuelle [kWh]	Coût investissement final[CHF]	Coût maintenance et exploitation[CHF]	Prix de revient [cts]
1	Alimentation Vissoie - RP	0.01140	12.14	9.29	46431	170000	3427	20.62
2	CR Guernerres - SP Ilot Bosquet	0.00356	4.72	3.61	18053	170000	1944	44.81
3	RP-Soussillon R1300	0.01000	25.67	19.64	98181	170000	5371	11.73
4	Alimentation Vissoie - Rotsecs R3400	0.01140	30.61	23.41	117069	194479	5969	11.10
5	Prise d'eau Nava - La Combe R3100	0.01313	56.54	43.26	216277	335616	8627	9.60
6	CR Freinze - Freinze R5500	0.01817	14.31	10.95	54744	170000	3783	18.14
7	Mini-Centrale de Fang	0.0409	202.89	155.21	776065	734305	18569	5.81
8	Freinze R5500 - RP 1760 msm	0.008	6.69	5.12	25604	170000	2398	33.37
9	La Combe R3100 - Le Stand R3200	0.008	6.14	4.70	23488	170000	2277	35.86
10	Defichia R4100 - RP	0.008	5.00	3.83	19139	170000	2014	42.63
11	Tsarva - RP	0.008	2.16	1.65	8255	170000	1216	89.18
12	RP-STEP	0.008	8.70	6.65	33266	170000	2806	26.91

Tableau 28: Récapitulatif des sites potentiels choisis

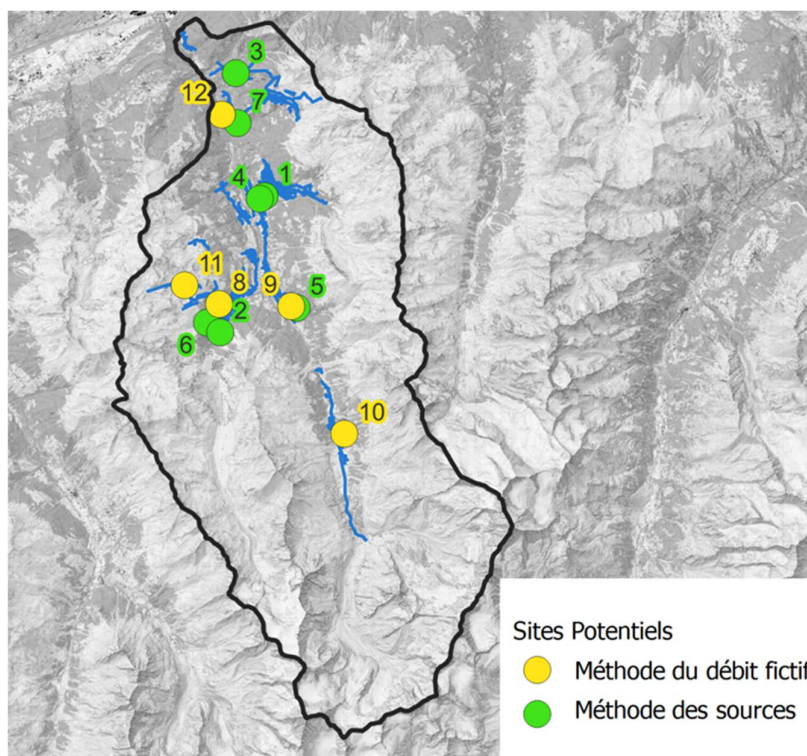


Figure 27: Emplacement des sites potentiels sur Anniviers

Les sites potentiels étant choisis, le calcul des critères ainsi que leur standardisation linéaire ont pu être effectués. La standardisation des critères donne les résultats suivants :

Site	Standardisation Prix de revient	Standardisation Energie	Standardisation Accès	Standardisation Transformateurs
Alimentation Vissoie - RP	7.69	0.60	9.77	6.27
CR Guernerer - SP Ilot Bosquet	4.97	0.23	9.67	9.94
RP-Soussillon R1300	8.68	1.27	9.21	8.05
Alimentation Vissoie - Rotsecs R3400	8.75	1.51	9.52	8.59
Prise d'eau Nava - La Combe R3100	8.92	2.79	8.21	7.78
CR Freinze - Freinze R5500	7.97	0.71	7.74	0.00
Mini-Centrale de Fang	9.35	10.00	9.19	8.82
Freinze R5500 - RP 1760 msm	6.26	0.33	8.52	7.48
La Combe R3100 - Le Stand R3200	5.98	0.30	9.88	7.13
Defichia R4100 - RP	5.22	0.25	9.89	7.63
Tsarva - RP	0.00	0.11	0.00	4.71
RP- STEP	6.98	0.43	9.93	9.04

Tableau 29: Résumé standardisation des critères

La matrice utilisée pour avoir la pondération des critères et le classement est la même que pour la solution 1 de la commune de Crans-Montana. C'est le Tableau 11.

Le résultat ressortant de l'analyse multicritère place le site de la centrale de Fang en 1^{ère} place. C'est bien la centrale déjà existante qui termine en 1^{ère} place et cette analyse valide ce choix.

Position	Site	Classement
1	Mini-Centrale de Fang	9.51
2	Prise d'eau Nava - La Combe R3100	6.39
3	Alimentation Vissoie - Rotsecs R3400	6.11
4	RP-Soussillon R1300	5.89
5	RP- STEP	5.15
6	Alimentation Vissoie - RP	5.11
7	La Combe R3100 - Le Stand R3200	4.48
8	Freinze R5500 - RP 1760 msm	4.47
9	CR Guernerer - SP Ilot Bosquet	4.40
10	Defichia R4100 - RP	4.24
11	CR Freinze - Freinze R5500	4.22
12	Tsarva - RP	0.63

Tableau 30: Classement final de l'analyse

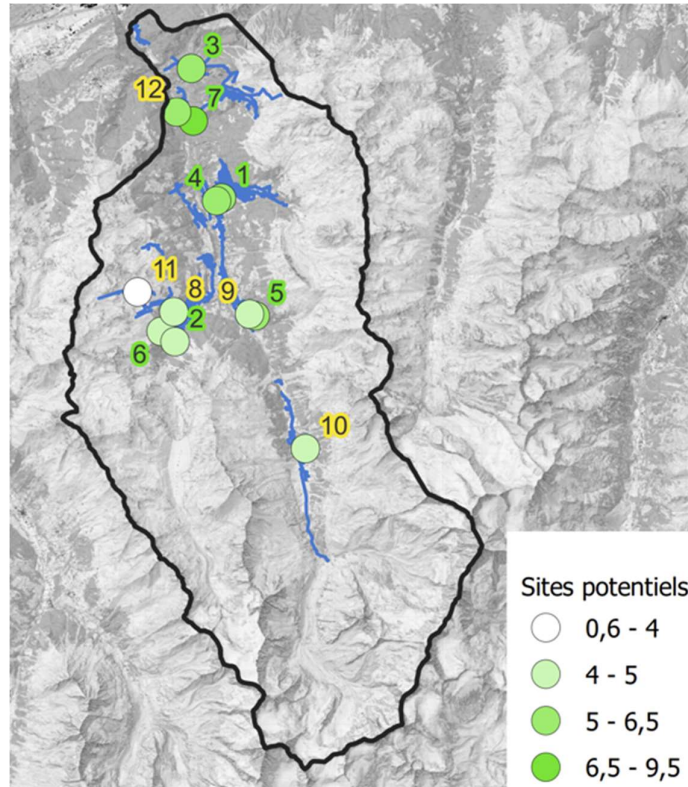


Figure 28: Position des sites potentiels avec couleurs en fonction du classement

7.4. Analyse sensibilité des critères

L'analyse de sensibilité pour la commune d'Anniviers reprend les mêmes matrices que pour la commune de Crans-Montana. Les matrices sont représentées dans le Tableau 17, Tableau 18, Tableau 19 et Tableau 20.

