

Évaluation des besoins en eau des alpages : proposition de suivi de la consommation selon les conditions climatiques et les pratiques pastorales

Lorena Roulin

Sous la direction du Prof. Emmanuel Reynard
Expert : Dr. Martin Calianno



« Ce travail n’a pas été rédigé en vue d’une publication, d’une édition ou diffusion. Son format et tout ou partie de son contenu répondent donc à cet état de fait. Les contenus n’engagent pas l’Université de Lausanne. Ce travail n’en est pas moins soumis aux règles sur le droit d’auteur. À ce titre, les citations tirées du présent mémoire ne sont autorisées que dans la mesure où la source et le nom de l’auteur-e sont clairement cités. La loi fédérale sur le droit d’auteur est en outre applicable. »

« Je déclare sur l’honneur avoir déposé la version finale de mon manuscrit. »

Table des matières

1. Introduction.....	13
1.1 L'accès à l'eau dans les alpages.....	13
1.2 Problématique.....	14
2. Cadre théorique.....	16
2.1 Facteurs environnementaux.....	16
2.1.1 Conditions climatiques.....	16
2.1.2 Géologie.....	17
2.1.3 Hydrologie et hydrogéologie du Jura.....	19
2.2 Le changement climatique.....	20
2.2.1 Scénarios climatiques.....	21
2.2.2 Changements saisonniers dans les températures.....	22
2.2.3 Changements saisonniers dans les précipitations.....	24
2.2.4 Modification de la couverture neigeuse.....	25
2.2.5 Modification des régimes hydrologiques.....	26
2.2.6 Les sécheresses.....	27
2.3 Agriculture de montagne dans le Jura suisse.....	30
2.3.1 Les pâtures boisées.....	30
2.3.2 La gestion de l'eau dans les alpages du Jura.....	32
2.3.3 Les déterminants de la demande en eau.....	39
2.4 Synthèse.....	45
3. Méthodologie du travail et terrain d'étude.....	47
3.1 Contexte du travail.....	47
3.2 Démarche générale et approche méthodologique.....	48
3.3 Enjeux logistiques et relationnels.....	49
3.3.1 Alpage du Bucley : étude exploratoire.....	49
3.3.2 Alpage de la Perroude de Vaud : site de suivi principal.....	50
4. Les déterminants de la demande en eau.....	51
4.1 Les facteurs environnementaux.....	51

4.1.1	Le contexte géographique et hydrogéologique	51
4.1.2	Analyse climatique	57
4.2	Le diagnostic des alpages.....	75
4.2.1	Descriptions des infrastructures hydrauliques.....	75
4.2.2	Vulnérabilité de l’approvisionnement en eau.....	83
4.3	L’analyse des pratiques pastorales	87
4.3.1	Utilisation des bâtiments	87
4.3.2	Exploitation de la surface pâturée	89
4.3.3	Type de bétail.....	91
4.4	Synthèse	94
5.	<i>Proposition de suivi de la consommation d’eau du bétail</i>	96
5.1	Éléments de contexte et planning général	96
5.2	Conditions de mise en place d’un protocole de suivi	98
5.3	Données du dispositif de suivi	103
5.3.1	Données météorologiques.....	103
5.3.2	Données fourragères.....	104
5.3.3	Données empiriques de la consommation en eau.....	105
5.3.4	Données liées aux pratiques pastorales.....	115
5.4	Analyse des données	116
5.4.1	Données horaires	116
5.4.2	Données journalières	117
5.4.3	Données par UGB.....	117
5.5	Synthèse	119
6.	<i>Le cas de la Perroude de Vaud</i>	122
6.1	Évolution météorologique	122
6.2	Consommation du bétail en alpage	123
6.2.1	Variations intra-journalières de la consommation en eau.....	125
6.3	Facteurs influençant la consommation d’eau en alpage.....	127
6.3.1	Variabilité intra-journalière et facteurs déterminants.....	129
7.	<i>Discussion</i>	132

7.1	L'influence des conditions climatiques sur la consommation d'eau du bétail en alpage	132
7.2	Le rôle des pratiques pastorales dans la gestion de l'eau	134
7.3	Comparaison avec les modèles existants	136
7.4	Stratégies d'adaptation	137
8.	<i>Conclusion et perspectives</i>	140
8.1	Conclusion	140
8.2	Limites et enseignements	141
8.3	Perspectives	142
9.	<i>Bibliographie</i>	144
10.	<i>Webographie</i>	150
11.	<i>Annexes</i>	152
I.	Conditions de propriété et d'exploitation de l'alpage du Bucley	152
II.	Conditions de propriété et d'exploitation de l'alpage du Pré d'Etoy	153
III.	Conditions de propriété et d'exploitation de l'alpage de la Perroude de Vaud	154
IV.	Panneau informatif installé à la Perroude de Vaud	155
V.	Prix matériel	156

Table des figures

Figure 1. Carte géologique et coupe géologique de la Vallée de Joux (Source : Swisstopo, 2025)	18
Figure 2. Les trois scénarios RCP (2.6, 4.5 et 8.5) définis en fonction du niveau de forçage radiatif atteint à la fin du XXI ^e siècle (Source : Technical Report CH2018, 2018).	22
Figure 3. Changements projetés des températures médianes (°C) en Suisse pour les périodes centrées sur 2035, 2060 et 2085, par saison, comparés à 1981-2010. Trois scénarios d'émissions sont pris en compte : RCP 8.5, RCP 4.5 et RCP 2.6 (Source : Technical Report CH2018, 2018).....	23
Figure 4. Changements projetés des précipitations saisonnières (en %) en Suisse pour les périodes centrées sur 2035, 2060 et 2085, par rapport à 1981-2010. Trois scénarios d'émissions sont considérés : RCP 8.5, RCP 4.5 et RCP 2.6 (Source : Technical Report CH2018, 2018).....	24
Figure 5. Changements moyens multi-modèles des indices de sécheresse météorologique CDD (haut) et SPI3 (bas), aux horizons 2035, 2060 et 2085, selon le scénario RCP 8.5 (Source : Technical Report CH2018, 2018).	29
Figure 6. Changements moyens multi-modèles des indices de sécheresse agricole P-E (haut) et SMA (bas), aux horizons 2035, 2060 et 2085, selon le scénario RCP 8.5 (Source : Technical Report CH2018, 2018).....	29
Figure 7. Pâturage boisé du Jura vaudois, alpage du Mont-Tendre et du Bucley (Photos : Lorena Roulin)	31
Figure 8. Système de gestion de l'eau sur un alpage jurassien : ressources, usages et acteurs (Roulin, 2025).....	33
Figure 9. Systèmes de captage et d'adduction d'eau en alpage (Photos : Lorena Roulin)	35
Figure 10. Systèmes de stockage d'eau en alpage. À gauche, une citerne enterrée utilisée pour le stockage de l'eau ; à droite, un étang servant de réservoir agricole (Photos : Lorena Roulin).	35
Figure 11. Systèmes de distribution d'eau en alpage. Les images de gauche montrent des bassins utilisés pour distribuer l'eau au bétail, et à droite, un tuyau qui achemine l'eau par gravité depuis la citerne enterrée jusqu'au bassin pour le bétail (Photos : Lorena Roulin).	36
Figure 12. Les déterminants de la demande en eau sur un alpage (Roulin, 2025).....	40
Figure 13. Modification de la consommation en eau du bétail en fonction des températures (Source : Olkowski, 2009, p. 31)	41
Figure 14. Corrélation entre la teneur en eau des aliments et la consommation en eau du bétail (Source : Olkowski, 2009, p. 30)	42
Figure 15. Cadre méthodologique du travail (Roulin, 2025).....	48
Figure 16. Carte de situation de l'alpage du Bucley/Pré d'Etoy (Roulin, 2025 ; Source : Swisstopo, 2025)	52

Figure 17. Périmètre de l'alpage du Bucley et du Pré d'Etoy (Roulin, 2025 ; Source : Swisstopo, 2025)	52
Figure 18. Carte géologique du secteur du Bucley/Pré d'Etoy (Roulin, 2025 ; Source : Swisstopo, 2025)	53
Figure 19. Carte géologique de l'alpage du Bucley/Pré d'Etoy (Roulin, 2025 ; Source : Swisstopo, 2025). La légende de la carte se trouve à la figure 18.	54
Figure 20. Carte de situation de l'alpage de la Perroude de Vaud (Roulin, 2025 ; Source : Swisstopo, 2025)	55
Figure 21. Périmètre de l'alpage de la Perroude de Vaud (Roulin, 2025 ; Source : Swisstopo, 2025)	55
Figure 22. Carte géologique du secteur de la Perroude de Vaud (Roulin, 2025 ; Source : Swisstopo, 2025)	56
Figure 23. Carte géologique de l'alpage de la Perroude de Vaud (Roulin, 2025 ; Source : Swisstopo, 2025). La légende de la carte se trouve à la figure 22.	57
Figure 24. Localisation des stations climatologiques (Source : Swisstopo, 2025)	59
Figure 25. Évolution des températures moyennes annuelles par station entre 1990 et 2024. CDF : station de La Chaux-de-Fonds (1017 m), DOL : station de La Dôle (1669 m), FRE : station de La Frêtaz (1205 m), AMB : station des Amburnex. Les droites de régression linéaire mettent en évidence une augmentation des températures enregistrées par l'ensemble des stations, de l'ordre de 1,5 °C sur la période 1991-2024, et ce indépendamment de l'altitude, ce qui souligne le caractère généralisé du réchauffement observé. (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)	61
Figure 26. Écart de température par rapport à la moyenne de la période 1991-2020 pour la station de La Chaux-de-Fonds (1017 m). La droite de régression met en évidence une augmentation notable des températures, avec un écart atteignant 1,5 °C (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)	62
Figure 27. Écart de température par rapport à la moyenne de la période 1991-2020 pour la station de La Frêtaz (1205 m). La droite de régression met en évidence une augmentation notable des températures, avec un écart atteignant 1,5 °C (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)	62
Figure 28. Écart de température par rapport à la moyenne de la période 1991-2020 pour la station de La Dôle (1669 m). La droite de régression met en évidence une augmentation notable des températures, avec un écart atteignant 1,5 °C (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)	63
Figure 29. Évolution des précipitations annuelles moyennes par station entre 1990 et 2024. CDF : station de La Chaux-de-Fonds (1017 m), DOL : station de La Dôle (1669 m), FRE : station de La Frêtaz (1205 m), AMB : station des Amburnex (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)	64
Figure 30. SPI à la station de La Chaux-de-Fonds (1017 m). La période de référence est 1991-2020 ; le seuil des années sèches est indiqué par la ligne orange (-1) et le seuil des années très sèches par la ligne rouge (-1,5) (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)	65

Figure 31. SPI à la station de La Frêtaz (1321 m). La période de référence est 1991-2020 ; le seuil des années sèches est indiqué par la ligne orange (-1) et le seuil des années très sèches par la ligne rouge (-1,5) (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)	65
Figure 32. SPI à la station de La Dôle (1669 m). La période de référence est 1991-2020 ; le seuil des années sèches est indiqué par la ligne orange (-1) et le seuil des années très sèches par la ligne rouge (-1,5) (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)	66
Figure 33. Précipitations moyennes mensuelles (mm) en 2011 pour la station de La Frêtaz (1205 m) par rapport aux valeurs seuils de la période de référence 1991-2020 (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)	67
Figure 34. Précipitations moyennes mensuelles (mm) en 2011 pour la station de La Dôle (1669 m) par rapport aux valeurs seuils de la période de référence 1991-2020 (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)	67
Figure 35. Précipitations moyennes mensuelles (mm) en 2018 pour la station de La Frêtaz (1205 m) par rapport aux valeurs seuils de la période de référence 1991-2020 (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)	68
Figure 36. Précipitations moyennes mensuelles (mm) en 2018 pour la station de la Dôle (1669 m) par rapport aux valeurs seuils de la période de référence 1991-2020 (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)	68
Figure 37. Précipitations moyennes mensuelles (mm) en 2022 pour la station de La Frêtaz (1205 m) par rapport aux valeurs seuils de la période de référence 1991-2020 (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)	69
Figure 38. Précipitations moyennes mensuelles (mm) en 2022 pour la station de la Dôle (1669 m) par rapport aux valeurs seuils de la période de référence 1991-2020 (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)	69
Figure 39. Évolution des températures et des précipitations hivernales selon les scénarios climatiques CH2018 pour la chaîne jurassienne. (Source : Scénarios climatiques CH2018 (NCCS, 2018)).	73
Figure 40. Évolution des températures et des précipitations estivales selon les scénarios climatiques CH2018. (Source : Scénarios climatiques CH2018 (NCCS, 2018)).	74
Figure 41. Évolution du nombre de jours d'été et du nombre de jours avec neige fraîche à différentes altitudes selon les scénarios climatiques CH2018 pour la chaîne jurassienne (Source : Scénarios climatiques CH2018 (NCCS, 2018)).	74
Figure 42. Parcs des alpages du Bucley (BU) et du Pré d'Etoy (PE) en 2024 (Mosimann et al., 2025)..	77
Figure 43. Infrastructures hydrauliques du Bucley (Montanum, 2022, modifié par Lorena Roulin, 2025)	78

Figure 44. Infrastructures hydrauliques du Pré d'Etoy (Montanum, 2022, modifié par Lorena Roulin, 2025).....	79
Figure 45. Parcs de l'alpage de la Perroude de Vaud en 2025 (Roulin, 2025)	81
Figure 46. Infrastructures hydrauliques de la Perroude de Vaud (Montanum, 2022, modifié par Lorena Roulin, 2025).....	82
Figure 47. Chalet de l'alpage du Bucley (Photos : Lorena Roulin)	88
Figure 48. Chalet de l'alpage du Pré d'Etoy (Photos : Lorena Roulin).....	88
Figure 49. Chalet de la Perroude de Vaud (Photos : Montanum ; Lorena Roulin).....	89
Figure 50. Aperçu de la végétation de l'alpage du Bucley (Photos : Lorena Roulin).....	89
Figure 51. Calendrier de pâture 2024 au Bucley (BU) et au Pré d'Etoy (PE), avec la répartition des parcs de jour (en vert clair) et des parcs de nuit (en vert foncé) (Mosimann et al., 2025).....	90
Figure 52. Aperçu de la végétation de l'alpage de la Perroude de Vaud (Photos : Lorena Roulin)	90
Figure 53. Le bétail de vaches Red Holstein du Bucley (Photos : Martin Caliano).....	92
Figure 54. Les vaches Grises rhétiques à la Perroude de Vaud (Photos : Lorena Roulin)	93
Figure 55. Étapes importantes de la mise en œuvre du dispositif de suivi en alpage (Roulin, 2025)... ..	99
Figure 56. Station des Amburnex utilisées pour la récolte des données météorologiques (Source : Swisstopo, 2025).....	103
Figure 57. Compteur d'eau manuel utilisé au chalet du Bucley (Photos : Lorena Roulin ; Maddalena)	106
Figure 58. Compteur d'eau à impulsion utilisé sur les alpages du Bucley/Pré d'Etoy et de la Perroude de Vaud (Photos : Lorena Roulin ; Swiss Domotique).....	106
Figure 59. Enregistreurs de données choisis pour le suivi sur les alpages du Bucley/Pré d'Etoy et de la Perroude de Vaud (Photos : Lorena Roulin)	107
Figure 60. Câbles de liaison entre les compteurs et les enregistreurs de données sur les alpages du Bucley/Pré d'Etoy et de la Perroude de Vaud (Photos : Bakrona Zürich AG ; Lorena Roulin)	108
Figure 61. Mise en place du matériel sur deux bassins de l'alpage de la Perroude de Vaud (Photos : Lorena Roulin, Martin Caliano).....	109
Figure 62. Localisation du matériel de mesure dans le réseau hydraulique de l'étang du Bucley (Montanum, 2022, modifié par Lorena Roulin, 2025)	111
Figure 63. Localisation du matériel de mesure au chalet et sur les différents bassins du Bucley (Montanum, 2022, modifié par Lorena Roulin, 2025)	112
Figure 64. Localisation du matériel de mesure sur l'alpage de la Perroude de Vaud (Montanum, 2022, modifié par Lorena Roulin, 2025)	114
Figure 65. Évolution des températures maximales et moyennes ainsi que des précipitations à la station Agroscope des Amburnex entre le 23 mai et le 18 juillet (Roulin, 2025).	122