Les matrices ressortent toutes une pondération de critères différente et un classement des sites potentiels a été établi pour chacune d'entre elles. Le Tableau 31 montre les classements finaux. Pour toutes les pondérations, la position des quatre premiers sites ne varie pas. Des variations interviennent au milieu du classement, lorsque les sites sont proches. Pour les premiers sites, l'analyse n'est pas sensible à la variation de pondération des critères. Le site de la centrale de Fang qui est une centrale déjà existante finit en 1^{ère} place.

Matrice 1			Matrice 2			Matrice 3			Matrice 4		
Position	Site	Classement	Position	Site	Classement	Position	Site	Classement	Position	Site	Classement
1	Mini-Centrale de Fang	9.51	1.0	Mini-Centrale de Fang	9.56	1	Mini-Centrale de Fang	9.64	1	Mini-Centrale de Fang	9.45
2	Prise d'eau Nava - La Combe R3100	6.39	2.0	Prise d'eau Nava - La Combe R3100	6.21	2	Prise d'eau Nava - La Combe R3100	5.34	2	Prise d'eau Nava - La Combe R3100	7.20
3	Alimentation Vissoie - Rotsecs R3400	6.11	3.0	Alimentation Vissoie - Rotsecs R3400	5.78	3	Alimentation Vissoie - Rotsecs R3400	4.79	3	Alimentation Vissoie - Rotsecs R3400	6.99
4	RP-Soussillon R1300	5.89	4.0	RP-Soussillon R1300	5.58	4	RP-Soussillon R1300	4.56	4	RP-Soussillon R1300	6.81
5	RP-STEP	5.15	5.0	Alimentation Vissoie - RP	4.79	5	RP-STEP	3.83	5	Alimentation Vissoie - RP	5.97
6	Alimentation Vissoie - RP	5.11	6.0	RP-STEP	4.67	6	Alimentation Vissoie - RP	3.82	6	RP-STEP	5.82
7	La Combe R3100 - Le Stand R3200	4.48	7.0	CR Freinze - Freinze R5500	4.26	7	La Combe R3100 - Le Stand R3200	3.32	7	CR Freinze - Freinze R5500	5.35
8	Freinze R5500 - RP 1760 msm	4.47	8.0	Freinze R5500 - RP 1760 msm	4.08	8	Freinze R5500 - RP 1760 msm	3.30	8	Freinze R5500 - RP 1760 msm	5.10
9	CR Guernes - SP Ilot Bosquet	4.40	9.0	La Combe R3100 - Le Stand R3200	4.04	9	CR Guernes - SP Ilot Bosquet	3.28	9	La Combe R3100 - Le Stand R3200	5.04
10	Defichia R4100 - RP	4.24	10.0	CR Guernes - SP Ilot Bosquet	3.80	10	CR Freinze - Freinze R5500	3.14	10	CR Guernes - SP Ilot Bosquet	4.72
11	CR Freinze - Freinze R5500	4.22	11.0	Defichia R4100 - RP	3.74	11	Defichia R4100 - RP	3.14	11	Defichia R4100 - RP	4.65
12	Tsarva - RP	0.63	12	Tsarva - RP	0.44	12	Tsarva - RP	0.51	12	Tsarva - RP	0.48

Tableau 31: Classement des différentes matrices

7.5. Améliorations pour la commune d'Anniviers

Pour avoir un classement précis, il faudrait avoir des mesures de débits sur les sites potentiels. Toutefois les sites utilisant la méthode des sources donnent une plus grande précision sur le débit. Sur les sites utilisant la méthode du débit fictif et se classant à une bonne position dans l'analyse, il faudrait effectuer des mesures de débits. C'est à ces conditions qu'un approfondissement pourrait être effectué.

8. Conclusion

L'objectif de ce projet consistait en la création d'une méthode multicritère permettant d'analyser différents sites potentiels pour le micro-turbinage sur les réseaux d'eau potable de communes.

Les communes traitées dans ce travail sont la commune de Crans-Montana et la commune d'Anniviers.

La plupart des sites potentiels ne prennent la place que d'un réducteur de pression, afin de ne pas avoir à prendre en charge le coût supplémentaire de la conduite.

Le but de ce projet est atteint, car ce travail permet d'avoir une vue d'ensemble sur les sites potentiels au niveau communal. Ce classement offre une base de réflexion pour l'aménagement hydroélectrique du réseau d'eau. Les critères choisis visent à représenter au mieux et de manière efficace les parties financière, énergétique et géographique lors de l'analyse multicritère. Cette étude quantitative met en évidence les meilleurs sites en les classant à partir de ces critères. Une analyse plus approfondie est nécessaire pour les meilleurs sites.

La comparaison entre l'étude quantitative et l'étude approfondie du meilleur site de l'analyse a donné une différence maximale de 15 % jugée acceptable. Afin de valider ce résultat, il faudrait réaliser l'étude approfondie et la comparaison de différents sites.

Cependant le manque de données au niveau des débits amène une imprécision. En effet lorsqu'il n'y a pas de données de débits, un débit fictif est supposé. Il n'est pas possible de faire des courbes de débits classés et le résultat final du classement peut être faussé.

Les améliorations envisagées pour cette étude sont les suivantes :

- Des mesures de débits pour tous les sites potentiels, afin de pouvoir calculer les critères de la même manière pour chaque site.
- La mise en place d'un critère prenant en compte l'année de construction des conduites. Ce critère permettrait de rendre intéressant des sites potentiels qui remplaceraient plusieurs réducteurs de pression.
- Une automatisation de l'analyse multicritère en créant une extension sur QGIS. Cela permettrait de travailler uniquement sur le logiciel QGIS et d'avoir toutes les informations au même endroit.

9. Références

- [1] OFEN, « Statistique Suisse de l'électricité 2019 ». 2019.
- [2] Alpiq, « Centrale de Ryburg-Schwörstadt ». <https://www.alpiq.ch/fr/production-denergie/centrales-hydroelectriques/centrales-au-fil-de-leau/ryburg-schwoerstadt> (consulté le 24 juin 2022).
- [3] « Unternehmen », *Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt AG*. <https://www.krsag.ch/unternehmen/> (consulté le 24 juin 2022).
- [4] « Centrale à accumulation de Blenio ». <https://www.alpiq.ch/fr/production-denergie/centrales-hydroelectriques/centrales-a-accumulation/blenio> (consulté le 24 juin 2022).
- [5] « Visites et vidéos ». <http://www.ofible.ch/index.php/it/visite> (consulté le 24 juin 2022).
- [6] « La Centrale - Nant de Drance ». <https://www.nant-de-drance.ch/la-centrale> (consulté le 24 juin 2022).
- [7] « Nant de Drance », *BG Ingénieurs Conseils*. <https://bg-21.com/fr/portfolio/nant-de-drance-la-centrale-de-pompage-turbinage-en-valais-pour-la-stabilisation-du-reseau-europeen/> (consulté le 24 juin 2022).
- [8] OFEN, « Potentiel hydroélectrique de la Suisse: Évaluation du potentiel de développement de la force hydraulique dans le cadre de la Stratégie Énergétique 2050 ». 2019.
- [9] Hedi Feibel & Martin Bölli, « Swiss Small Hydro: "Vue d'ensemble de la petite hydraulique et de ses acteurs" ». 2020.
- [10] Pronovo, « Directives relatives au financement des frais supplémentaires (FFS) ». 2020.
- [11] Ribi Felix & Strupp Christian & Perch Nielsen Sabine, « Swiss Small Hydro: "Aspects économiques" ». 2020.
- [12] Suisse Energie, « Newsletter petites centrales hydrauliques ». 2021.
- [13] OEnER, « Ordonnance sur l'encouragement de la production d'électricité issue d'énergies renouvelables ». 2022.
- [14] Thomas Gross, « Swiss Small Hydro: "Aspects techniques" ». 2019.
- [15] M. Heynen & J-P Sigrist, « Guide pour l'implantation de petites centrales hydrauliques dans les communes valaisannes ». 2009.
- [16] T. Bühler, « Turbinage dans les réseaux d'eau ». 2007.
- [17] Cécile Münch-Alligné, « Cours Hydraulique : Aide mémoire ».
- [18] Cécile Münch-Alligné, « Cours hydraulique ». 2021.
- [19] Cécile Münch-Alligné & Shadya Martignoni, « Cours aménagement hydraulique: rentabilité ». 2021.
- [20] Raymond Chenal, « Evaluation du coût de construction d'une petite centrale hydro-électrique nouvelle et complète et du prix de revient (P< 1'000 kW) ». 2000.
- [21] Vonroll - hydro, « Tuyaux et raccords ». 2022.
- [22] I. Samora, « Energy Recovery Using Micro-Hydropower Technology in Water Supply Systems: The Case Study of the City of Fribourg ». 2016.
- [23] G. Knipping, « Formation bâtiment durable; Financement et rentabilité ». 2017.
- [24] OFEN, « Information sur la planification, la construction et l'exploitation ». 2012.
- [25] ITECO Ingenieurunternehmung AG, « Trinkwasserkraftwerk Mettental Sachseln ». 2005.
- [26] A. Schärli, « Décider sur plusieurs critères: Panorama de l'aide à la décision multicritère ». 1985.
- [27] M. Chevallier, « Mise en œuvre d'un outil SIG et d'un processus d'analyse multicritère semi-automatisé pour l'aménagement du territoire : application dans le cadre de la révision du SCoT des Vosges Centrales ». 2016.
- [28] Amir Nafi & Caty Wery, « Aide à la décision multicritère : introduction aux méthodes d'analyse multicritère de type ELECTRE ». 2010.

- [29] J. Conjard, « Mise en place d'une méthode d'identification des potentielles sources de matières en suspension d'un bassin versant : application au bassin versant du Rhône ». 2019.
- [30] Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, « Tutoriel QGIS ». En ligne. [En ligne]. Disponible sur: <https://sigea.educagri.fr/tutos-sig/tutos-qgis#c410>
- [31] Shadya Martignoni & Laurent Smati & Vincent Denis & Cécile Münch, « Un stockage local et compétitif de l'énergie ». 2018.
- [32] Commune de Crans-Montana, « Site de la commune de Crans-Montana ». 2022.
- [33] Commune d'Anniviers, « Site de la commune d'Anniviers ». 2022.
- [34] Office fédéral des questions conjoncturelles, « Le choix, le dimensionnement et les essais de réception d'une mini-turbine. » 1995.
- [35] Wikipedia, « Analytic hierarchy process – leader example », *Wikipédia*.
- [36] Bureau d'ingénieur Simon Crettaz Sarl, « Eau potable Anniviers ». 2010.

10. Annexes

10.1. Pertes dans une petites centrale hydraulique

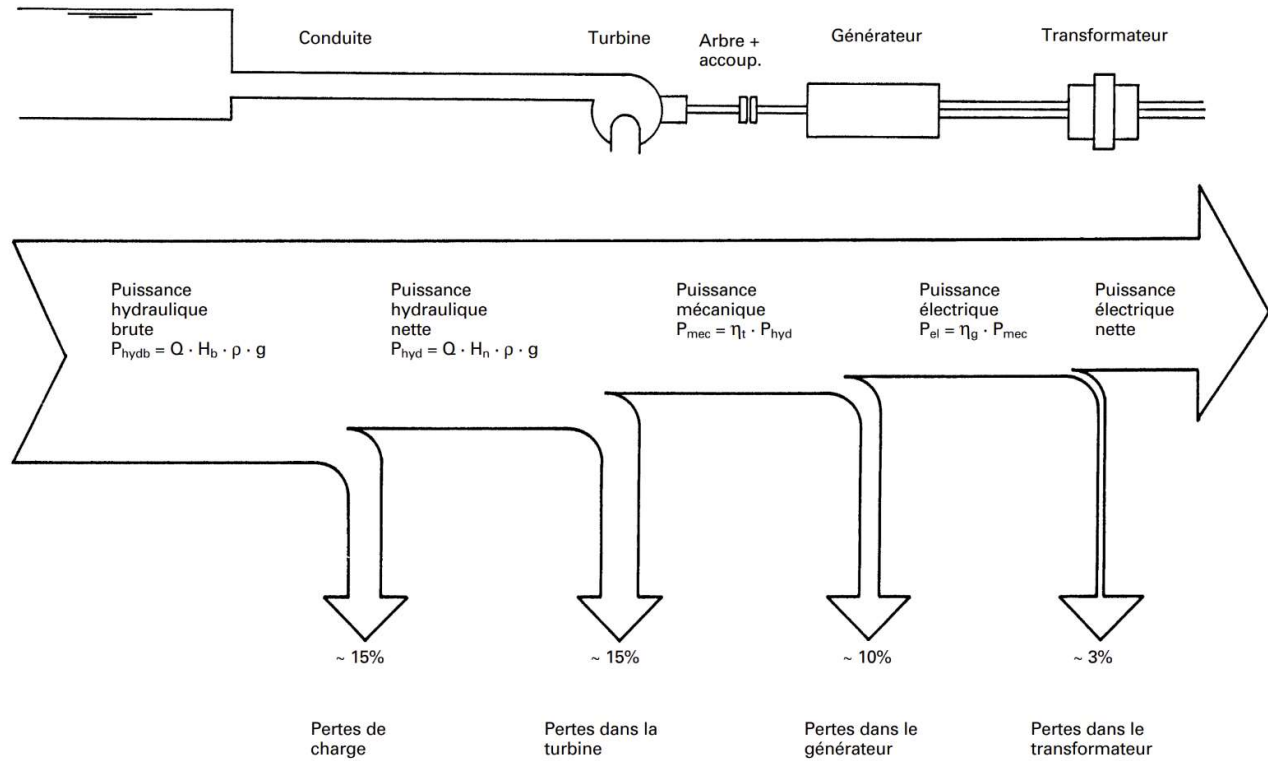


Figure 29: Pertes dans une PCH [34]

10.2. Explication fiche Excel rentabilité

Calcul économique		Variante 1	
Puissance hydraulique	kW		1
Investissement total	CHF		2
Subvention	CHF		3
Frais globaux annuels	%		4
	CHF/an		
Production annuelle	kWh/an		5
Prix de vente	cts/kWh		6
Chiffre d'affaires brut	CHF/an		7
Durée d'amortissement projet	ans		8
Taux d'intérêt	%		9
Annuité constante	%		10
Charges annuelles	CHF/an		11
Bénéfice annuel	CHF/an		12
Prix de revient statique	cts/kWh		13
TRI sur 25 ans	%		14
VAN sur 25 ans	CHF		15
Retour sur investissement [ans]	an		16

Tableau 32: Fiche Excel rentabilité [19]

Point 1 : La puissance est la puissance hydraulique de l'installation en kW.

Point 2 : L'investissement total est le coût d'investissement de l'installation sans prendre en compte la subvention.

Point 3 : Subvention est la subvention donnée pour le projet

Point 4 : Les frais globaux annuels sont calculés de la manière suivante :

$$\text{Frais globaux} = \% \text{ du coût d'exploitation et entretien} \cdot \text{coût d'investissement subventionné}$$

Avec:

$$\% \text{ du coût d'exploitation et entretien} = 2\% \text{ (choisi selon le Tableau 33)}$$

Frais de fonctionnement	Valeurs indicatives en % des coûts d'investissement
Coûts d'exploitation et d'entretien	1 – 3.5 %
Coût du capital	5 – 8 %
Taxes publiques	0.5 – 2 %

Tableau 33: Frais de fonctionnement en fonction du coup d'investissement [11]

Point 5 : Production annuelle est l'énergie produite en une année.

Point 6 : Le prix de vente est le prix auquel le kWh est vendu.

Point 7 : Le chiffre d'affaires brut se trouve selon la formule suivante :

$$\text{Chiffre d'affaires} = E \cdot P_{kWh}$$

Avec:

$$E = \text{Energie annuelle [kWh]}$$

$$P_{kWh} = \text{Prix du kWh [CHF/kWh]}$$

Point 8 : La durée d'amortissement du projet est fixée à 25 ans selon les standards d'OIKEN.