Figure 66. Consommation totale journalière d'eau du bétail à la Perroude de Vaud, de juin à juillet 2025 (Roulin, 2025)	123
Figure 67. Consommation journalière par UGB à la Perroude de Vaud (Roulin, 2025).....	124
Figure 68. Consommation journalière à la Perroude de Vaud le 01.06.2025 (Roulin, 2025)	125
Figure 69. Consommation journalière à la Perroude de Vaud le 19.06.2025 (Roulin, 2025)	126
Figure 70. Consommation journalière à la Perroude de Vaud le 16.07.2025 (Roulin, 2025)	126
Figure 71. Consommation journalières du bétail à la Perroude de Vaud, liée avec les facteurs déterminants. Les données climatiques proviennent de la station Agrométéo des Amburnex (alt. 1321 m), située à 4,4 km de l'alpage (Roulin, 2025).....	127
Figure 72. Consommation du bétail à la Perroude de Vaud le 07.06.2025, liée avec le température moyenne et les précipitations. Les données climatiques proviennent de la station Agroscope des Amburnex (alt. 1321 m), située à 4,4 km de l'alpage (Roulin, 2025).....	129
Figure 73. Consommation du bétail à la Perroude de Vaud le 07.07.2025, liée avec la température moyenne et les précipitations. Les données climatiques proviennent de la station Agroscope des Amburnex (alt. 1321 m), située à 4,4 km de l'alpage (Roulin, 2025).....	130
Figure 74. Consommation du bétail à la Perroude de Vaud le 30.06.2025, liée avec la température moyenne. Les données climatiques proviennent de la station Agroscope des Amburnex (alt. 1321 m), située à 4,4 km de l'alpage (Roulin, 2025	131

Table des tableaux

Tableau 1. Estimation des besoins en eau pour les alpages en fonction des différents usages de l'eau (Sautier, 2009 ; SFEA, cours 2023)	37
Tableau 2. Consommation en eau pour les vaches laitières en fonction de leur production de lait (Source : Ménard et al., 2012).	43
Tableau 3. Descriptif des stations	58
Tableau 4. Projection des changements climatiques à l'horizon 2060 pour deux stations jurassiennes selon les scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5 (Reynard et al., 2024) (Source : CH2018 (NCCS, 2018)).....	72
Tableau 5. Caractéristiques générales de l'alpage du Bucley/Pré d'Etoy en 2024 (Source : Montanum)	76
Tableau 6. Caractéristiques générales de l'alpage de la Perroude de Vaud en 2025 (Source : Montanum)	80
Tableau 7. Bilan en eau pour l'alpage du Bucley, bilan pour 70 jours de pâture (Montanum, 2023) ..	84
Tableau 8. Bilan en eau pour l'alpage du Pré d'Etoy, bilan pour 50 jours de pâture (Montanum, 2023)	85
Tableau 9. Bilan en eau pour l'alpage de la Perroude de Vaud (Montanum, 2024)	86
Tableau 10. Tournus entre les parcs de la Perroude de Vaud entre fin mai et fin juillet 2025	91
Tableau 11. Comparaison de la vulnérabilité hydrique et de la gestion pastorale entre les alpages du Bucley/Pré d'Etoy et de la Perroude de Vaud.	95
Tableau 12. Comparaison entre les suivis de la consommation en étable et en alpage	97
Tableau 13. Agenda de récolte des données de fin mai à mi-juillet 2025	98
Tableau 14. Matériel utilisé et installé pour le suivi sur l'alpage du Bucley	110
Tableau 15. Matériel pour le suivi sur l'alpage de la Perroude de Vaud	113
Tableau 16. Exemple de tableau de données - données horaires de consommation d'eau	116
Tableau 17. Exemple de tableau de données journalières	117
Tableau 18. Tableau des coefficient UGB par animal (Sautier, 2009 ; AGRIDEA, 2023)	118
Tableau 19. Principales étapes pour le suivi de la consommation d'eau dans les alpages	120
Tableau 20. Résumé des données nécessaires au dispositif de suivi de la consommation d'eau en alpage	121
Tableau 21. Prix matériel pour la mise en place du protocole de suivi sur l'alpage du Bucley	156
Tableau 22. Prix matériel pour la mise en place du protocole de suivi sur l'alpage de la Perroude de Vaud.....	156

Résumé

Dans un contexte de réchauffement climatique et de variabilité croissante des précipitations, la gestion de l'eau devient un enjeu majeur pour l'agriculture de montagne. Reconnu comme patrimoine culturel immatériel par l'UNESCO en 2023, l'estivage est aujourd'hui fragilisé, notamment dans le Jura vaudois, où la nature karstique du sous-sol et les sécheresses estivales accentuent la vulnérabilité des systèmes pastoraux. Ce mémoire, inscrit dans le projet de recherche Alp'eau, s'articule autour de deux axes : une analyse des déterminants de la demande en eau en alpage (facteurs climatiques, hydrogéologiques, infrastructurels et pastoraux) et une proposition méthodologique de suivi de la consommation d'eau adaptée aux réalités du terrain. L'étude, menée sur deux alpages contrastés du Jura vaudois, combine diagnostics de terrain et mesures, dans le but de renforcer la résilience des alpages face aux effets du changement climatique. Les résultats mettent en évidence que la disponibilité en eau ne dépend pas uniquement des précipitations, mais résulte d'une combinaison de facteurs incluant la capacité de stockage, les pertes liées au substrat karstique et les pratiques pastorales. Le protocole de suivi développé a permis de quantifier, dans le Jura vaudois, la consommation réelle en eau du bétail sur une saison d'estivage, offrant ainsi des données concrètes pour appuyer les décisions de gestion.

Mots clés : gestion de l'eau, alpages, Jura vaudois, protocole de suivi, bétail, changement climatique, pratiques pastorales

Abstract

In the context of climate warming and increasing precipitation variability, water management has become a major challenge for mountain agriculture. Recognized as intangible cultural heritage by UNESCO in 2023, summer alpine grazing is now under pressure, particularly in the Jura vaudois, where the karstic nature of the subsoil and summer droughts heighten the vulnerability of pastoral systems. This master's thesis, conducted as part of the Alp'eau research project, is structured around two main axes : an analysis of the determinants of water management in alpine pastures (climatic, hydrogeological, infrastructural, and pastoral factors) and a methodological proposal for monitoring water consumption adapted to on-the-ground realities. The study, carried out on two contrasting alpine pastures in the Jura vaudois, combines field diagnostics and measurements to strengthen the resilience of alpine grazing systems in the face of climate change. The results show that water availability does not depend solely on precipitation, but results from a combination of factors including storage capacity, losses linked to the karstic substrate, and pastoral practices. The monitoring protocol developed made it possible to quantify, in the Jura Vaudois, the actual water consumption of livestock over a summer grazing season, thereby providing concrete data to support management decisions.

Keywords : water management, alpine pastures, Jura region of Vaud, monitoring protocol, livestock, climate change, pastoral practices

1. Introduction

1.1 L'accès à l'eau dans les alpages

La **période d'estivage** est au cœur des pratiques pastorales dans les zones de montagne. L'inscription, en décembre 2023¹, de la saison d'alpage sur la liste du patrimoine culturel immatériel de l'UNESCO illustre bien son importance : elle participe à la préservation des paysages, à l'approvisionnement en produits locaux, au maintien de la vie rurale et à la transmission d'un patrimoine montagnard ancien (Sérès, 2010). Toutefois, ce système pastoral, profondément ancré dans les territoires alpins et jurassiens, se trouve aujourd'hui confronté à de nouvelles contraintes environnementales.

En effet, la **hausse des températures** et l'**augmentation de la variabilité des régimes pluviométriques**, observées tant à l'échelle mondiale que régionale, interrogent directement la stabilité des ressources hydriques. Les rapports du GIEC confirment que le réchauffement climatique est désormais une réalité indéniable : entre 2011 et 2020, la température moyenne mondiale a déjà augmenté de 1,1 °C par rapport à la période préindustrielle (1850–1900), et cette tendance devrait se poursuivre à court terme, quel que soit le scénario envisagé (IPCC, 2023). Ce réchauffement s'accompagne d'une **intensification des événements extrêmes** - sécheresses, canicules, précipitations intenses - qui fragilisent les systèmes agricoles, et particulièrement ceux des zones de montagne, soumis à l'interaction constante entre contraintes naturelles et pressions sociales (Zwicke et al., 2013 ; EEA, 2024).

Dans ce contexte, l'**accès à l'eau** apparaît comme un enjeu majeur pour l'agriculture de montagne. Il conditionne l'abreuvement du bétail, la production de biomasse et la transformation des produits laitiers sur les alpages (Sautier, 2009). Or, la disponibilité et la gestion de cette ressource soulèvent de nombreuses interrogations, tant du point de vue de son usage actuel que de son évolution future. Les zones de montagne sont en effet particulièrement vulnérables aux effets du changement climatique, qui commencent à altérer l'hydrologie terrestre à l'échelle globale et locale (Viviroli et al., 2011 ; Palomo, 2017 ; Adler, 2019). En Suisse, et plus spécifiquement dans **la chaîne du Jura**, la question est d'autant plus sensible que la **nature karstique des sous-sols** limite la rétention d'eau et réduit les écoulements de surface (Quantin, 1958 ; Mangin, 1975 ; Meisser et al., 2018). Cette vulnérabilité s'est déjà traduite par plusieurs sécheresses marquantes depuis le début du XXI^e siècle - en 2003, 2008, 2011, 2015, 2018 et 2022 - qui ont mis en évidence la fragilité du système hydrique pastoral jurassien, obligeant parfois à acheminer de l'eau par hélicoptère depuis la plaine pour pallier les pénuries estivales (EEA, 2024 ; Reynard et al., 2024).

¹ Confédération Suisse, Office fédéral de la culture. (2023, 5 décembre). *La saison d'alpage inscrite au patrimoine culturel immatériel de l'UNESCO*. Consulté le 30 mai 2025, à l'adresse <https://www.admin.ch/gov/fr/accueil/documentation/communiques.msg-id-99168.html>

Les alpages doivent ainsi être appréhendés comme des **écosystèmes pastoraux complexes**, dont la conservation et la durabilité nécessitent une gestion intégrée. La ressource en eau y constitue le pivot d'un système interdépendant associant **l'eau, le bétail et le fourrage** (Reynard, 2024). Comprendre et adapter cette gestion, à l'interface des changements hydro-climatiques et des pratiques pastorales, apparaît dès lors essentiel pour garantir la pérennité de ces espaces de montagne.

1.2 Problématique

Parmi ces enjeux globaux et régionaux se trouve la question cruciale de la **consommation d'eau pendant la période d'estivage**. L'eau, utilisée tant pour l'abreuvement du bétail que pour les autres activités pastorales, - fourrage, transformation fromagère, vie au chalet, tourisme - constitue une variable clé pour la gestion durable des ressources hydriques.

Cependant, les recherches et les études sur cette question restent actuellement encore très limitées. Bien que la consommation d'eau de bovins puisse être estimée à l'aide d'équations prenant en compte divers facteurs (Cardot et al., 2008), tels que la température ambiante ou le fourrage, ces données ont rarement été observées et calculées dans les conditions réelles en alpage. En effet, la consommation d'eau est le plus souvent estimée, notamment dans le cadre des travaux d'aménagement et des diagnostics d'alpage (Mosimann et al., 2025). Toutefois, dans un environnement de montagne en constante évolution, ces estimations pourraient ne pas refléter fidèlement les quantités réellement consommées, en raison du caractère spécifique et fluctuant des conditions en alpage.

Comme ces équations ne tiennent pas toujours compte de la complexité des conditions réelles du terrain, il est nécessaire de décrire précisément le système de la demande en eau et ses déterminants. Ces derniers renvoient aux facteurs explicatifs, tels que les conditions environnementales, les infrastructures hydrauliques ou les pratiques pastorales, qui influencent à la fois les ressources disponibles - et donc la disponibilité de l'eau - ainsi que les usages, c'est-à-dire la consommation en eau. Ces éléments contribuent à des dynamiques variées, nécessitant une approche intégrée et adaptée pour évaluer avec précision les besoins en eau dans un contexte de changement climatique (Cominola et al., 2023). Face à ces enjeux, une question centrale se pose :

Comment les conditions climatiques et les pratiques pastorales influencent-elles la disponibilité et la consommation d'eau dans les alpages du Jura vaudois ?

Cette question de recherche vise à combler le manque d'observations directes et à adapter les méthodes de gestion de l'eau aux défis posés par l'évolution climatique et les spécificités locales. Pour répondre à cette problématique, ce travail propose d'explorer deux terrains d'étude situés dans le Jura vaudois :

- **Le train d'alpage du Bucley/Pré d'Etoy**, orienté vers la production laitière ;

- **L'alpage de la Perroude de Vaud**, une exploitation principalement orientée vers l'élevage allaitant.

Sur la base de ces deux terrains d'étude, ce travail poursuit deux objectifs complémentaires, articulés autour d'une compréhension intégrée des enjeux liés à la gestion de l'eau en alpage, ainsi que du développement d'outils pratiques permettant d'y répondre :

(1) Identifier les déterminants de la demande en eau à l'échelle de l'alpage.