Point 9 : Le taux d'intérêt est fixé à 3 %.

Point 10 : L'annuité constante prend en compte le taux d'intérêt et la durée d'amortissement.

Point 11 : La charge annuelle est calculée de la manière suivante :

$$Charge\ annuelle = Frais\ globaux + (annuité \cdot coût\ d'investissement\ total)$$

Point 12 : Le bénéfice annuel est calculé de la manière suivante :

$$Bénéfice\ annuel = Chiffre\ d'affaires - Charge\ annuelle$$

Point 13 : Le prix de revient statique est calculé de la manière suivante :

$$Prix\ de\ revient\ statique = \frac{C - S}{D} + C_a \cdot E \cdot 100$$

Avec:

C = Coût d'investissement [CHF]

C_a = Charge annuelle [CHF]

S = Subvention [CHF]

D = Durée d'amortissement [an]

E = Energie annuelle [kWh]

Point 14 : Le TRI est calculé à l'aide la fonction IRR sur Excel. Elle prend en compte l'investissement de départ ainsi que les bénéfices sur 25 ans.

Point 15 : La VAN est calculée à l'aide de la fonction NPV, elle prend également en compte l'investissement de départ ainsi que les bénéfices sur 25 ans.

Bénéfice	année	Bénéfice	année
-100 110.00 CHF	0	-100 110.00 CHF	0
6 766.41 CHF	1	6 766.41 CHF	1
6 766.41 CHF	2	6 766.41 CHF	2
6 766.41 CHF	3	6 766.41 CHF	3
6 766.41 CHF	4	6 766.41 CHF	4
6 766.41 CHF	5	6 766.41 CHF	5
6 766.41 CHF	6	6 766.41 CHF	6
6 766.41 CHF	7	6 766.41 CHF	7
6 766.41 CHF	8	6 766.41 CHF	8
6 766.41 CHF	9	6 766.41 CHF	9
6 766.41 CHF	10	6 766.41 CHF	10
6 766.41 CHF	11	6 766.41 CHF	11
6 766.41 CHF	12	6 766.41 CHF	12
6 766.41 CHF	13	6 766.41 CHF	13
6 766.41 CHF	14	6 766.41 CHF	14
6 766.41 CHF	15	6 766.41 CHF	15
6 766.41 CHF	16	6 766.41 CHF	16
6 766.41 CHF	17	6 766.41 CHF	17
6 766.41 CHF	18	6 766.41 CHF	18
6 766.41 CHF	19	6 766.41 CHF	19
6 766.41 CHF	20	6 766.41 CHF	20
6 766.41 CHF	21	6 766.41 CHF	21
6 766.41 CHF	22	6 766.41 CHF	22
6 766.41 CHF	23	6 766.41 CHF	23
6 766.41 CHF	24	6 766.41 CHF	24
6 766.41 CHF	25	6 766.41 CHF	25
TRI	4.5%	VAN	17 714.57 CHF

Tableau 34: Exemple formules TRI et VAN sur 20 ans sur Excel

Point 16 : Le retour sur investissement est calculé de la manière suivante :

$$Retour\ sur\ investissement = \frac{Coût\ investissement\ total}{Bénéfice\ annuelle}$$

10.3. Différence entre calcul d'investissement empirique et fiche Excel

Le calcul de l'investissement et le critère du prix de revient se font à l'aide de formules empiriques venant de MhyLab [20]. Elles fonctionnent pour des puissances électriques entre 20 et 1000 kW. En dessous de 20 kW, l'hypothèse est que la puissance n'a pas de conséquence sur le prix de l'installation et donc que celui-ci est plafonné au prix d'une installation à 20 kW [20].

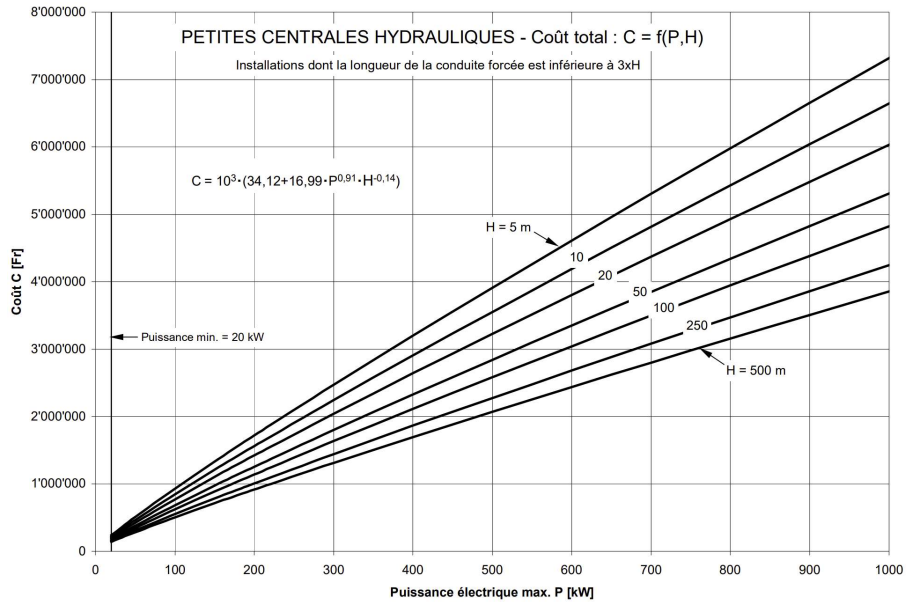


Figure 30: Graphique du coût d'investissement selon la puissance de l'installation [20]

Le prix minimal d'une installation est donc :

$$C = 10^3 \cdot (34.12 + 16.99 \cdot P^{0.91} \cdot H_n^{-0.14}) = 170'635 = \sim 170'000 \text{ CHF}$$

Lors de l'approfondissement des meilleurs sites du classement, la fiche Excel venant du cours d'aménagement hydraulique est utilisée [19]. Pour vérifier la précision de la formule et l'hypothèse de la formule empirique, des sites sur Crans-Montana ont été utilisés comme tests. Le rendement du générateur et de la turbine est de 0.9 et 0.85 pour ce test. Les chutes nettes ne prennent pas en compte la pression nécessaire à la sortie de la turbine pour alimenter le réseau d'eau.

Sites	Débit d'équipement [m3/s]	Chute nette [m]	Puissance hydraulique [kW]	Puissance électrique [kW]	Coût investissement formule [CHF]
R4010-1	0.0182	135.99	24.14	18.47	170000
R4010-51	0.0182	98.29	17.45	13.35	170000
R4020-R4030	0.0116	97.49	11.04	8.45	170000
R4030-58	0.0079	128.84	9.91	7.58	170000
R3060-R3070	0.0051	128.70	6.41	4.90	170000

Tableau 35: Coût d'investissement selon la formule empirique pour les sites de Crans-Montana

Pour remplir la fiche Excel, seuls la dénivellation et le débit d'équipement ont été modifiés entre chaque site. Un diamètre de 200 mm a été utilisé pour la conduite. Le reste ne change pas et est configuré de la manière suivante :

Étendue des travaux				
2.01	Travaux importants		non	
Conduite forcée				
4.01	A construire (oui/non)		non	
4.02	Type de conduite			
4.03	Longueur conduite (m)			
4.04	Diamètre conduite (mm)			
4.05	perte de charge (m)			
4.06	Installation			
4.07	Coefficient de difficulté d'accès (facil=1; difficil=1.5)			
Mise d'eau, dessableur, grille, chambre de mise en charge				
5.01	Nombre		0.00	
5.02	Dessableur (oui/non)		non	
5.03	Coefficient de difficulté d'accès (facil=1; difficil=1.5)		1.00	
Vanne de maintenance				
6.01	Nombre		1.00	
6.02	Coefficient de difficulté d'accès (facil=1; difficil=1.5)		1.10	
Local				
7.01	Construction (oui/non)		oui	
7.02	Dimensions connues ?		non	
7.03	L (m)			
7.04	l (m)			
7.05	Coefficient de difficulté d'accès (facil=1; difficil=1.5)		1.20	
Turbine (ou PAT)				
8.01	Turbine (oui/non)		oui	
8.02	Type de turbine		Pelton	
8.03	axe		Vertical	
8.04	nombre de machine		1.00	
8.05	Vitesse de rotation (tr/min)		3 000.00	
8.06	Diamètre Roue (mm)			
8.07	Nombre d'étages			
8.08	Nombre d'ouies			
8.09	Puissance moteur électrique requise (kW)			
8.1	Coefficient de difficulté d'accès (facil=1; difficil=1.5)		1.10	
Vanne de garde				
10.01	Type de vanne		Papillon	
10.02	Coefficient de difficulté d'accès (facil=1; difficil=1.5)		1.10	
Connexion au réseau				
11.01	Construction d'un local (oui/non)		non	
11.02	Distance par rapport au point de raccordement MT/BT(m)		200.00	
11.03	Tube au même endroit que la conduite d'eau (oui/non)		non	
11.04	Tension de raccordement (V)		400.00	
11.05	Transformateur		non	
11.06	Coefficient de difficulté d'accès (facil=1; difficil=1.5)		1.20	
Autres				
12.01	Transport		5.00%	
12.02	Montage + mise en service		3.00%	

Tableau 36: Configuration de la fiche pour le test des sites potentiels [19]

Les résultats sont les suivants :

Sites	Débit d'équipement [m3/s]	Chute nette [m]	Puissance hydraulique [kW]	Puissance électrique [kW]	Coût investissement formule [CHF]	Coût investissement Excel [CHF]	Différence [%]
R4010-1	0.0182	135.99	24.14	18.47	170000	192980	11.91
R4010-51	0.0182	98.29	17.45	13.35	170000	185260	8.24
R4020-R4030	0.0116	97.49	11.04	8.45	170000	176300	3.57
R4030-58	0.0079	128.84	9.91	7.58	170000	174710	2.70
R3060-R3070	0.0051	128.70	6.41	4.90	170000	169570	0.25

Tableau 37: Ecart entre formule empirique et fiche Excel

L'écart entre la formule empirique et la fiche Excel se situe à moins de 12% pour tous les sites de Crans-Montana. Cette formule permet donc d'estimer rapidement une PCH.

10.4. Exemple AHP : Choix d'un leader

Une reproduction de l'exemple de Wikipédia a été repris sur Excel [35]. La standardisation de cet exemple se fait à l'aide d'une comparaison par paires et non avec une standardisation linéaire comme dans ce travail.

L'objectif, les critères ainsi que les alternatives sont introduits par la Figure 31.

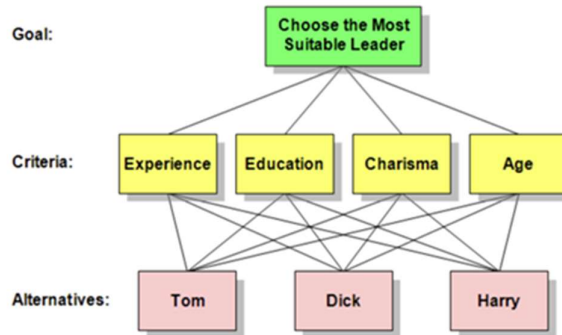


Figure 31: Critères et alternatives de l'exemple [35]

10.4.1. Standardisation des alternatives à l'aide de la méthode de comparaison par paires

Les alternatives sont comparées par paires en fonction du critère. Une fois le tableau rempli, il faut effectuer la normalisation de celles-ci en divisant chaque terme par la somme de la colonne. Le critère de l'expérience est utilisé pour l'exemple.

Alternatives	Tom	Dick	Harry
Tom	1	1/4	4
Dick	4	1	9
Harry	1/4	1/9	1
Somme	5.25	1.36	14.00

Tableau 38: Comparaison par paires du critère expérience

La normalisation s'effectue à l'aide de la formule suivante :

$$A_{ij}N = \frac{A_{ij}}{\sum_{i=1}^m A_{ij}}$$

Avec:

$A_{ij}N$ = Terme normalisé

A_{ij} = Terme non normalisé

Alternatives	Tom	Dick	Harry
Tom	0.190	0.184	0.286
Dick	0.762	0.735	0.643
Harry	0.048	0.082	0.071

Tableau 39: Matrice normalisée pour le critère expérience

Le poids de chaque alternative peut être ressorti en effectuant la moyenne de chaque ligne du Tableau 39. La formule est la suivante :

$$W = \frac{\sum_{j=1}^m A_{ij}N}{m}$$

Avec:

$A_{ij}N$ = Terme normalisé

m = Nombre de critères

W = Vecteur de standardisation des alternatives

Alternatives	Tom	Dick	Harry	W
Tom	0.190	0.184	0.286	0.220
Dick	0.762	0.735	0.643	0.713
Harry	0.048	0.082	0.071	0.067

Tableau 40: Standardisation des alternatives pour le critère expérience

Afin de mettre en place le facteur de cohérence, il faut calculer λ , IC et IA. Pour lambda, Il faut calculer le vecteur w_s faisant le produit entre la matrice de Saaty non normalisée et le vecteur du poids des critères.

$$w_s = A \cdot W$$

Avec:

w_s = Vecteur w_s

A = Matrice de Saaty non normalisée

W = Vecteur du poids des critères

Le paramètre λ est trouvé en effectuant la somme du vecteur de cohérence divisé par le nombre d'alternatives. Sa valeur doit être supérieure au nombre de critères.

$$C = w_s \cdot \frac{1}{W}$$

$$\lambda = \frac{\sum_{j=1}^m C}{m}$$

Avec:

C = Vecteur de cohérence

λ = Paramètre

Vecteur Ws	Vecteur C
0.666	3.027
2.195	3.078
0.201	3.007
LAMBDA	3.037

Tableau 41: Résultat des vecteurs Ws et C pour le critère expérience

IC et IA peuvent être calculés :

$$IC = \frac{\lambda - m}{m - 1} = 0.0186$$

L'indice aléatoire dit IA permet de pondérer IC en fonction du nombre de critères que l'analyse possède. Selon le Tableau 8 qui est le récapitulatif de l'indice aléatoire.

$$IA = 0.58$$

Grâce à ces deux facteurs, le ratio de cohérence peut être trouvé de la manière suivante :

$$R_c = \frac{IC}{IA} = 0.032 < 0.1$$

Voici les résultats finaux des alternatives pour les 3 autres critères :

Alternatives	Tom	Dick	Harry	W
Tom	1	3	1/5	0.193
Dick	1/3	1	1/7	0.083
Harry	5	7	1	0.724
Somme	6.333	11.000	1.343	1.000
Facteur cohérence	0.057			

Tableau 42: Standardisation des alternatives pour le critère éducation

Alternatives	Tom	Dick	Harry	W
Tom	1	5	9	0.735
Dick	1/5	1	4	0.199
Harry	1/9	1/4	1	0.065
Somme	1.311	6.250	14.000	1.000
Facteur cohérence		0.062		

Tableau 43: Standardisation des alternatives pour le critère charisme

Alternatives	Tom	Dick	Harry	W
Tom	1	1/3	5	0.267
Dick	3	1	9	0.669
Harry	1/5	1/9	1	0.064
Somme	4.200	1.444	15.000	1.000
Facteur cohérence		0.025		

Tableau 44: Standardisation des alternatives pour le critère âge

10.4.1. Pondération des critères à l'aide de la méthode de comparaison par paires

Une fois la standardisation des alternatives selon les critères effectuée, une comparaison par paires entre les critères est faite. Les calculs sont les mêmes que pour la standardisation des alternatives, mais au lieu de comparer les alternatives, on compare les critères.