Ce premier objectif repose sur une lecture croisée de trois volets d'analyse : les **conditions environnementales** (facteurs géomorphologiques, hydrogéologiques, climatiques, etc.), le **diagnostic de l'alpage** (infrastructures hydrauliques, vulnérabilité), et les **pratiques pastorales** (profil du bétail, gestion du pâturage). Cette approche vise à mieux comprendre quels facteurs déterminent la demande en eau de l'alpage et comment ce dernier s'adapte aux tensions croissantes sur la ressource en eau, dans un contexte de changement climatique.

(2) Proposer et tester une méthodologie de suivi de la consommation d'eau en alpage.

Le second objectif consiste à élaborer un dispositif de suivi permettant de mesurer, de manière simple et reproductible, les volumes d'eau consommés selon les usages et les conditions spécifiques à chaque alpage. Ce protocole a d'abord été conçu en prenant comme référence le train d'alpage du Bucley/Pré d'Etoy, avant d'être mis en œuvre de manière opérationnelle sur l'alpage de la Perroude de Vaud. Il vise à fournir un outil d'aide à la décision pour les acteurs de terrain, afin d'anticiper les défis liés à la disponibilité en eau.

Ce travail s'inscrit dans un cadre articulant dynamiques environnementales, climatiques et agricoles du Jura vaudois. Les objectifs de l'étude nécessitent une compréhension du contexte territorial et des spécificités socio-environnementales de cette région de moyenne montagne. Le chapitre suivant établit ces fondements, en mobilisant connaissances géographiques, hydrogéologiques et climatiques, et en replaçant l'agriculture pastorale jurassienne dans un environnement soumis à des pressions croissantes, notamment climatiques.

2. Cadre théorique

Ce chapitre présente le cadre théorique de ce travail en lien avec la chaîne jurassienne, en abordant ses **caractéristiques** environnementales, géographiques, géologiques et hydrologiques (2.1). Il offre également une mise en contexte du territoire suisse, et plus spécifiquement du Jura, face aux **enjeux actuels du changement climatique**, notamment en ce qui concerne l'évolution des précipitations, des températures et d'autres facteurs climatiques influençant les dynamiques propres à cette région de moyenne montagne (2.2). La dernière partie de ce chapitre est consacrée à **l'agriculture pastorale dans le Jura**, avec une attention particulière portée à la gestion de l'eau en milieu pastoral, en tenant compte des nombreux facteurs qui conditionnent son usage (2.3). Ce cadre théorique permet ainsi de contextualiser les analyses qui suivront et d'ancrer les processus étudiés dans une perspective scientifique.

2.1 Facteurs environnementaux

Dans le contexte jurassien, les facteurs environnementaux, tels que le climat, la géologie, l'hydrologie et la répartition des ressources en eau, peuvent influencer la vulnérabilité d'un alpage face au stress hydrique (Reynard et al., 2024). Dans ce contexte, les alpages du Jura vaudois apparaissent particulièrement vulnérables face au changement climatique, en raison de leur situation en zone karstique. En effet, la nature géologique de leur sous-sol, bien que soumise à des précipitations abondantes, limite la rétention d'eau en surface, rendant la disponibilité de la ressource hydrique plus incertaine en période estivale (Quantin, 1958 ; Mangin, 1975 ; Meisser et al., 2018).

La chaîne du Jura, malgré ses altitudes moyennes et ses sommets n'excédant pas 1720 mètres, constitue une barrière climatique importante. Dans sa partie vaudoise, cette chaîne de moyenne montagne s'étend selon un axe SW-NE et marque la limite du Plateau suisse à l'ouest, s'étendant jusqu'en France voisine (Reynard et Schoeneich, 2021). Le Jura est une chaîne de montagnes relativement jeune dont le plissement s'est produit entre -10 et -5 millions d'années (Marthaler, 2001) : après les dépôts calcaires durant une période plus chaude, la région a subi un raccourcissement et des déformations liés à l'orogénèse alpine (Rollier, 1903 ; Aubert, 1951).

2.1.1 Conditions climatiques

En raison de sa **localisation géographique**, la chaîne du Jura profite à la fois d'un climat continental et d'un climat maritime. Cependant, il semble que ce soit le relief qui donne à la chaîne jurassienne ses caractéristiques essentielles (Quantin, 1958). Le climat jurassien se définit par des étés doux et des hivers froids, avec des précipitations relativement importantes et constantes toute l'année. En effet, le **climat du Jura demeure froid et humide** en raison de sa position en tant que premier obstacle sur la trajectoire des dépressions venant de l'océan

Atlantique, malgré ses altitudes moyennes (Crocchi-Maspoli et al., 2014). Cette situation explique les précipitations mensuelles relativement abondantes, pouvant varier entre 100 à 170 cm (Crocchi-Maspoli et al., 2014). En revanche, la face exposée au versant français reçoit plus de précipitations que celle tournée vers le Plateau suisse, qui bénéficie d'une situation d'abri et est donc plus susceptible de subir un stress hydrique (Gallandat et al., 1995).

Dans les zones surélevées des anticlinaux, la neige recouvre le sol pendant environ 140 à 150 jours par an (Reynard et Schoeneich, 2021). En effet, il n'est pas rare que la neige atteigne 1 mètre ou plus dans la zone sylvopastorale (Gallandat et al., 1995). La persistance du manteau neigeux est, à certains endroits, favorisée par les caractéristiques géomorphologiques telles que la présence de dépressions topographiques - notamment dans celles se situant dans les zones forestières -, les dolines ou les pentes orientées au nord. Par conséquent, dans certaines zones, même à des altitudes relativement basses, la neige peut persister assez tard au printemps.

Les vallées où résident les habitants sont situées à des altitudes relativement élevées, entre 900 et 1000 mètres, et la topographie en bassins fermés favorise les inversions de température. Cela explique à la fois la fraîcheur générale de la température annuelle et les records de températures minimales enregistrés dans certaines régions² (Reynard et Schoeneich, 2021). Le climat rude et froid contribue à la courte durée de la saison de croissance de la végétation, limitée à seulement quatre ou cinq mois dans la zone sylvopastorale (Gallandat et al., 1995).

2.1.2 Géologie

La chaîne du Jura se caractérise par une **série de plis parallèles**, dont les coupes transversales révèlent une succession de synclinaux et d'anticlinaux souvent érodés et marqués par de nombreuses failles (Aubert, 1953). Ces structures, typiques du Jura, résultent d'une tectonique compressive ayant engendré des plis orientés selon un axe NE-SW. La Vallée de Joux, par exemple, est située dans un synclinal bordé par des anticlinaux, formant la structure principale de cette dépression (Aubert, 1938) (Fig. 1).

Les roches présentes dans le Jura sont principalement des **roches sédimentaires marines** déposées et formées durant le Mésozoïque et le Cénozoïque, notamment au Jurassique moyen (Dogger) et supérieur (Malm) et au Crétacé (Reynard et Schoeneich, 2021). Les sédiments du Dogger et du Malm ont été déposés dans des mers chaudes et peu profondes qui recouvraient la région à cette époque (Reynard et Schoeneich, 2021). Progressivement, ces dépôts se sont sédimentés pour former des couches alternées de calcaire, de grès et de marnes, qui conditionnent aujourd'hui la morphologie karstique et les circulations hydrogéologiques de la région.

² Confédération Suisse. (s. d.). National Centre for Climate Services (NCCS). Consulté le 22 mai 2025, à l'adresse <https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/regions/grandes-regions/jura/le-climat-actuel.html>

C'est à la fin de l'ère Cénozoïque que ces sédiments se sont détachés de leur socle cristallin et ont été déplacés sur une distance allant de 10 à 15 kilomètres en direction du NW. Ce détachement, qui s'est produit au niveau d'une couche triasique d'évaporites, a permis le plissement des calcaires jurassiques et crétacés sous l'effet des forces compressives (Aubert, 1951 ; Bichet et Campy, 2008).

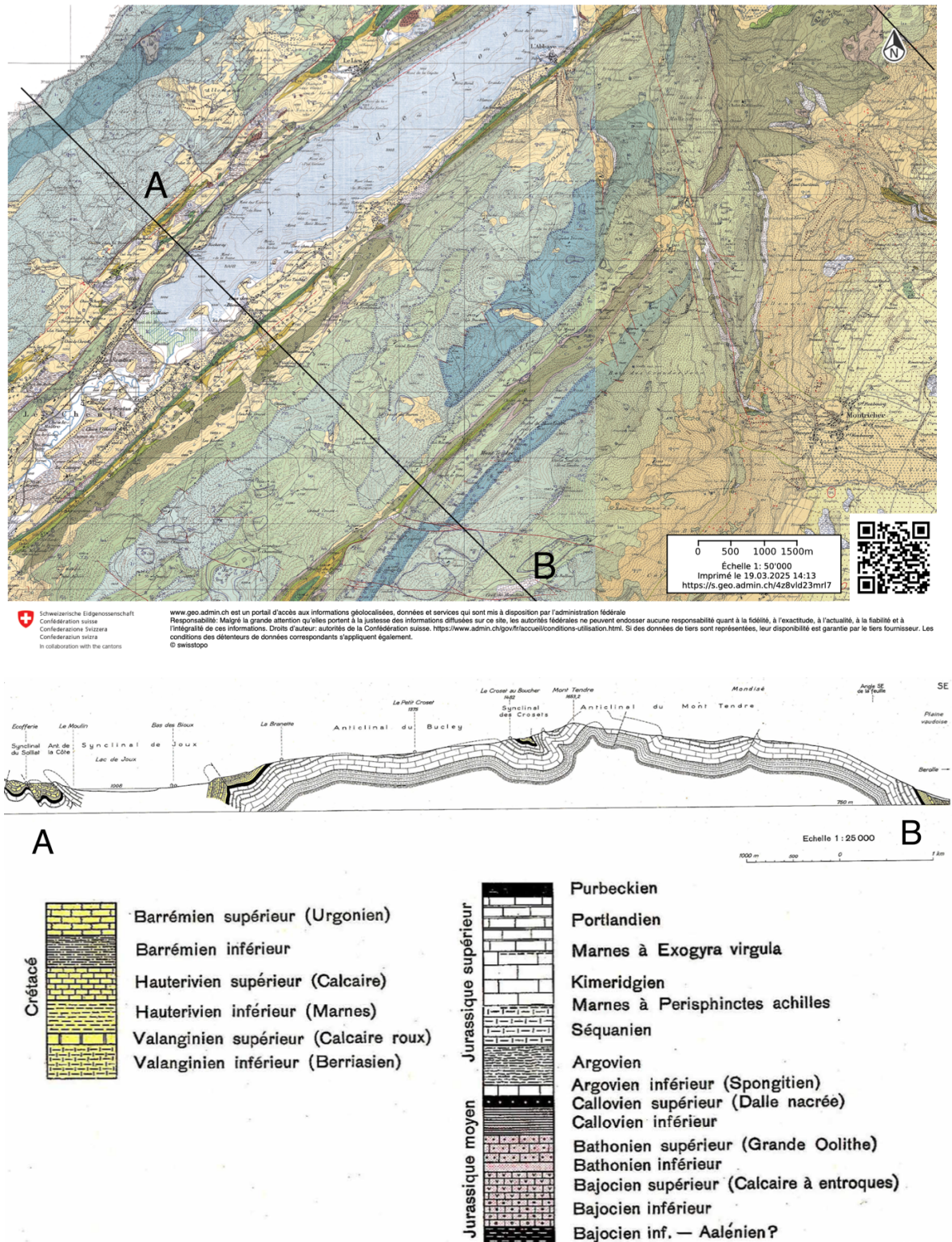


Figure 1. Carte géologique et coupe géologique de la Vallée de Joux (Source : Swisstopo, 2025)

Les failles chevauchantes et les décrochements qui accompagnent ces plis créent des décalages structuraux complexes, à la fois favorables à la circulation des eaux souterraines et susceptibles d'en orienter les trajectoires (Aubert, 1951 ; Bichet et Campy, 2008). Le décrochement majeur est celui de Vallorbe-Pontarlier qui a fortement influencé la formation des plis et leur organisation, en perturbant la continuité des structures géologiques. Elle joue encore aujourd'hui un rôle important dans les circulations souterraines, en guidant localement les écoulements d'eau à travers les discontinuités géologiques (Aubert, 1953).

L'une des caractéristiques les plus célèbres du Jura est la présence de **crêts calcaires**, qui s'étirent sur des kilomètres (Reynard et Schoeneich, 2021). Ce paysage est le résultat de l'**érosion différentielle**, où le calcaire plus résistant a été préservé tandis que les couches plus tendres, comme les marnes, ont été érodées (Aubert, 1943). Dans la région de la Vallée de Joux, cette alternance de calcaires et de marnes tendres engendre un paysage structural karstique complexe, avec la présence de sources et de réseaux souterrains importants (Reynard et Schoeneich, 2021).

Au-delà de sa structuration tectonique, c'est surtout la **nature karstique du sous-sol** qui joue un rôle déterminant dans la gestion de l'eau sur la chaîne du Jura. Ce massif présente un substrat faillé, diaclasé et soluble dans l'eau, favorisant une infiltration rapide des précipitations et la formation d'un réseau karstique complexe (Aubert, 1943 ; Perrin, 2004 ; Jacob, 2009). Par conséquent, cette dissolution du calcaire induit une forte perméabilité du sous-sol, accélérant l'érosion et engendrant une grande diversité de formations karstiques, telles que des grottes, des gouffres et des réseaux souterrains (Wildberger et Preiswerk, 1997).

2.1.3 Hydrologie et hydrogéologie du Jura

L'hydrologie de la chaîne du Jura repose sur une double caractéristique : la **faiblesse des réserves d'eau en surface** et l'**importance des circulations d'eau souterraines**, liées à la nature karstique du massif. Ce contraste engendre un paradoxe hydrologique : alors que les **précipitations sont généralement plus abondantes en altitude**, les **eaux de surface y sont souvent plus rares que dans les vallées**. Cette situation s'explique par la forte perméabilité des calcaires fissurés du sous-sol jurassien, qui favorisent une infiltration rapide des eaux de pluie dans le sol (50-75 %) vers un réseau karstique profond, laissant peu d'eau en surface, en particulier sur les anticlinaux (Quantin, 1958 ; Mangin, 1975 ; Meisser et al., 2018 ; Reynard et Schoeneich, 2021).

En surface, les principales formes de stockage d'eau incluent les lacs, marais et zones humides, présents dans certains secteurs, notamment au fond des synclinaux colmatés par de la moraine de fond ou sur les affleurements de marnes (Aubert, 1943 ; Mangin, 1975). Cependant, ces réserves d'eau de surface demeurent localisées et limitées.

Les **réserves souterraines**, quant à elles, sont très importantes et permettent de stocker une grande quantité d'eau (Mangin, 1975). Ces réserves d'eau souterraines s'expliquent par la structure géologique du Jura, caractérisée par l'alternance de couches de calcaires perméables

et de marnes imperméables, qui conditionne l'infiltration et le stockage de l'eau. Cette stratification donne lieu à la formation d'aquifères dans les calcaires, qui sont les principaux réservoirs d'eau, et d'aquicludes dans les marnes, qui limitent la circulation des eaux souterraines. En particulier, une épaisse couche marneuse imperméable - l'Argovien - joue un rôle hydrogéologique crucial en formant une barrière qui sépare les aquifères situés dans les calcaires des niveaux inférieurs (Perrin, 2004 ; Reynard et Schoeneich, 2021).