Critères	Expérience	Education	Charisme	Age	W
Expérience	1	4	3	7	0.540
Education	1/4	1	1/3	3	0.131
Charisme	1/3	3	1	5	0.272
Age	1/7	1/3	1/5	1	0.057
Somme	1.726	8.333	4.533	16	1.000
Facteur de cohérence		0.036			

Tableau 45: Pondération des critères selon l'objectif

10.4.2. Classement final des alternatives

Il suffit de calculer la standardisation de chaque alternative selon la pondération de son critère et de faire la somme des 4 critères pour chaque alternative.

$$\text{Classement final} = \text{Alternative} \cdot \text{Pondération Critère}$$

Alternative	Experience	Education	Charisme	Age	Classement
Tom	0.119	0.025	0.200	0.015	0.359
Dick	0.385	0.011	0.054	0.038	0.488
Harry	0.036	0.095	0.018	0.004	0.153
Somme	0.540	0.131	0.272	0.057	1.000

Tableau 46: Classement des alternatives

Le classement est également fait avec l'extension sur le logiciel QGIS

Alternative	Experience	Education	Charisme	Age	geoWSM
Tom	0,22	0,193	0,735	0,267	1,7440
Dick	0,067	0,724	0,065	0,064	1,0000
Harry	0,713	0,083	0,199	0,669	2,2000

Figure 32: Pondération et classement des alternatives selon les critères sur QGIS

Priority with Respect to					
Candidate	Experience	Education	Charisma	Age	Goal
Tom	0.119	0.024	0.201	0.015	0.358
Dick	0.392	0.010	0.052	0.038	0.492
Harry	0.036	0.093	0.017	0.004	0.149
Totals:	0.547	0.127	0.270	0.056	1.000

Tableau 47: Classement des alternatives sur Wikipédia [35]

Les écarts entre les résultats Excel et Wikipédia se situent en dessous de 3%. Alors qu'entre l'extension QGIS et Wikipédia, tous les écarts se situent à plus de 50%. Cette extension ne calcule pas de la manière désirée.

Ecart entre résultats Excel, Wikipédia et Extension QGIS					
Alternatives	Excel	Wikipédia	Extension	Ecart Excel Wikipedia [%]	Ecart Extension Wikipedia [%]
Tom	0.359	0.358	1.74	0.30	79.47
Dick	0.488	0.492	1.00	0.76	50.80
Harry	0.153	0.149	2.20	2.38	93.23
Somme	1	1	4.94		

Tableau 48: Ecart entre résultats Excel, Wikipédia et extension QGIS

10.5. Débit et calcul de l'énergie sans les courbes de débits classés

Lorsque les capteurs de débits ne sont pas disponibles et qu'il n'est pas possible de créer les courbes de débits classés, trois hypothèses sont avancées. La 1^{ère} est le calcul en prenant en compte la population. La 2^{ème} est de faire la moyenne des mesures prises aux sources. La 3^{ème} est de prendre un débit fictif de 8 l/s, considéré comme le débit minimal pour qu'un site soit intéressant.

10.5.1. Méthode du calcul du débit sur la population

Ce calcul prend en compte la population en aval du site potentiel et une moyenne de consommation de 300 l/j par personne. Il faudrait également avoir les informations du fontainier sur quelle conduite alimente quels consommateurs.

Cette méthode n'est pas conseillée dans ce projet puisque de nombreux facteurs restent inconnus comme :

- La population touristique sur les différents sites
- La consommation journalière des personnes (EP et irrigation)
- Le rendement des réseaux d'eau potable (Entre 10 et 80%)

10.5.2. Méthode des mesures prises aux sources

Sur la commune d'Anniviers, des mesures ont été prises à différentes sources [36]. Il est possible d'effectuer la moyenne de toutes les mesures de la source, afin d'obtenir un débit moyen. Cette méthode prend l'hypothèse que tout le débit de la source peut être turbiné. En prenant pour exemple la centrale de Fang qui trouve sa source à Chandolin, le débit moyen de la source est de 40.9 l/s, alors que le débit nominal de la turbine installée est de 43.5 l/s.

10.5.3. Méthode du débit fictif

S'il n'y a pas de mesures prises aux sources disponibles, un débit fictif de 8 l/s est utilisé pour insérer le site dans l'analyse multicritère. Cela permet de le faire apparaître dans le classement. Si le site est bien classé avec un débit de 8 l/s, il serait conseillé de faire des mesures réelles sur ce débit avant de commencer une analyse de potentiel du site.

10.5.4. Conclusion

Dans ce travail lorsque les mesures de capteurs ne sont pas disponibles, c'est la méthode des mesures prises aux sources qui va être utilisée. Si elle n'est pas disponible, ce sera la méthode du débit fictif qui sera utilisée. Il faut tout de même prendre en compte que ces deux méthodes fournissent une estimation des débits et que ces débits peuvent ne pas être corrects.

Le calcul de l'énergie sans la courbe de débits classés se fait selon l'équation suivante avec un temps de fonctionnement à pleine charge de 5000 heures par année :

$$E = P_{el} \cdot \Delta t$$

Avec:

E = Energie produite par l'installation en 1 année [kWh]

P_{el} = Puissance électrique de l'installation [kW]

Δt = Temps de fonctionnement de l'installation [h]

10.6. Description et traitement des couches utilisées sur QGIS

10.6.1. Couche Swissimage Hintergrund

Description

Cette couche permet d'avoir les images satellites de la Suisse et de pouvoir situer plus facilement les lieux de la commune.

Traitement de la couche

Pour obtenir cette couche, il faut télécharger l'extension « Swiss Locator » dans QGIS. La couche peut maintenant être trouvée dans la barre de recherche. Mettre la photo avec une opacité de 50%.



Figure 33: Aperçu de la couche "SwissHintergrund" pour la commune de Crans-Montana

10.6.2. Couche limites communales

Description

La couche des limites communales permet de délimiter les frontières de la commune.

Traitement de la couche

Pour la télécharger, il faut :

- Aller sur le site « GeoPol.ch »
- Insérer le nom de la commune voulue
- Insérer le cadre de référence qui est MN95/LV95
- Exporter les jeux de données « mensuration officielle : état »

Paramètres

Commune*

Cadre de référence*

Jeu de données à exporter*

E-Mail pour le résultat*

Figure 34: Exemple extraction données sur GeoPol.ch pour la commune de Crans-Montana

Une fois la couche insérée sur QGIS, il faut enlever le remplissage pour garder uniquement les frontières de la commune. Aller dans les paramètres de symbologie et mettre le style de remplissage en « Pas de remplissage »



Figure 35: Aperçu couche limites communales pour Crans-Montana

10.6.3. Couche réservoirs selon les données DPE

Description

Plusieurs couches possédant des réservoirs sont données par l'entreprise RUDAZ+PARTNER SA/AG. Il faut prendre ces couches et les trier de manière à avoir une couche recensant tous les réservoirs implémentés dans DPE. Le cadastre étant géré par la commune, les informations peuvent être plus ou moins bien documentées selon la commune.

Traitement de la couche

Il faut fusionner les couches de vecteurs contenant des réservoirs à l'aide de l'outil de gestion de données « Fusionner des couches vecteurs » de manière à n'avoir qu'une seule table d'attributs avec les données de toutes les couches. La suite se déroule en effectuant un tri à l'aide de la carte DPE et en supprimant les données inutiles de la table. La couche réservoirs est prête et est représentée par des carrés turquoise.

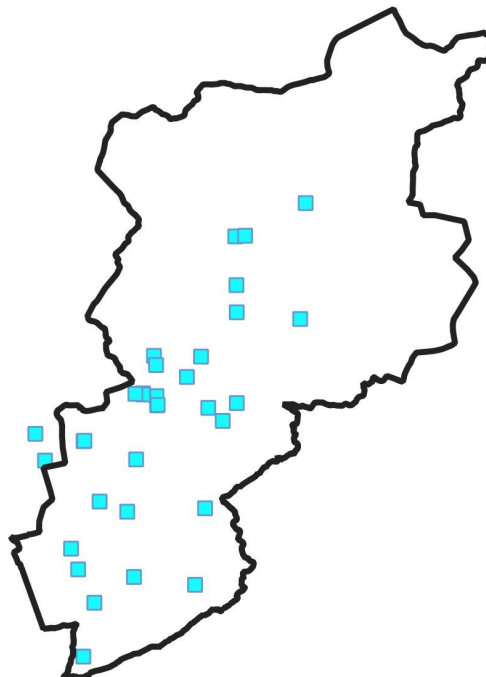


Figure 36: Aperçu couche réservoirs pour la commune de Crans-Montana

10.6.4. Couche réducteurs de pression

Description

Une couche possédant les réducteurs de pression est donnée par l'entreprise RUDAZ+PARTNER SA/AG. Elle permet de situer tous les réducteurs de pression de la commune.

Traitement de la couche

Il faut la trier en gardant uniquement les réducteurs de pression installés sur le réseau d'eau potable. Une fois le tri effectué, la couche est prête à être utilisée.

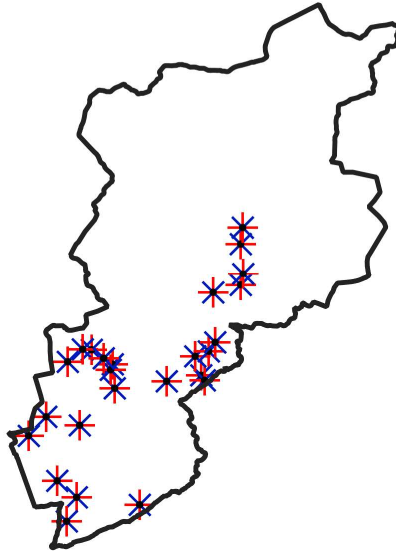


Figure 37: Aperçu couche réducteurs de pression pour la commune de Crans-Montana

10.6.5. Couche conduites d'eau

Description

Une couche possédant les conduites d'eau potable et d'irrigation est donnée par l'entreprise RUDAZ+PARTNER SA/AG. Elle permet de situer toutes les conduites sur la commune.

Traitement de la couche

Il faut pouvoir différencier la taille des conduites ainsi que leur affectation. Elles sont utilisées soit pour l'irrigation soit pour l'eau potable. Le traitement suivant est effectué :

1. Aller dans les paramètres de symbologie dans les symboles uniques. Editer dans le constructeur de chaîne d'expressions l'équation suivante : « $durchmesser/150$ ». Elle permet de faire varier la largeur des conduites selon leur épaisseur.
2. Aller dans les paramètres de symbologie dans la partie catégorisée. Effectuer le classement selon la valeur « Druckzone ». Ce tri va permettre de différencier l'eau potable (en bleu) et l'eau utilisée pour l'irrigation (en brun).

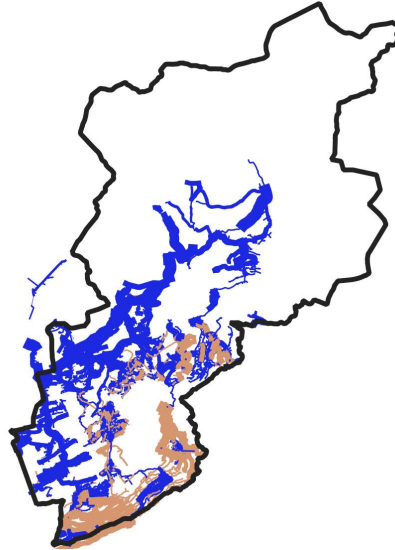


Figure 38: Aperçu de la couche conduites d'eau

10.6.6. Couche routes

Description

La couche recensant les routes en Suisse se nomme « TIm_Strasse » et se trouve sur le DataPoolVS. Elle permet de spatialiser toutes les routes sur le logiciel QGIS.

Traitement de la couche

Les étapes de traitement sont les suivantes :

1. En utilisant l'outil de géotraitement « Couper » avec comme couche de superposition la couche « limites communales », il ne reste plus que les routes appartenant à la commune et non plus toute la Suisse.
2. La couche « TIm_Strasse » a une numérotation « objektart » allant de 0 à 23, elle permet de distinguer la taille et la qualité des routes. Le critère accès vise à repérer une route pour l'installation d'une turbine. Les routes au-dessus de 13 ne sont pas prises en compte puisqu'elles ne permettent pas l'accès à un camion. Un tri dans la table d'attributs en supprimant les routes avec une numérotation plus haute que 13 suffit.

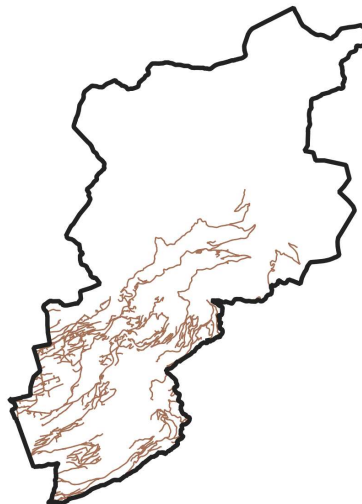


Figure 39: Aperçu couche routes sur la commune de Crans-Montana

10.6.7. Couche transformateurs

Description

Une demande doit être faite à OIKEN pour avoir accès à la localisation des transformateurs sur la commune. Elle permet de spatialiser tous les transformateurs sur le logiciel QGIS.

Traitement de la couche

Le traitement est le suivant :

En utilisant l'outil de gestion de données « Fusionner des couches vecteurs », il faut rassembler toutes les couches de transformateur en une seule.

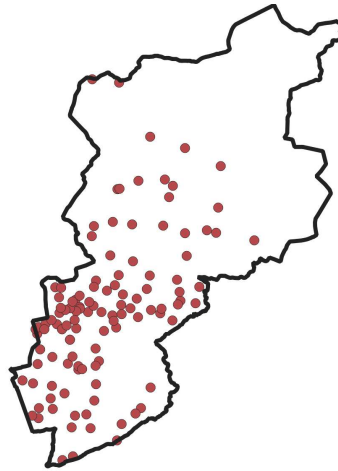


Figure 40: Aperçu couche transformateurs sur la commune de Crans-Montana

10.6.8. Importation des couches MNT de Crans Montana sur le logiciel QGIS

Description

Les données MNT ont été téléchargées sur le drive Géopol Data VS. Ce sont des fichiers « .GZ » avec des données XYZ qui sont lues par le logiciel QGIS. Ces rasters permettent d'obtenir les altitudes des réservoirs et des réducteurs de pression de la commune jusqu'à 2000 mètres d'altitude.

Traitement de la couche

L'index suivant permet de ressortir les couches MNT voulues.

1266-42	1267-31	1267-32	1267-41
1266-44	1267-33	1267-34	1267-43
1286-22	1287-11	1287-12	1287-21
1286-24	1287-13	1287-14	1287-23
1286-42	1287-31	1287-32	1287-41
1286-44	1287-33	1287-34	1287-43

Figure 41: Index Suisse des couches d'altimétrie sur Crans-Montana

Une fois les couches implémentées dans QGIS, il est maintenant possible de créer un raster virtuel contenant toutes les parties touchant la commune dans un seul raster. L'outil utilisé est « Construire un raster virtuel ». La couche 1267-33 et 1267-34 se situe à plus de 2000 m.

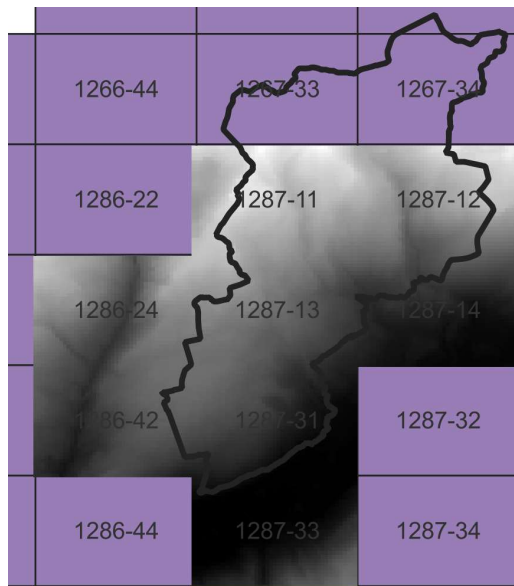


Figure 42: Raster virtuel sur la commune de Crans-Montana

Une fois que le raster est créé, l'altitude peut être ajoutée aux couches des réservoirs et des réducteurs de pression à l'aide de l'outil « prélèvement des valeurs rasters vers ponctuels ».