La concentration des écoulements souterrains permet la formation de **sources karstiques** au pied des anticlinaux, avec des débits parfois importants. Ces aquifères profonds alimentent des sources karstiques importantes, telles que la Lionne, le source du Brassus, l'Aubonne ou la Venoge, situées soit au pied des anticlinaux, soit en périphérie du massif (Aubert, 1943 ; Reynard et Schoeneich, 2021). Bien que ces sources présentent parfois des débits importants et soient essentielles pour la production d'eau potable, elles se situent trop bas en altitude pour être captées afin d'alimenter les alpages.

En parallèle, des **aquifères** plus proches de la surface existent, de taille plus réduite, et dépendant de plis secondaires, des variations locales entre marnes et calcaires, ainsi que parfois de la présence d'une couverture morainique imperméable, comme la moraine de fond (Aubert, 1938). Ces petits aquifères alimentent des sources captées pour l'approvisionnement en eau des alpages. Toutefois, comme leur bassin d'alimentation est restreint, ils sont très réactifs aux conditions météorologiques : en cas de faible enneigement, ces sources peuvent tarir rapidement dès le début de l'été, et un été sec peut accentuer leur assèchement. Ces aquifères peu profonds sont néanmoins essentiels pour l'alimentation en eau des pâturages jurassiens et contribuent à la formation de zones humides, particulièrement importantes pour la biodiversité locale (Reynard et al., 2024).

Ainsi, les terrains calcaires des alpages sont généralement considérés comme secs et sensibles aux longues périodes de sécheresse (Hugger, 1975 ; Gallandat et al., 1995). La compréhension des dynamiques hydrogéologiques complexes du massif jurassien est donc indispensable pour assurer une gestion efficace des ressources en eau dans des secteurs comme la Vallée de Joux, et plus largement dans le Jura vaudois, en particulier face aux changements climatiques. Ces derniers viennent en effet accentuer les tensions sur la disponibilité en eau, en modifiant les régimes de précipitations et les cycles hydrologiques, ce qui appelle une adaptation renforcée des pratiques pastorales.

2.2 Le changement climatique

Ces dernières années, le changement climatique a fortement affecté la disponibilité en eau pour les activités pastorales, avec des étés particulièrement secs compromettant l'accès à l'eau dans de nombreux alpages de la chaîne du Jura. Face à ces bouleversements, anticiper les évolutions climatiques devient un levier essentiel d'adaptation pour les exploitants de montagne. Le chapitre suivant propose un éclairage sur les **tendances climatiques actuelles et futures**, d'abord à l'échelle de la Suisse et plus spécifiquement dans la chaîne du Jura, afin

de mieux comprendre les enjeux hydriques liés à l'évolution du climat dans ces zones de montagne. Ces évolutions seront analysées à la lumière **des scénarios du GIEC**, qui permettent d'anticiper les impacts potentiels du changement climatique sur la disponibilité des ressources en eau et sur les dynamiques des écosystèmes qui y sont associées.

2.2.1 Scénarios climatiques

Les scénarios climatiques CH2018³ présentent les tendances futures des températures et des précipitations, en s'appuyant sur des projections d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, basées sur les émissions passées et anticipées (IPCC, 2023). Les projections climatiques sont calculées par rapport à la période de référence 1981-2010. Les changements sont estimés pour l'ensemble du XXI^e siècle, répartis en trois périodes de 30 ans (2020-2049, 2045-2074, 2070-2099) (Technical Report CH2018, 2018). Les données utilisées proviennent de stations de mesure sélectionnées et de données interpolées et moyennées sur des zones climatologiques (Technical Report CH2018, 2018). Ces différentes sources d'observation directe du climat dans diverses régions de la Suisse servent de référence pour anticiper le changement climatique futur. De plus, l'observation de la variabilité climatique actuelle fournit une perspective sur les risques futurs liés au climat (Technical Report CH2018, 2018).

Le changement climatique en Suisse est projeté selon trois des Trajectoires de Concentration Représentatives (RCP). Ces scénarios climatiques ont été utilisés dans le dernier rapport d'évaluation publié par le GIEC (Technical Report CH2018, 2018). D'après le GIEC, ces scénarios climatiques varient en fonction du niveau d'atténuation des gaz à effet de serre et donc en fonction d'un niveau de réchauffement faible ou élevé d'ici la fin XXI^e siècle (IPCC, 2023). En effet, les scénarios RCP sont définis « en fonction du niveau de forçage radiatif (exprimé en W/m²) atteint à la fin du siècle » (Technical Report CH2018, 2018, p. 20, traduction libre). Ces trois scénarios RCP couvrent donc un large éventail de possibilités (Fig. 2).

Le **scénario RCP 2.6** prévoit une réduction importante et rapide des émissions mondiales dans les années à venir, jusqu'à atteindre le zéro net vers 2070. Le **scénario RCP 4.5** prévoit une stabilisation des émissions actuelles d'ici le milieu du XXI^e siècle (IPCC, 2023). Pour terminer, le **scénario RCP 8.5** projette une croissance continue des émissions jusqu'à la fin du XXI^e siècle, sans mesures de protection du climat, où les émissions doublent plus ou moins par rapport au niveau actuel d'ici 2100 (IPCC, 2023).

³ National Centre for Climate Services (NCCS). (2023). *Scénarios climatiques CH2018*. Consulté le 14 août 2024, à l'adresse <https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/le-nccs/themes-prioritaires/scenarios-climatiques-ch2018.html>

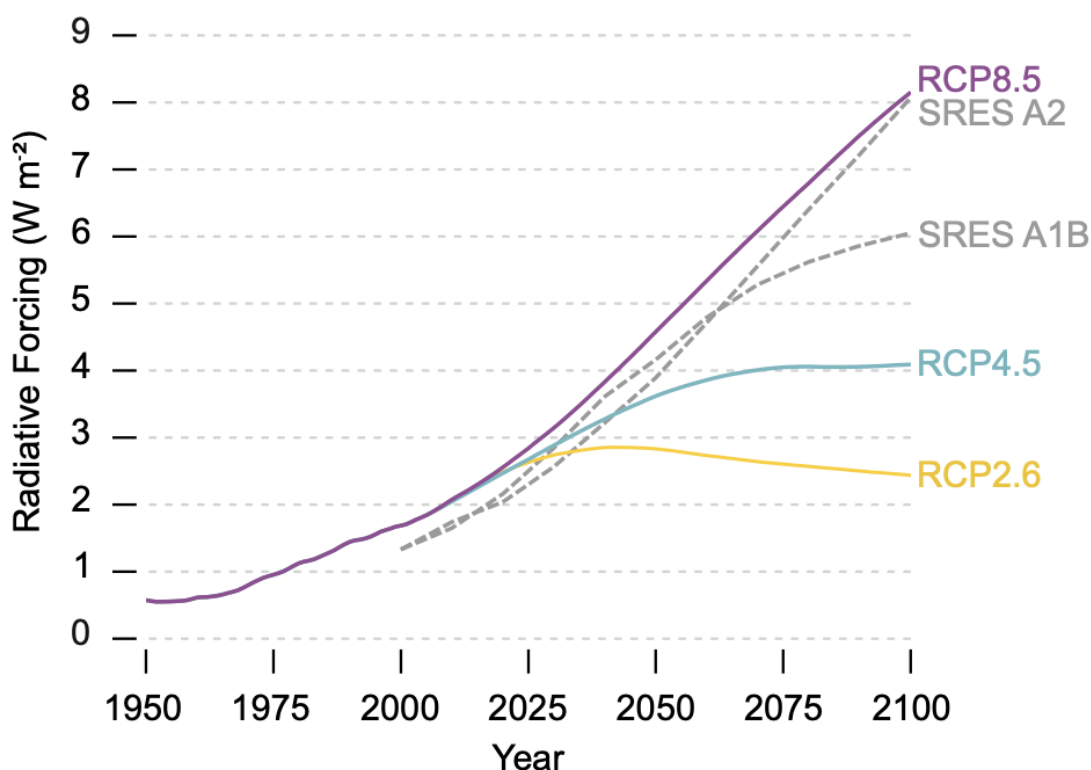


Figure 2. Les trois scénarios RCP (2.6, 4.5 et 8.5) définis en fonction du niveau de forçage radiatif atteint à la fin du XXI^e siècle (Source : Technical Report CH2018, 2018).

Ces évolutions seront analysées à la lumière des scénarios du GIEC, qui permettent d’anticiper les impacts potentiels du changement climatique sur la disponibilité des ressources en eau et sur les dynamiques des écosystèmes qui y sont associées. Ces scénarios sont établis pour différentes variables climatiques, telles que la température et les précipitations, qui seront présentées dans les chapitres suivants.

2.2.2 Changements saisonniers dans les températures

En Suisse, les températures de l’air présentent une grande variabilité à l’échelle interannuelle et décennale. Néanmoins, une tendance à long terme claire se dégage : entre 1864 et 2025⁴, le pays a connu un **réchauffement moyen de 2,9°C**. Le réchauffement climatique s’est particulièrement accéléré à partir de la fin des années 1980. Depuis cette période, l’augmentation des températures en Suisse a été près de deux fois supérieure à celle observée au niveau global, qui s’élève à 0,9°C sur la même période. Le XXI^e siècle se distingue par une fréquence accrue des années les plus chaudes enregistrées depuis 1864, avec neuf des dix années les plus chaudes survenues depuis les années 2000 (Technical Report CH2018, 2018). Cependant, ce réchauffement n’est pas uniforme sur l’ensemble du territoire suisse. Il varie selon les régions, les altitudes et les saisons, avec des différences marquées. Certaines fluctuations récentes peuvent également être attribuées à des variabilités internes, non

⁴ MétéoSuisse. (s. d.). *Changement climatique en Suisse*. Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse. Consulté le 14 août 2024, à l’adresse <https://www.meteosuisse.admin.ch/climat/changement-climatique.html>

directement liées au changement climatique (Technical Report CH2018, 2018). Pour l'avenir, les projections indiquent que le réchauffement sera plus marqué en été qu'en hiver dans toutes les régions de Suisse (Fig. 3).

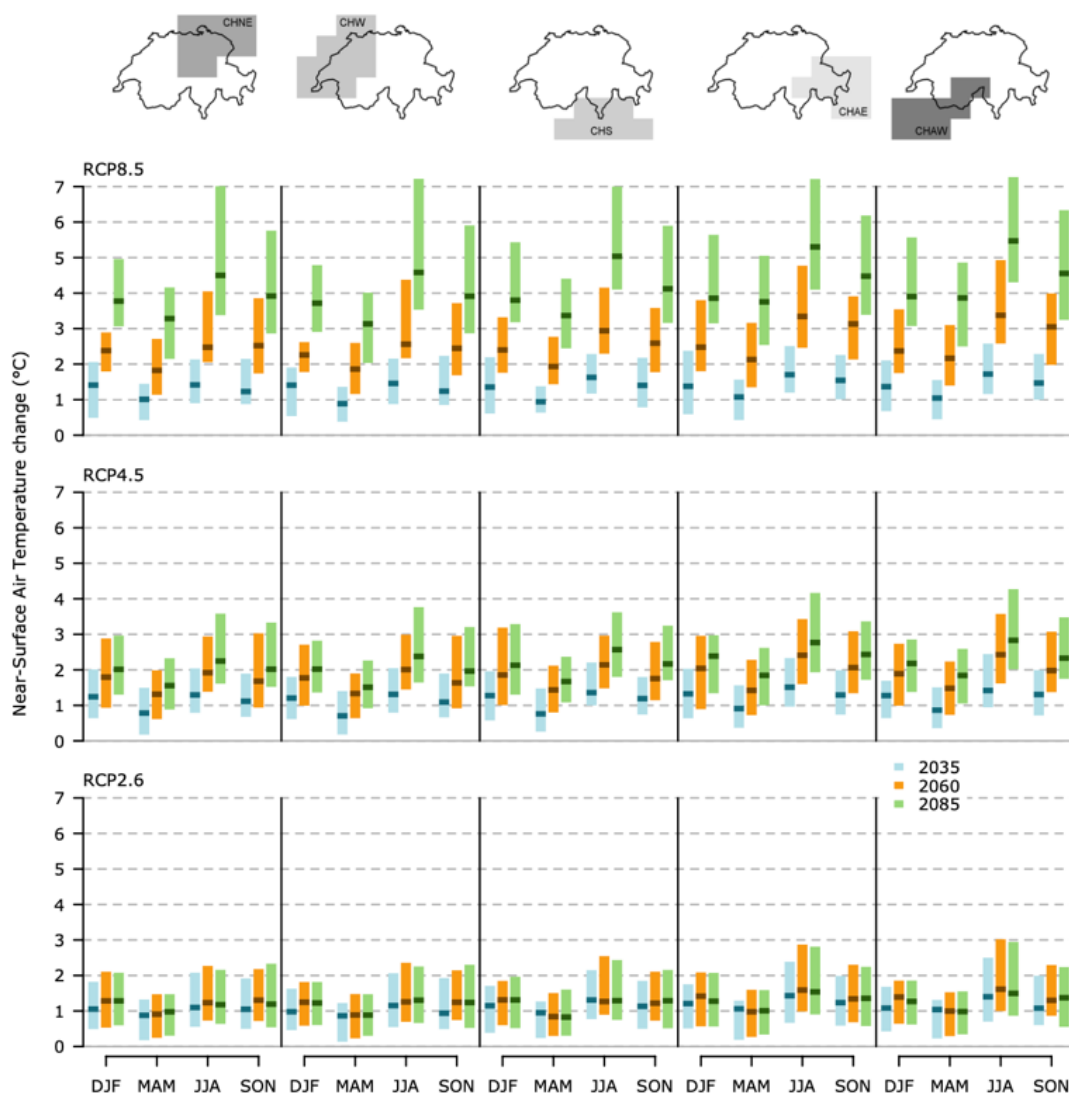


Figure 3. Changements projetés des températures médianes (°C) en Suisse pour les périodes centrées sur 2035, 2060 et 2085, par saison, comparés à 1981-2010. Trois scénarios d'émissions sont pris en compte : RCP 8.5, RCP 4.5 et RCP 2.6 (Source : Technical Report CH2018, 2018).

Selon les scénarios climatiques, la **hausse des températures estivales** pourrait atteindre entre 2,3°C et 4,4°C. Les augmentations prévues en automne seront proches de celles observées en hiver, tandis que le printemps devrait connaître une hausse moins prononcée (Technical Report CH2018, 2018 ; Confédération suisse, s.d.-b). Le scénario RCP 8.5 prévoit une hausse particulièrement importante des températures d'ici la fin du siècle. En revanche, le scénario intermédiaire RCP 4.5 suggère une augmentation plus modérée à partir du milieu du siècle, tandis que le scénario RCP 2.6 projette une hausse moins marquée.

Dans le Jura, une augmentation d'environ 1°C a déjà été observée au cours du dernier siècle (Crocchi-Maspoli et al., 2014). Selon les projections, cette hausse pourrait atteindre entre 1,1°C

et 3,5°C d'ici 2060, avec un réchauffement également plus prononcé en été qu'en hiver, comme pour le reste de la Suisse (Crocchi-Maspoli et al., 2014).

2.2.3 Changements saisonniers dans les précipitations

Entre 1981 et 2010, la Suisse a enregistré une moyenne annuelle de 1397 mm de précipitations, sous forme de pluie ou de neige⁵. Cette quantité est répartie de manière inégale sur le territoire, avec des niveaux plus élevés sur les sommets et des valeurs relativement faibles dans les vallées intra-alpines. Depuis 1864, une tendance générale se dessine : les **précipitations hivernales augmentent** dans de nombreuses régions, tandis que les **précipitations estivales diminuent** de manière significative. Cette évolution historique témoigne de modifications climatiques observées sur le long terme (Technical Report CH2018, 2018).

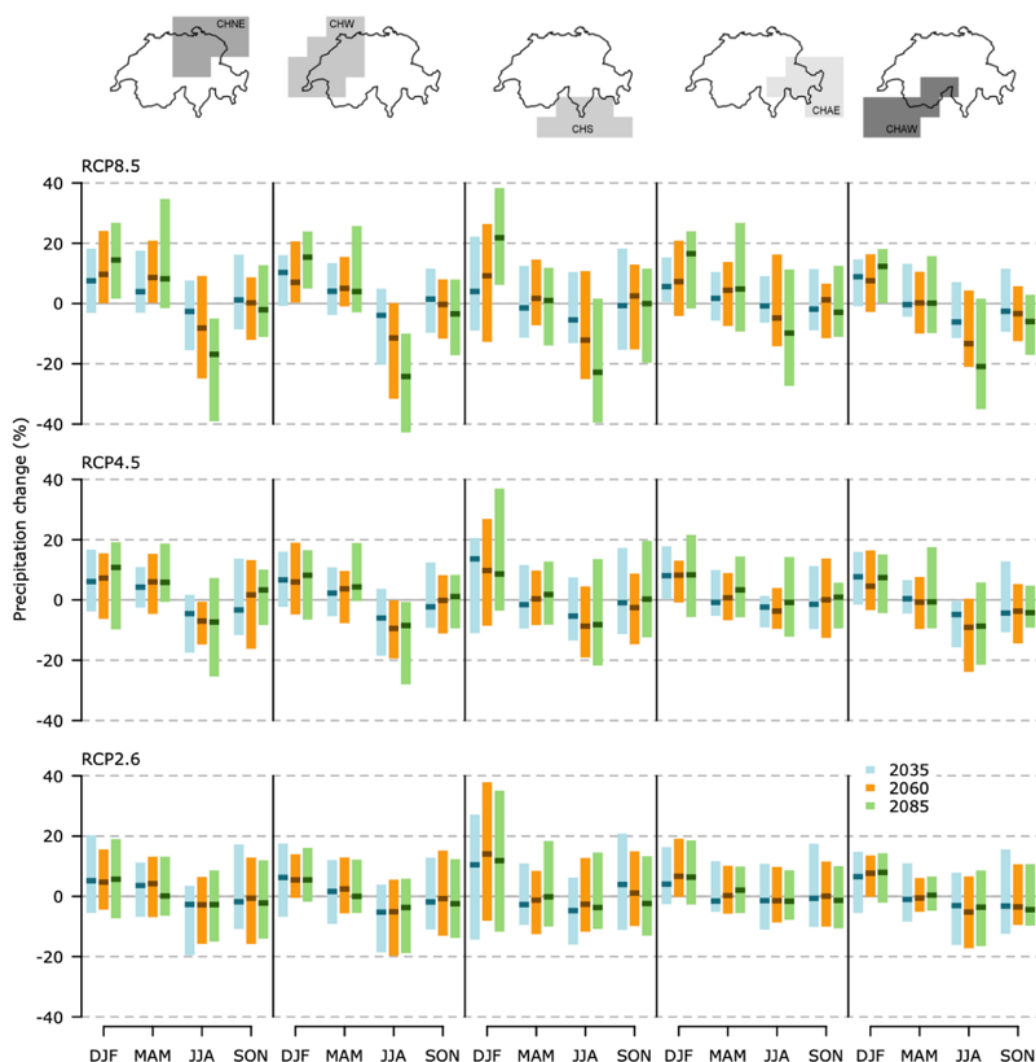


Figure 4. Changements projetés des précipitations saisonnières (en %) en Suisse pour les périodes centrées sur 2035, 2060 et 2085, par rapport à 1981-2010. Trois scénarios d'émissions sont considérés : RCP 8.5, RCP 4.5 et RCP 2.6 (Source : Technical Report CH2018, 2018).

⁵ Confédération Suisse. (s. d.). *Atlas hydrologique de la Suisse, Hydromaps*. Consulté le 14 août 2024, à l'adresse <https://atlashydrologique.ch>

À l'avenir, bien que la quantité totale de précipitations annuelles tende à rester relativement stable, leur **répartition saisonnière ainsi que leur intensité devraient évoluer** de manière significative en fonction des régions et des scénarios d'émissions (Fig. 4). Selon le scénario RCP 8.5, en l'absence de mesures d'atténuation, les précipitations hivernales pourraient augmenter de +12 % à +22 % selon les régions, tandis que les précipitations estivales pourraient diminuer entre -10 % et -24 %, par rapport à la période de référence 1981-2010 (OFEV, 2021 ; Technical Report CH2018, 2018).

À l'échelle du Jura, ces tendances sont déjà perceptibles actuellement. Au cours du XX^e siècle, une augmentation d'environ +20 % des précipitations hivernales a été observée, alors qu'aucune tendance claire n'a encore pu être identifiée pour les précipitations estivales. Cependant, une diminution moyenne estivale comprise entre -9 % et -15 % pourrait être attendue dans les prochaines décennies (Crocchi-Maspoli et al., 2014).

Par ailleurs, ces modifications présentent un caractère très régional et peuvent varier même au sein d'un même bassin versant. En effet, la fréquence des événements extrêmes, notamment les orages violents et très localisés, devrait augmenter, en particulier durant l'été, période durant laquelle la chaîne du Jura est particulièrement exposée à ces phénomènes extrêmes (Technical Report CH2018, 2018).

2.2.4 Modification de la couverture neigeuse

Le manteau neigeux constitue également un élément clé du régime hydrique saisonnier en Suisse, agissant comme un réservoir naturel d'eau qui alimente les cours d'eau au printemps et en été (OFEV, 2021). Cependant, les projections climatiques récentes anticipent une **réduction notable des quantités de neige accumulées**, en lien avec un réchauffement généralisé et des hivers plus doux (Technical Report CH2018, 2018 ; Confédération suisse, s.d.- b). Cette évolution se manifeste par une diminution de la part des précipitations sous forme de neige, au profit de précipitations liquides.

Par ailleurs, à très haute altitude, au-dessus de 2000 mètres, l'augmentation attendue des précipitations hivernales pourrait partiellement compenser les effets du réchauffement, maintenant ainsi des accumulations neigeuses relativement stables (Technical Report CH2018, 2018). En revanche, aux altitudes moyennes et basses, notamment dans le Jura suisse où elles peuvent atteindre jusqu'à 1600 mètres, la fréquence et l'importance des chutes de neige devraient diminuer, en particulier durant les saisons de transition. Cela entraînera un manteau neigeux moins épais et une fonte plus précoce, modifiant ainsi la disponibilité de cette ressource en eau durant l'été (OFEV, 2021).

Le contexte jurassien se distingue par l'importance particulière du manteau neigeux dans son régime hydrologique saisonnier. Contrairement à certains bassins versants des régions alpines où la fonte glaciaire joue un rôle majeur dans les écoulements, dans le Jura, ce sont principalement les accumulations et la fonte de la neige qui alimentent les cours d'eau au printemps et en été (OFEV, 2021). Actuellement, la chaîne du Jura connaît en moyenne 55

jours de neige fraîche par an, contre seulement 15 jours dans les vallées. Cependant, les projections indiquent une baisse importante de ces jours de neige, qui pourraient diminuer à environ 20 jours d'ici 2060 selon un scénario modéré, soit une réduction de l'ordre de -30 à -40 % (Crocchi-Maspoli et al., 2014). La réduction du manteau neigeux à basse et moyenne altitude, combinée à une fonte plus précoce, modifiera le régime des débits, avec une augmentation en hiver et au début du printemps, puis une diminution en fin de printemps et en été (Technical Report CH2018, 2018).

Ces modifications affecteront la disponibilité en eau pendant les périodes critiques de sécheresse estivale, accentuant les tensions hydriques dans cette région (OFEV, 2021). À l'inverse des hauts massifs alpins où les précipitations neigeuses peuvent parfois augmenter, le Jura pourrait donc connaître une réduction globale de l'enneigement, avec des conséquences importantes sur son régime hydrologique et les écosystèmes qui en dépendent.

2.2.5 Modification des régimes hydrologiques

Bien que les débits annuels des cours d'eau en Suisse aient peu évolué au cours des cent dernières années, leur répartition saisonnière a, elle, considérablement changé (Technical Report CH2018, 2018). Depuis plusieurs décennies, le changement climatique exerce un impact direct sur le cycle de l'eau, en modifiant notamment les régimes de précipitations et les cycles saisonniers des écoulements (EEA, 2024 ; Milano et al., 2015).

En Suisse, l'altitude et le relief montagneux influencent fortement non seulement la quantité, mais aussi la forme des précipitations (pluie ou neige), ce qui détermine les différents régimes d'écoulement (Académies suisses des sciences, 2017). Ainsi, selon les régions et les saisons, les écoulements peuvent être dominés par la fonte des glaciers en été (régime glaciaire), la fonte des neiges au printemps (régime nival), ou les précipitations sous forme liquide (régime pluvial), voire une combinaison de ces facteurs.

Dans le contexte jurassien, où les régimes hydrologiques dépendent principalement des **précipitations sous forme de pluie et de neige** - et non de la fonte glaciaire -, les scénarios hydrologiques Hydro-CH2018 projettent une évolution notable des régimes d'écoulement à l'horizon 2050 (OFEV, 2021 ; Brunner et al., 2019). L'élévation des températures devrait entraîner une **remontée de la limite pluie-neige**, provoquant une transformation des précipitations hivernales en pluie plutôt qu'en neige. Ce changement se traduirait par une augmentation des débits en hiver, notamment entre décembre et mars, du fait d'un ruissellement plus immédiat de l'eau (Brunner et al., 2019).

Parallèlement, la **réduction du manteau neigeux** en fin d'hiver, due à des précipitations solides moins abondantes, limiterait le stock d'eau disponible pour le reste de l'année. La neige, en tant que réservoir naturel, disparaît progressivement et fond de plus en plus tôt au printemps, ce qui tend à avancer le pic de débit des sources et cours d'eau vers des mois plus précoces, notamment en mars et avril. Ce pic serait également réduit en intensité en raison d'un volume de neige moindre (Milano et al., 2016 ; Brunner et al., 2019). En conséquence, les écoulements

estivaux, qui dépendent traditionnellement de la fonte nivale, seraient plus faibles, en particulier en fin d'été.

À cela s'ajoute une **évaporation accrue** sous l'effet des températures plus élevées, qui contribuerait également à réduire les débits en été (Brunner et al., 2019). Ce décalage saisonnier, caractérisé par des débits hivernaux renforcés, des pics printaniers précoces et affaiblis et une diminution marquée des écoulements estivaux, constitue l'un des indicateurs les plus clairs de l'influence du changement climatique sur l'hydrologie en montagne. Ces modifications dans le régime hydrologique s'accompagnent d'une intensification des épisodes de sécheresse, qui représentent un défi croissant pour la gestion des ressources en eau en milieu montagnard. Ces transformations, dans un contexte de demande croissante en eau, conduisent à anticiper une évolution significative des régimes hydrologiques suisses, appelant à des adaptations dans la gestion hydrologique.

2.2.6 Les sécheresses

La sécheresse est un phénomène climatique extrême qui désigne une période prolongée de déficit hydrique, perturbant l'équilibre naturel des écosystèmes et des activités humaines (OFEV, 2025). On distingue généralement trois types de sécheresse, qui peuvent se cumuler et s'intensifier (Technical Report CH2018, 2018) :

- La **sécheresse météorologique**, qui résulte d'un manque de précipitations sur plusieurs semaines ou mois, notamment durant la saison estivale.
- La **sécheresse agricole** - ou écologique survient quand les précipitations insuffisantes ne permettent plus de maintenir une humidité des sols suffisante pour les écosystèmes ou la production fourragère.
- La **sécheresse hydrologique** se manifeste par une baisse marquée du débit des sources et ruisseaux, parfois jusqu'à l'assèchement total.

Les différentes formes de sécheresse, souvent interdépendantes, peuvent aussi provoquer des déséquilibres socio-économiques locaux, notamment dans les alpages, en créant une tension entre les besoins en eau pour le bétail, les usages domestiques et les ressources disponibles.

Le manque de précipitations est généralement la cause principale d'une sécheresse. Il représente un déficit du côté de l'offre en eau et constitue le facteur déterminant d'une sécheresse météorologique. Dans ces conditions, d'autres facteurs, tels qu'une évapotranspiration accrue induite par un rayonnement plus intense, peuvent intensifier la pénurie d'eau et réduire davantage l'humidité du sol, menant ainsi à une sécheresse agricole (Technical Report CH2018, 2018). Par ailleurs, les conditions initiales en matière d'humidité du sol et de stockage de l'eau, qu'il soit de surface ou souterrain, influencent fortement l'apparition et l'intensité des sécheresses agricoles et hydrologiques, ainsi que la réponse d'un territoire face à un épisode de sécheresse.

En Suisse, les sécheresses récurrentes depuis le début du XXI^e siècle montrent une tendance à l'assèchement. Dans ce contexte, le changement climatique « influencera les facteurs

déclenchant la sécheresse par la modification de la circulation atmosphérique et des régimes de précipitations associés, ainsi que par les changements de rayonnement, de température de l'air, d'humidité atmosphérique et de vent » (Technical Report CH2018, 2018, p. 133, traduction libre).