Ceci permet d'avoir sur les couches de réservoirs et de réducteurs de pression les altitudes des installations.

10.6.9. Couche des sites potentiels

Description

Cette couche est créée à partir des couches et des données suivantes :

- Couche réservoirs selon les données DPE
- Couche réducteurs de pression
- Données DPE

Elle permet de noter les sites potentiels choisis manuellement.

Traitement de la couche

Les étapes sont les suivantes :

- Les couches réservoirs et réducteurs de pression sont fusionnées à l'aide de l'outil de gestion de données « Fusionner des couches de vecteurs ».
- Un tri dans la table d'attributs est fait en ne retenant que les lieux ayant une différence de hauteur et un débit moyen jugés suffisants. Il faut conserver le site où la turbine serait installée. Les autres sites peuvent être supprimés.
- Dans la table d'attributs, le nom du site potentiel, la différence de hauteur ainsi que la chute nette avec une approximation de perte de charges de 10 % peuvent être notés de manière manuelle. Le nom correspond à « lieu de départ - lieu d'arrivée ».

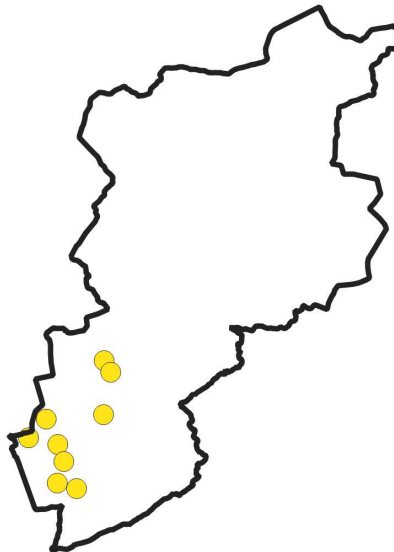


Figure 43: Aperçu sites potentiels pour la commune de Crans-Montana

10.6.10. Couche population

Description

Cette couche est téléchargée sur le drive Géopol Data VS dans le dossier « Société, culture ». Elle permet de localiser la population et de savoir l'altitude des bâtiments les plus proche des réducteurs de pression.

Traitement de la couche

Une fois implantée dans le logiciel QGIS, il faut procéder à l'étape suivante. En utilisant l'outil de géo traitement « Couper » avec comme couche de superposition la couche « limites communales », il ne reste plus que la population de la commune et non plus toute la Suisse.

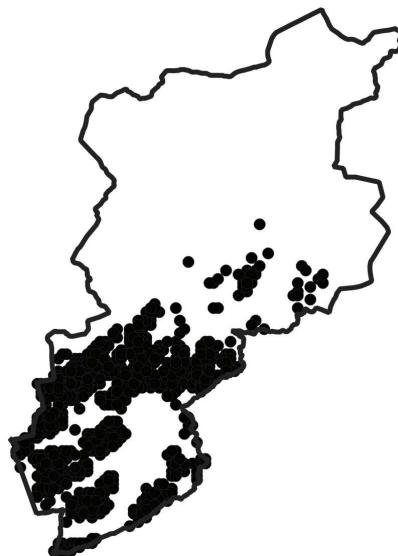


Figure 44: Aperçu de la couche population pour la commune de Crans-Montana

Des statistiques comme la somme de la population pour les entités sélectionnées peuvent directement être faites sur le logiciel.

10.7. Traitement des critères sur QGIS

10.7.1. Critère Energie

La table d'attributs de la couche des sites potentiels est utilisée. La courbe de débits classés est effectuée sur Excel où la puissance, l'énergie et la standardisation du critère peuvent ensuite être ressorties et copiées dans la table d'attributs.

10.7.2. Critère Distance au Transformateur

1. Pour connaître la distance entre le site potentiel et le transformateur le plus proche, l'outil « Distance au plus proche centre (points) » est utilisé. Il se fait entre la couche « Sites potentiels » et la couche « localisation_transformateurs ». Cela crée une nouvelle couche prenant la liste d'attributs de la couche « sites potentiels », mais en rajoutant la distance la plus proche vers le transformateur sous le nom de « Hub_Dist ».
2. La colonne « Hub_Dist » peut être renommée en « Distance_Transfo » et la standardisation du critère transformateur peut être effectuée dans une autre colonne de la table d'attributs. La couche peut être sauvegardée par-dessus la couche « site potentiels ».

10.7.3. Critère Accès

1. Passer la couche route qui de base est linéaire en une couche points. L'outil « points le long d'une géométrie » permet d'effectuer ce passage. Une nouvelle couche va être créée. Il n'est pas nécessaire de la sauvegarder.
2. Pour connaître la distance entre le site potentiel et le point de la route la plus proche, l'outil « Distance au plus proche centre (points) » est utilisé. Il se fait entre la couche « Sites potentiels » et la couche créée au point 1. Cela crée une nouvelle couche prenant la liste d'attributs de la couche « sites potentiels » mais en rajoutant la distance la plus proche vers la route sous le nom de « Hub_Dist ». Cette couche n'a pas besoin d'être sauvegardée.
3. La colonne « Hub_Dist » peut être renommée en « Distance_Accès » et la standardisation du critère Accès peut être effectuée dans une autre colonne de la table d'attributs. Les colonnes autres que « Distance_Accès » et « Standardisation_Accès » peuvent être supprimées.
4. A l'aide de l'outil « Joindre les attributs par localisation », Il faut joindre la couche créée au point 2 avec la couche « Sites_potentiels ».
5. Le critère Accès ainsi que sa standardisation sont insérés dans le tableau regroupant tous les critères.

10.8. Schéma récapitulatif des données QGIS

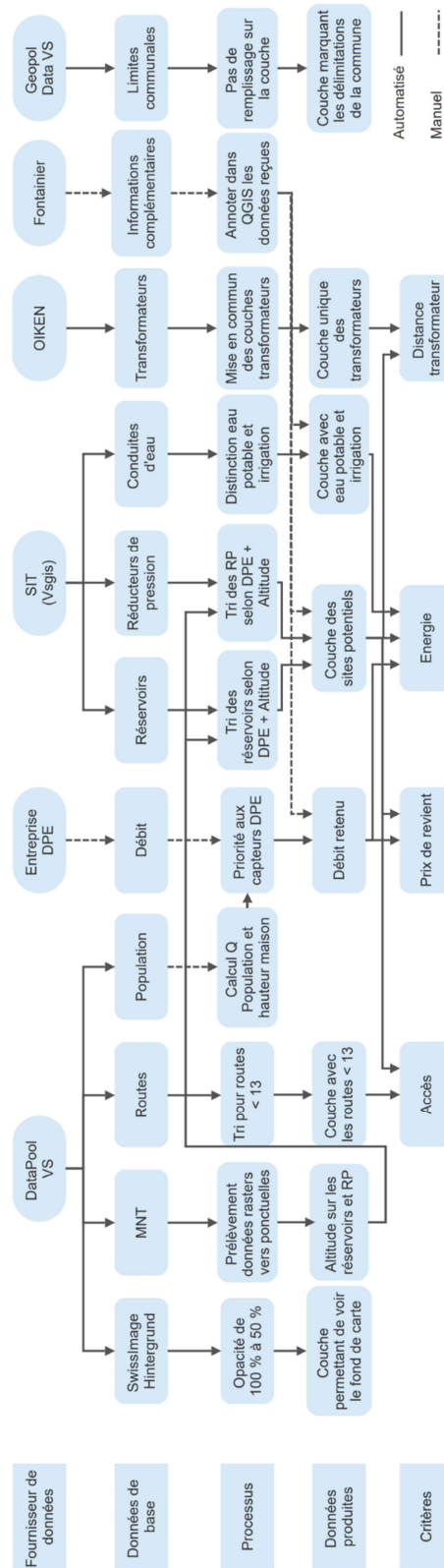


Figure 45: Schéma récapitulatif données QGIS