Plusieurs indices permettent d'évaluer les différents types de sécheresse, parmi lesquels (Technical Report CH2018, 2018) :

- L'indice des jours secs consécutifs (CDD)
- L'indice normalisé de précipitations (Standardized Precipitation Index, SPI)
- La différence précipitations - évapotranspiration (P-E)
- L'anomalie normalisée d'humidité du sol (SMA), qui repose sur l'évapotranspiration réelle résultant à la fois des conditions atmosphériques et des limitations dues à l'humidité du sol simulée

Sous le scénario RCP 8.5, les projections prévoient une **augmentation des périodes de jours secs consécutifs** (CDD) à l'échelle européenne d'ici 2085, avec un déplacement progressif de ce signal vers le nord au cours de l'année, s'étendant ainsi plus au nord pendant la saison estivale. L'indice SPI prévoit également une **intensification et une extension de l'assèchement** - particulièrement en été - dans le sud de l'Europe, tandis que le nord du continent devrait connaître une tendance à l'humidification, plus marquée en hiver et au printemps (Technical Report CH2018, 2018). La Suisse se situe « à la frontière entre les signaux d'assèchement (en été/automne) et d'humidification (en hiver/printemps) » (Technical Report CH2018, 2018, p. 135, traduction libre). Les indices concernant les sécheresses agricoles - P-E et SMA - reflètent également une **intensification de l'assèchement des sols** dans le sud de l'Europe à l'horizon 2085.

Pour la Suisse, toujours sous le scénario RCP 8.5, les indices étudiés mettent également en évidence « une tendance à l'augmentation de la durée des périodes sèches (CDD) et des tendances à l'assèchement en été (SPI3, P-E, SMA), ainsi qu'à l'humidification en hiver (mais uniquement lorsque les effets de stockage sont négligés, c'est-à-dire pour SPI3 et P-E) » (Technical Report CH2018, 2018, p. 137, traduction libre) (Fig. 5 et 6). Toutefois, la variabilité interne demeure un facteur déterminant, ce qui rend l'anticipation du degré exact d'assèchement particulièrement complexe.

La chaîne du Jura apparaît comme l'une des régions les plus exposées aux sécheresses météorologiques et agricoles, avec une forte augmentation prévue du nombre de jours secs consécutifs selon le scénario RCP 8.5. De plus, l'indice SPI anticipe un déficit de précipitations particulièrement marqué à l'avenir, surtout durant les mois d'été et d'automne, tandis que l'hiver et le printemps devraient connaître une légère humidification (Fig. 5). L'augmentation projetée de l'évapotranspiration, particulièrement en été (Fig. 6), accentuerait la faible humidité des sols, déjà limitée par la faible capacité de rétention du sous-sol calcaire jurassien (Technical Report CH2018, 2018).

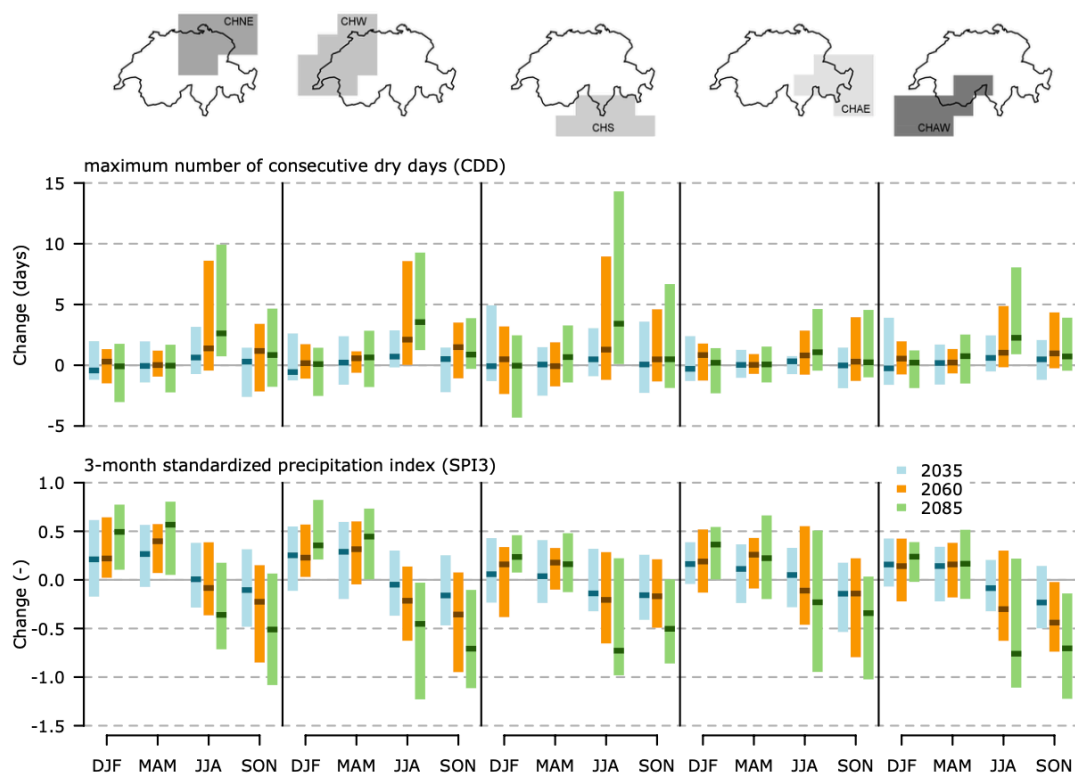


Figure 5. Changements moyens multi-modèles des indices de sécheresse météorologique CDD (haut) et SPI3 (bas), aux horizons 2035, 2060 et 2085, selon le scénario RCP 8.5 (Source : Technical Report CH2018, 2018).

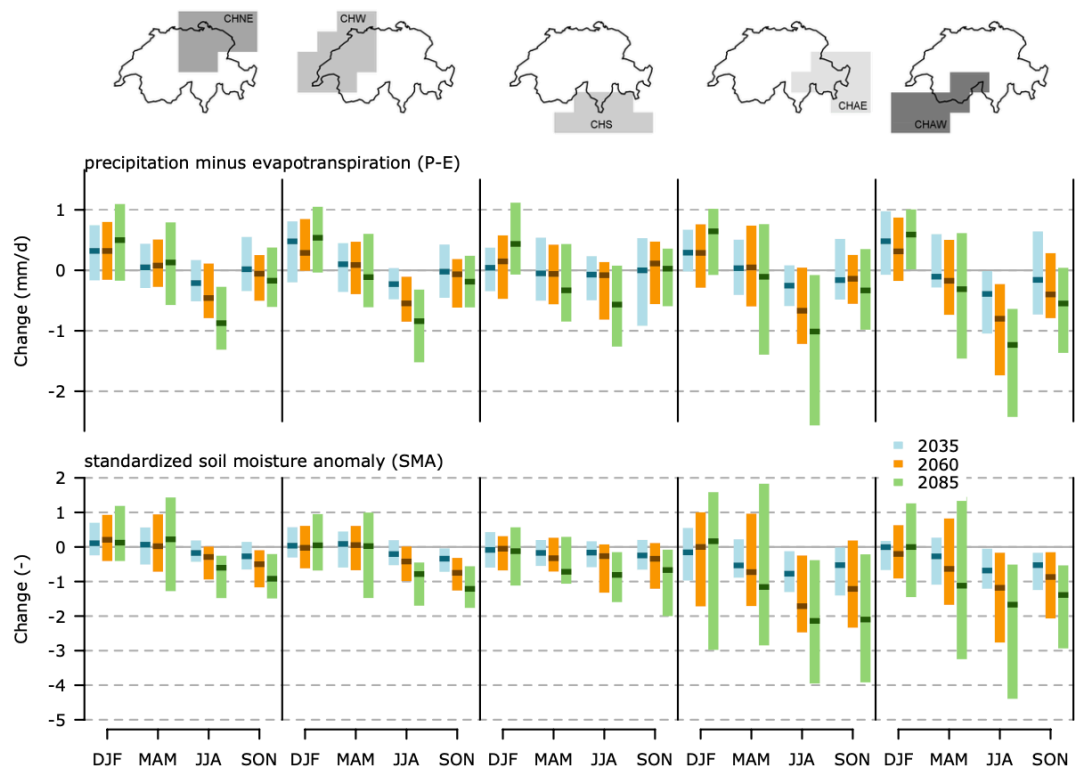


Figure 6. Changements moyens multi-modèles des indices de sécheresse agricole P-E (haut) et SMA (bas), aux horizons 2035, 2060 et 2085, selon le scénario RCP 8.5 (Source : Technical Report CH2018, 2018)

Au niveau local, le canton de Vaud illustre ces enjeux aux multiples facettes. Malgré un climat historiquement humide, cette région fait face à des épisodes récurrents de pénurie d'eau durant les étés récents (Milano et al., 2015). Même la chaîne du Jura, réputée pour ses ressources hydriques abondantes, connaît désormais des déficits ponctuels, liés à la diminution du manteau neigeux et à la baisse des précipitations estivales. Ces changements allongent et renforcent les périodes de stress hydrique, menaçant à la fois la résilience des systèmes agraires et la biodiversité des milieux montagnards.

Ces dynamiques invitent à dépasser une lecture strictement environnementale pour adopter une approche socio-écologique intégrée. La gestion durable de l'eau en milieu montagnard doit prendre en compte les interactions complexes entre changement climatique, facteurs environnementaux, pratiques agricoles et politiques territoriales. La vulnérabilité hydrique apparaît alors comme le résultat d'un système couplant facteurs biophysiques et dimensions socio-économiques, et constitue un défi majeur pour les activités agricoles en montagne, notamment dans le Jura, où la gestion de l'eau devient un enjeu central face aux pressions climatiques et territoriales.

2.3 Agriculture de montagne dans le Jura suisse

Sur la chaîne du Jura, l'agriculture n'est pas centrée sur les cultures, mais principalement sur l'estivage du bétail. Les surfaces d'estivage se situent à l'étage montagnard et subalpin, principalement entre 800 mètres et 1440 mètres d'altitude (Buttler, Spiegelberger, et al., 2012). Dans ces zones, le climat est relativement froid, avec une température moyenne quotidienne inférieure à 0°C pendant plus de 60 jours par an, et l'enneigement peut durer de décembre à avril. Le climat de ces régions limite donc les pratiques du pastoralisme à la période estivale, qui s'étend généralement de mai à septembre, afin d'utiliser le fourrage disponible pendant cette période de l'année (Herzog et Seidl, 2018). Le bétail qui pâture dans ces zones est généralement composé de génisses, de vaches laitières ou allaitantes, ainsi que de chevaux dans certaines régions (Buttler, Spiegelberger, et al., 2012). En revanche, les troupeaux d'ovins et de caprins sont peu présents, voire quasiment absents, dans les alpages jurassiens.

2.3.1 Les pâturages boisés

Le terme de « **pâturages boisés** » (Fig. 7) est utilisé principalement dans le Jura pour qualifier « les systèmes sylvo-pastoraux » constituant des écosystèmes façonnés par l'interaction entre l'homme et la nature au fil des siècles, servant principalement à l'estivage du bétail, ainsi qu'à la production de bois (Buttler, Gavazov, et al., 2012). Ces pâturages traditionnels des Préalpes et du haut Jura sont essentiels pour l'agriculture de montagne, car ils fournissent la base alimentaire des troupeaux dans une agriculture principalement axée sur l'élevage bovin laitier (Sérès, 2010 ; Gavazov et al., 2013). Dans le Jura suisse, les montagnes sont largement couvertes de pâturages boisés (Gavazov et al., 2013). En Suisse, ces derniers représentent 11%

du territoire national, soit un tiers de ses terres agricoles, répartis dans les Alpes et dans le Jura (Herzog et Seidl, 2018).



Figure 7. Pâturage boisé du Jura vaudois, alpage du Mont-Tendre et du Bucley (Photos : Lorena Roulin)

Les paysages de pâturages boisés se caractérisent par une mosaïque paysagère et une biodiversité riche, comprenant à la fois des forêts denses, des pâturages semi-boisés, où les arbres sont dispersés ou regroupés, et des zones plus ouvertes où ne restent que quelques arbres (Gavazov et al., 2013). Quatre structures de végétation sont principalement observées dans les pâturages boisés (Buttler, Spiegelberger, et al., 2012) :

- Les **pâturages non boisés**, où le recouvrement arboré est inférieur à 1%.
- Les **pâturages faiblement boisés**, où la couverture forestière varie de 1% à 20%, principalement sous forme d'arbres isolés.
- Les **pâturages densément boisés**, avec une couverture forestière s'étendant de 20% à 70% de la surface du pâturage, souvent sous forme de bosquets.
- Les **forêts pâturées**, où la couverture arborescente recouvre plus de 70% de la surface.

La diversité des paysages et des sols est renforcée par la complexité du relief, qui crée des microclimats et des habitats favorables à de nombreuses espèces végétales et animales. Par ailleurs, l'activité du bétail, en particulier le piétinement, joue un rôle central dans la structuration de ces milieux, en favorisant la diversité végétale et en dynamisant l'évolution des paysages (Buttler, Spiegelberger et al., 2012).

Les pâturages boisés du Jura, éléments emblématiques du paysage suisse, sont aujourd'hui fragilisés par le changement climatique (Peringer et al., 2013). L'élévation des températures et les modifications du régime des précipitations entraînent un déplacement en altitude de la végétation, notamment de la limite de la forêt (Vitasse et al., 2023). Ce phénomène s'explique par la réduction de l'effet limitatif du froid, permettant aux arbres de coloniser des zones plus en altitude (Lenoir et Gégout, 2010). Ces changements impactent la composition des peuplements forestiers : l'épicéa, encore dominant dans le Jura (Gallandat et Gillet, 1999), montre un déclin marqué depuis les années 1980 en raison de sa faible résistance à la sécheresse et aux températures élevées (Joly, 2015 ; Vitasse et al., 2023). Il est progressivement remplacé par des essences plus tolérantes comme le hêtre, l'érable ou le

chêne (Buttler, Gavazov et al., 2012). De plus, une recolonisation forestière des pâturages peu boisés ou ouverts est en cours, avec une augmentation prévue de la couverture arborée d'ici 2050 et 2100 selon un scénario climatique modéré (Buttler, Gavazov et al., 2012).

Dans ce contexte, le bétail joue un rôle clé en maintenant l'ouverture du paysage en pâture notamment en bordure de forêt. En effet, les pâturages boisés se caractérisent par un équilibre délicat entre la pression exercée par la pâture et la progression naturelle de la forêt (Gallandat et al., 1995 ; Gallandat et Gillet, 1999). Cette interaction assure une coexistence entre végétation arborée et herbacée, favorisant à la fois la biodiversité et la productivité pastorale.

Cependant, cet équilibre est fragile ; le bétail doit pouvoir circuler librement sur l'ensemble de la surface pâturée afin d'exercer une pression suffisante pour freiner l'avancée forestière. Or, dans certains secteurs, cette mobilité est limitée, que ce soit par la topographie, les délimitations des parcs ou l'insuffisance des infrastructures pastorales, notamment des points d'eau. Lorsque le bétail ne parvient plus à pâture certaines zones, celles-ci tendent à être colonisées par la forêt, provoquant une fermeture du paysage, modifiant la dynamique écologique et réduisant la surface du pâturage. Ceci peut donc modifier l'équilibre entre zones forestières et pâturées, un équilibre essentiel dans les pâturages boisés jurassiens (Buttler, Gavazov, et al., 2012).

Pour pallier ces difficultés, les aménagements pastoraux jouent un rôle crucial. La mise en place d'infrastructures adaptées, telles que l'ajout de points d'eau, permet de réduire les déplacements du bétail, d'assurer un pâturage homogène et de contrôler l'équilibre forêt-pâturage. Ces mesures contribuent à maintenir la multifonctionnalité des pâturages boisés, conciliant production agricole et conservation du paysage montagnard (Buttler, Spiegelberger, et al., 2012).

Cette coexistence entre arbres, buissons et herbages résulte donc à la fois de la dynamique naturelle de la végétation (Gallandat et Gillet, 1999) et d'une longue histoire de gestion multifonctionnelle des terres, alliant agriculture et sylviculture, tout cela sous un régime forestier, signifiant que ces pâturages boisés sont soumis à la législation forestière. Cette multifonctionnalité influence l'évolution constante de ces milieux, notamment sous l'effet des changements socio-économiques et climatiques (Buttler, Gavazov, et al., 2012). Ainsi, la gestion des pâturages boisés requiert une approche intégrée, qui associe le suivi des pratiques pastorales, l'aménagement des infrastructures hydriques et la compréhension des processus écologiques, afin de préserver cet équilibre essentiel face aux transformations environnementales et climatiques actuelles.

2.3.2 La gestion de l'eau dans les alpages du Jura

Ces zones pastorales, principalement dédiées à l'élevage bovin et à la production de fromages traditionnels, dépendent fortement de la disponibilité des ressources en eau (Sérès, 2010). En effet, la croissance des herbages nécessite une grande quantité d'eau, et cette ressource est

également cruciale pour l'abreuvement du bétail, pour la production fromagère, ainsi que pour la préservation des paysages emblématiques de montagne.

Or, la rareté de la ressource en eau durant l'été s'est intensifiée au fil des décennies, notamment dans le Jura. En période estivale, lorsque les troupeaux sont présents sur les alpages, les besoins en eau augmentent considérablement (Sautier, 2009). Cette période coïncide fréquemment avec des épisodes de sécheresse, ce qui accentue les difficultés de gestion, alors qu'une quantité suffisante et une qualité adéquate de l'eau sont indispensables au bon déroulement des activités pastorales (Sautier, 2009).

Situés dans les parties amont des bassins versants, les alpages disposent généralement de leur propre système de captage et de distribution de l'eau. Cette position leur permet une gestion autonome de l'eau, tant que la ressource reste suffisante. Chaque alpage constitue ainsi une entité indépendante, regroupant l'ensemble des éléments liés à la ressource en eau, à ses usages et à son administration. La figure 8 illustre cette organisation, à l'exemple des alpages jurassiens, en présentant trois grands systèmes interdépendants :

- Les **ressources** en eau
- Les **usages** de l'eau
- Les **acteurs** de l'eau.

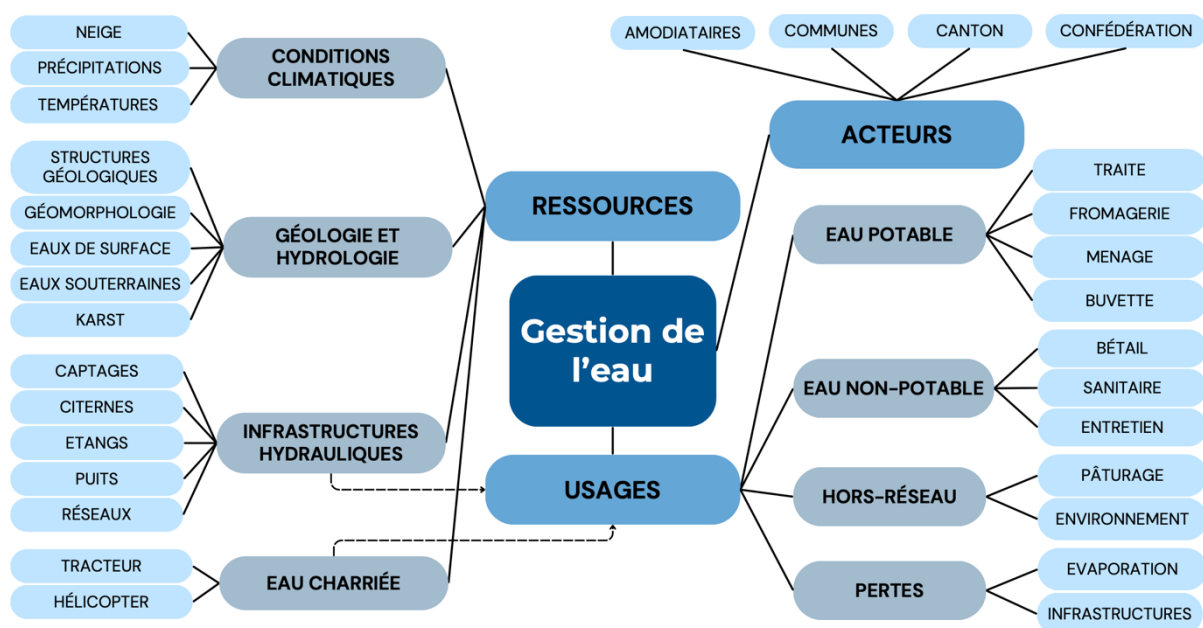


Figure 8. Système de gestion de l'eau sur un alpage jurassien : ressources, usages et acteurs (Roulin, 2025)

La gestion de l'eau sur un alpage inclut à la fois le **captage**, l'**adduction**, le **stockage** et la **distribution** de la ressource pour les différentes activités présentes sur le site (Sautier, 2009). Assurer la sécurité hydrique ne repose pas uniquement sur des infrastructures de captage, d'adduction ou de stockage, mais nécessite également de prendre en compte les pratiques

d'adaptation développées par les exploitants, qu'il s'agisse de mesures ponctuelles, pour faire face à des crises, ou sur la longue durée, visant à réduire ou à ajuster les demandes en eau à la ressource disponible. Dans cette optique, les chapitres suivants s'attachent à analyser en détail les trois grands systèmes interdépendants de la gestion de l'eau en alpage qui interagissent étroitement pour assurer un équilibre entre disponibilité, usage et gestion de la ressource.

2.3.2.1 Les ressources en eau

Les ressources en eau regroupent à la fois les apports liés aux conditions environnementales - la disponibilité naturelle déterminée par les caractéristiques géologiques et hydrologiques - ainsi que les volumes stockés dans les infrastructures hydrauliques ou acheminés jusqu'à l'alpage, qui conditionnent l'usage de cette ressource.

Les **conditions climatiques**, notamment les précipitations solides et liquides, jouent un rôle central dans la constitution des réserves d'eau nécessaires à la période d'estivage. En effet, de nombreux alpages dépendent principalement des précipitations pour alimenter leurs stocks en eau (Gallandat et al., 1995). Les apports sous forme de neige constituent un stock naturel, tandis que les apports sous forme liquide doivent être efficacement stockés afin de répondre aux besoins accrus en eau durant la saison estivale (Sautier, 2009). Les précipitations constituent également une ressource essentielle pour l'alimentation en eau des herbages pâturés sur l'alpage, influençant par ailleurs l'humidité naturelle du sol, un facteur clé pour la croissance et la qualité du fourrage.

Les températures peuvent également influencer la disponibilité de cette ressource durant la période estivale. En effet, des températures élevées tendent à intensifier l'évaporation, notamment dans les étangs, et à accroître l'évapotranspiration de la végétation. Elles accélèrent également la fonte de la neige à la fin du printemps. L'ensemble de ces phénomènes contribue à diminuer la disponibilité des ressources en eau, avec des répercussions directes sur les activités agricoles et l'abreuvement du bétail.

Ensuite, la ressource en eau dans les alpages du Jura est également fortement conditionnée par le **contexte géologique et hydrologique** de la région. La chaîne du Jura est principalement composée de roches calcaires, sensibles aux processus karstiques qui facilitent l'infiltration rapide de l'eau dans le sous-sol, ce qui limite la présence d'eau en surface, notamment sous forme de ruisseaux ou d'étangs. Dans ce contexte, l'accès direct à la ressource en eau est souvent restreint. Certains alpages disposent néanmoins de sources captées ou de puits qui permettent l'exploitation d'eaux souterraines issues d'aquifères de faible profondeur, mais ces ressources restent localisées et inégalement réparties. L'absence d'un réseau hydrographique dense de surface accentue la dépendance des exploitations aux infrastructures de stockage, qui deviennent des éléments essentiels pour sécuriser l'approvisionnement en eau pendant la saison d'estivage.

Dans ce contexte, la disponibilité de la ressource en eau dépend largement des **infrastructures hydrauliques** présentes et de leur qualité. Pour répondre à la diversité des besoins, les

systèmes de captage, d'adduction, de stockage et de distribution de l'eau peuvent prendre des formes variées.

Pour capter ces différentes sources d'eau, les alpages disposent de nombreux systèmes (Fig. 9). Les toitures des chalets ou autres constructions sont souvent utilisées pour récupérer l'eau de pluie via des canalisations et descentes pluviales. Par ailleurs, certains alpages exploitent des captages de sources naturelles ou de petits cours d'eau, permettant de collecter l'eau avant son infiltration ou son écoulement. Ces dispositifs sont essentiels pour maximiser les apports d'eau en particulier dans les régions où les ressources en eau de surface sont limitées.



Figure 9. Systèmes de captage et d'adduction d'eau en alpage (Photos : Lorena Roulin)

Ensuite, la gestion de l'eau en alpage repose en grande partie sur des infrastructures de stockage adaptées (Fig. 10). Les citernes en béton, souvent enterrées, sont installées sur des points hauts stratégiques afin de faciliter une redistribution gravitaire de l'eau, ou à proximité des chalets pour garantir un accès direct à l'eau nécessaire à l'habitat et à la fromagerie.

Par ailleurs, les étangs complètent ces dispositifs en constituant des réserves importantes. Ces infrastructures jouent un rôle central dans la conservation de l'eau accumulée durant la saison hivernale, assurant ainsi une disponibilité sécurisée pendant l'été. Les volumes stockés constituent la ressource mobilisable pour les diverses activités de l'alpage, telles que l'abreuvement du bétail, les usages domestiques et la production fromagère.



Figure 10. Systèmes de stockage d'eau en alpage. À gauche, une citerne enterrée utilisée pour le stockage de l'eau ; à droite, un étang servant de réservoir agricole (Photos : Lorena Roulin).

Enfin, l'eau stockée est distribuée à travers différents réseaux adaptés aux usages spécifiques. La plupart du temps, elle est acheminée par gravité via des canalisations jusqu'à des bassins, qui constituent les principaux points d'abreuvement pour le bétail (Fig. 11). Pour les besoins domestiques et fromagers, une pompe est généralement utilisée pour remonter l'eau depuis les citernes souterraines jusqu'au chalet. Lorsque les eaux souterraines sont accessibles, un forage équipé d'une pompe solaire peut alimenter directement les points d'abreuvement. Les pompes solaires sont aussi utilisées pour faire remonter de l'eau depuis une infrastructure vers une autre.



Figure 11. Systèmes de distribution d'eau en alpage. Les images de gauche montrent des bassins utilisés pour distribuer l'eau au bétail, et à droite, un tuyau qui achemine l'eau par gravité depuis la citerne enterrée jusqu'au bassin pour le bétail (Photos : Lorena Roulin).

Dans certains cas, les alpages sont raccordés au réseau communal, notamment en présence d'une fromagerie, afin de garantir une eau de qualité contrôlée (Sautier, 2009). À l'inverse, les eaux issues des précipitations ou de petites sources ne sont pas vérifiées régulièrement et nécessitent souvent un traitement pour un usage domestique. Toutefois, l'hygiène dépend aussi de l'entretien des installations. Pour les usages non alimentaires, comme l'abreuvement du bétail ou les sanitaires, l'eau stockée localement peut être utilisée sans traitement (Sautier, 2009).

Dans certaines situations, une dernière source d'eau peut provenir de l'**eau charriée** sur l'alpage par tracteur tirant des bossettes, par camion-citerne ou encore par hélicoptère, en fonction des moyens disponibles et des volumes d'eau nécessaires. Cette ressource est mobilisée principalement en période de stress hydrique, lorsque les ressources en eau présentes sur l'alpage ne suffisent pas à répondre aux besoins de ce dernier.

2.3.2.2 Usages de l'eau

Les usages de l'eau sur les alpages sont nombreux et variés. Ils concernent à la fois l'eau non potable, potable et hors réseau de distribution nécessaire aux différentes activités de l'alpage. Ces usages dépendent notamment de la disponibilité de la ressource, elle-même conditionnée par les infrastructures hydrauliques présentes sur l'alpage.

Les différents usages de l'eau sur un alpage peuvent représenter des quantités d'eau très importantes et peuvent varier notamment en fonction des conditions climatiques, des

infrastructures hydrauliques, ainsi que des pratiques pastorales de l'alpage. Le tableau suivant propose un aperçu des différents usages de l'eau ainsi que des volumes d'eau nécessaires au bon fonctionnement des activités pastorales (Tab. 1).

Tableau 1. Estimation des besoins en eau pour les alpages en fonction des différents usages de l'eau (Sautier, 2009 ; SFEA, cours 2023)⁶

Besoins en eau non potable	
Vaches laitières	<i>En moyenne 100 à 150 litres / UGB / jour</i>
Jeune bétail	<i>En moyenne 60 à 80 litres / UGB / jour</i>
Vaches allaitantes ou tarées	<i>En moyenne 80 à 100 litres / UGB / jour</i>
En conditions sèches	<i>Plus de 100 litres / UGB / jour</i>
Machine à traire au port, sans fabrication	<i>Environ 150 litres / jour</i>
Traite directe, sans fabrication	<i>Environ 200 litres / jour</i>
Salle de traite	<i>Environ 400 litres / jour</i>
Abreuvoir à niveau constant	<i>Un abreuvoir pour 12 à 15 vaches</i>
Besoins en eau potable	
Fromagerie	<i>Un litre d'eau / litre de lait</i>
Amodataire, personnel	<i>100 litres / personne / jour ; avec WC et douche</i>
Buvette	<i>20 places = un équivalent-habitant = 100 litres/jour</i>
Pour la saison d'estivage	
Besoins totaux sur la durée de pâture + 21 jours de "réserve sécheresse" à raison de 80 litres/UGB, soit pour une durée de pâture de 120 jours : 11'280 litres / UGB⁷	

L'**eau non potable** est utilisée lorsqu'une qualité contrôlée n'est pas requise. Cela inclut par exemple l'abreuvement du bétail, le nettoyage de matériel, ou l'utilisation des sanitaires en l'absence d'eau potable, ce qui permet d'économiser cette dernière pour des usages prioritaires (Sautier, 2009). Elle provient généralement des réserves de l'alpage : étangs, citernes de récupération d'eau de pluie, ou petites sources.

Ensuite, les usages liés à l'**eau potable** sur les alpages concernent principalement les besoins domestiques liés au chalet (cuisine), à l'hygiène personnelle (douche), aux WC, à la

⁶ Il convient de souligner que ce tableau présente uniquement une estimation des besoins en eau potable et non potable connectés au réseau de distribution ; les quantités d'eau liées aux usages hors réseau et aux pertes ne peuvent pas être précisément quantifiés et ne sont pas pris en compte ici, car ils ne font pas partie du réseau de distribution.

⁷ L'unité de gros bétail (UGB) est une unité de référence utilisée pour regrouper le bétail de différentes espèces et âges en appliquant des coefficients spécifiques, initialement basés sur les besoins nutritionnels ou alimentaires de chaque type d'animal. 1 UGB représente l'équivalent pâturage d'une vache laitière. (Eurostat. (s. d.). *Statistics explained*. Consulté le 16 janvier 2025, à l'adresse [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Livestock_unit_\(LSU\)/fr](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Livestock_unit_(LSU)/fr))

transformation des produits laitiers (notamment la fabrication de fromage), ainsi qu'à certaines activités touristiques, comme les buvettes ou les restaurants (Sautier, 2009). La qualité de l'eau utilisée pour ces usages doit être contrôlée, notamment pour des raisons d'hygiène. Ces besoins sont souvent couverts par le raccordement au réseau communal ou par des sources locales traitées.

Enfin, certains usages environnementaux se situent **hors du réseau de distribution** d'eau de l'alpage, mais sont tout de même essentiels au fonctionnement du système pastoral. Cela inclut par exemple l'eau nécessaire à la végétation des pâturages, au développement du fourrage, ou encore au maintien de la biodiversité, par exemple dans des zones humides. Ces apports proviennent directement des précipitations et de l'humidité naturelle du sol, et ne sont ni stockés ni distribués par les infrastructures de l'alpage.

Une partie de l'eau stockée peut subir des **pertes** en raison de défauts ou d'une mauvaise qualité des infrastructures hydrauliques, ou encore à cause de problèmes dans le réseau de stockage et d'approvisionnement, comme une citerne qui fuit ou un entretien insuffisant des équipements. Dans le cas de l'eau contenue dans les étangs et bassins de l'alpage, une fraction peut s'évaporer avant même d'être utilisée pour l'abreuvement du bétail. De plus, l'eau présente dans l'herbe et le sol peut également se perdre par évapotranspiration, contribuant ainsi à réduire la ressource réellement disponible pour les usages pastoraux.

2.3.2.3 Acteurs de l'eau

Dans le système global de gestion de l'eau, les acteurs de cette ressource jouent un rôle essentiel, notamment face à la fréquence croissante des épisodes de sécheresse. Cette gestion repose sur une organisation institutionnelle structurée à plusieurs échelles, où les amodiataires⁸, les communes, les cantons et la Confédération assument chacun des responsabilités spécifiques et complémentaires⁹.

Les **amodiataires**, souvent des agriculteurs ou des collectifs agricoles, sont les premiers concernés par l'approvisionnement en eau pour leur bétail. En lien étroit avec le terrain et avec les besoins en eau du bétail, ils connaissent les sources d'eau disponibles et adaptent leurs pratiques pastorales aux variations climatiques. Ils peuvent être amenés à entretenir les installations existantes - captages, bassins, citernes, conduites, chalet - voire à transporter l'eau lorsque les ressources locales sont insuffisantes. Ils peuvent également initier des projets d'amélioration structurelle sur l'alpage (OFAG, 2020).

Les **communes**, souvent propriétaires des alpages qu'elles mettent à disposition par amodiation, ont la responsabilité d'assurer un cadre adéquat pour l'exploitation estivale. Cela

⁸ Dans un alpage, un amodiateur est une personne qui prend à bail l'exploitation d'un alpage, en assurant temporairement la gestion du pâturage, du bétail et des infrastructures, sans en être propriétaire. (Larousse. (s. d.). *Amodiateur*. In *Dictionnaire français*. Consulté le 21 juillet 2025, à l'adresse <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/amodiateur/2968#:~:text=1.,d'une%20mine%20est%20amodié> e)

⁹ La situation décrite dans ce chapitre est celle en vigueur dans le canton de Vaud.

inclut fréquemment la gestion ou la prise en charge d'une part importante des coûts liés à l'aménagement des alpages, aux infrastructures hydrauliques (réservoirs, conduites, étangs, bassins) et aux bâtiments (habitation, fromagerie, cave) (OFAG, 2020 ; Haesen et Mettler, 2023). Elles jouent aussi un rôle de coordination entre les différents utilisateurs et représentent « les intérêts du public en matière de paysage culturel et de biodiversité » (Haesen et Mettler, 2023).

Les **cantons** interviennent par l'intermédiaire de leurs services agricoles, forestiers, environnementaux ou d'aménagement du territoire. Ils fixent les règles encadrant le captage de l'eau, la charge animale et la protection des zones sensibles.

La **Confédération** exerce une surveillance au plus haut niveau et assure la coordination fédérale. Dans le domaine de l'agriculture, cette politique publique est très centralisée. Par le biais notamment des paiements directs¹⁰, la Confédération joue un rôle clé dans la gestion des alpages, y compris dans le secteur de la gestion de l'eau.

Les cantons et la Confédération apportent conjointement un soutien financier aux projets d'amélioration structurelle des alpages (OFAG, 2020), notamment par le biais de subventions accordées dans le cadre des améliorations structurelles ou de la Loi fédérale sur l'amélioration de la structure agricole (LFE). Les coûts restant à charge doivent être pris en charge par les porteurs de projets et les communes.

Dans les cas où l'alpage est **relié au réseau communal**, l'amodiatrice doit avoir une autorisation de la commune et respecter des conditions précises : périodes d'utilisation limitées, volumes définis, facturation selon la quantité prélevée ou sous forme de forfait. Bien que cette solution assure un approvisionnement régulier pour les alpages en période de sécheresse, elle reste coûteuse, en raison notamment des extensions sur de grandes distances (gros œuvre) et des différences d'altitude nécessitant un pompage, dépendante des capacités du réseau communal et parfois sujette à des restrictions, notamment en période de forte demande en plaine.

2.3.3 Les déterminants de la demande en eau

Après avoir présenté un aperçu du système de gestion de l'eau sur les alpages, à l'exemple des alpages jurassiens, il est essentiel de s'intéresser aux facteurs qui déterminent la demande en eau. Un certain nombre de paramètres influencent la quantité d'eau nécessaire au bon déroulement et à la pérennité des activités pastorales. Comprendre ces déterminants permet

¹⁰ Dans le canton de Vaud, les paiements directs sont des contributions financières versées par la Confédération et le canton aux agriculteurs pour des prestations d'intérêt public, telles que la préservation de l'environnement, des méthodes culturales durables, et la mise à l'alpage des animaux. De manière générale, ces paiements visent à soutenir la viabilité économique de l'agriculture, tout en préservant les paysages ouverts et la biodiversité, en particulier dans les alpages. (État de Vaud. (s.d.). *Contributions et aides financières agricoles*. Consulté le 2 septembre 2025, à l'adresse <https://www.vd.ch/economie/agriculture-et-viticulture/contributions-et-aides-financieres-agricoles>)

de mieux appréhender comment, quand et en quelle quantité l'eau est mobilisée (Cominola et al., 2023).

La demande en eau se répartit principalement entre les besoins liés au **bétail** et ceux liés aux **bâtiments**, et varie selon plusieurs facteurs, notamment les conditions environnementales, le type et le nombre de bêtes, les pratiques pastorales, l'usage du chalet ainsi que le type de production de l'exploitation (Fig. 12).

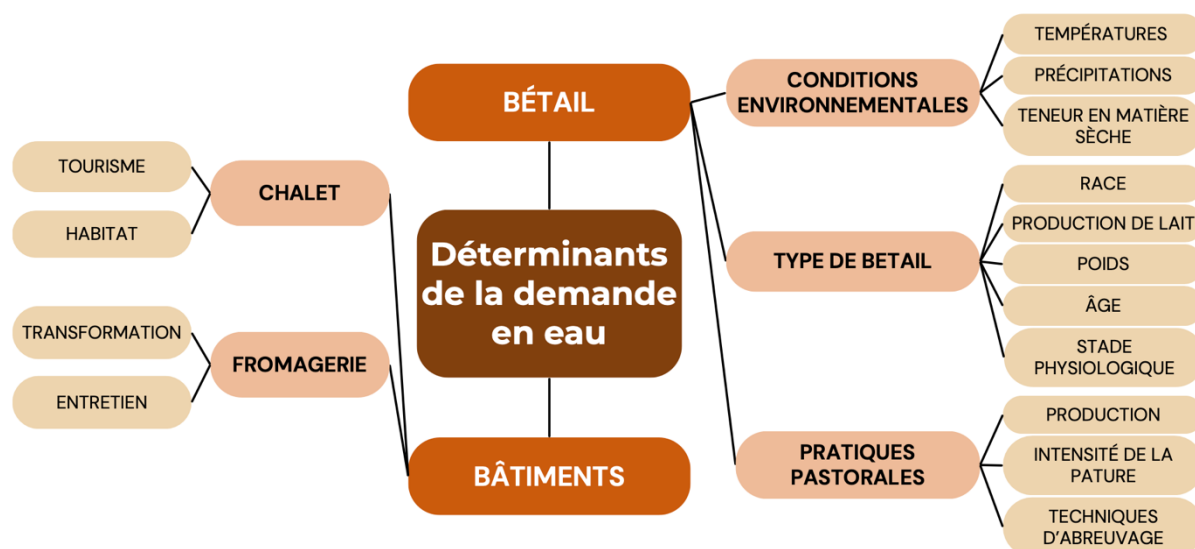


Figure 12. Les déterminants de la demande en eau sur un alpage (Roulin, 2025)

2.3.3.1 Les conditions environnementales

Les conditions environnementales influencent directement la demande en eau. Les températures élevées, tout comme les précipitations - qui agissent sur la teneur en matière sèche du fourrage - ont un impact sur la quantité d'eau nécessaire à l'abreuvement du bétail.

Les **températures** élevées amplifient les besoins en eau du bétail, notamment lors des périodes prolongées de forte chaleur ou de sécheresse (Ouarfli et Chehma, 2014). Ces périodes de stress thermique affectent la reproduction, la santé, la croissance et le régime alimentaire du bétail, tout en augmentant la quantité d'eau consommée. En effet, la consommation d'eau est fortement corrélée à la température extérieure maximale (Ménard et al., 2012 ; SFEA, cours 2023). Dans son livre, Olkowski (2009) propose un graphique qui présente la modification des besoins en eau des bovins face à l'augmentation des températures (Fig. 13). Bien que la consommation d'eau dépende du poids de l'animal, une augmentation liée à la température reste néanmoins observable.

Les vaches, quelle que soit leur catégorie, y compris les vaches laitières en lactation, font face à des pertes d'eau par évaporation cutanée et respiratoire, corrélées à la température ambiante ; ces pertes deviennent significatives lorsque la température dépasse 14 °C (Boudon et al., 2013). L'INRA (1988) a également recommandé d'augmenter l'apport d'eau de 30%, 50%

ou 100% lorsque la température maximale quotidienne dépasse respectivement 20°C, 25°C ou 30°C (Boudon et al., 2013).

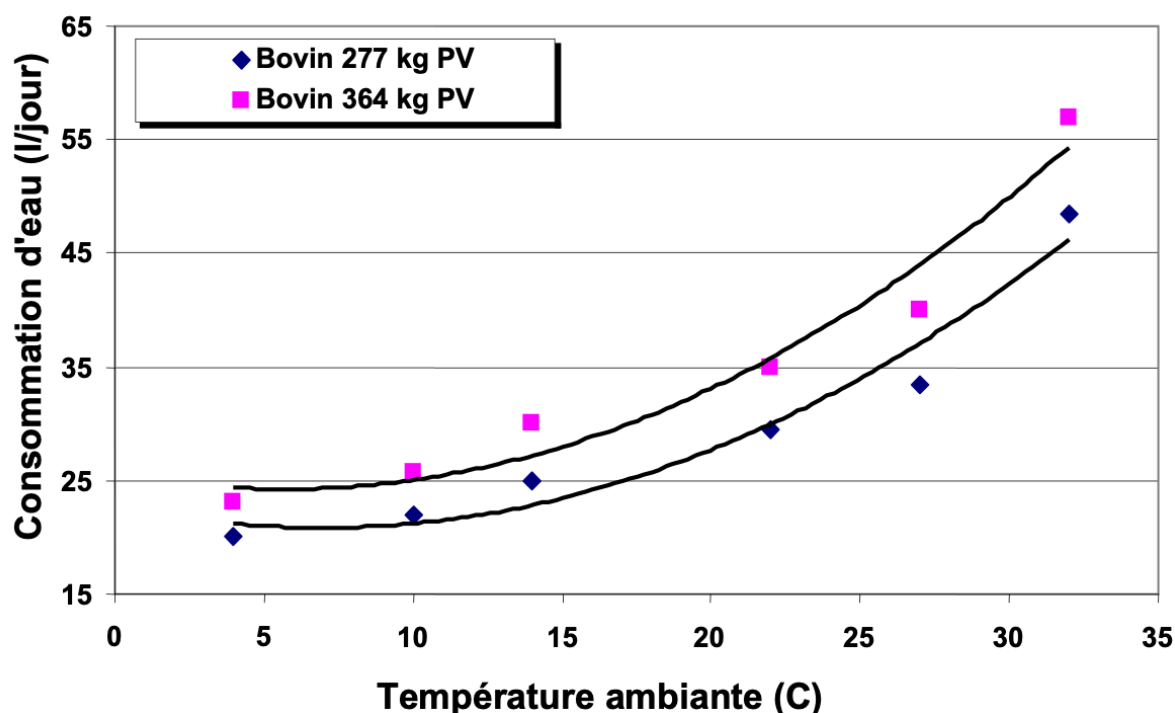


Figure 13. Modification de la consommation en eau du bétail en fonction des températures (Source : Olkowski, 2009, p. 31)

Ajoutée à la température, la **pluviométrie** apparaît comme un facteur influençant également la consommation d'eau du bétail. Ce facteur peut exercer une influence sur l'humidité naturelle de l'herbage dans les pâtures et cela a donc un impact direct sur la consommation d'eau (Boudon et al., 2013). En effet, au printemps, la consommation d'eau peut diminuer en raison de conditions plus humides (SFEA, cours 2023), tandis qu'en automne, la rosée, plus fréquente, contribue aussi à réduire les besoins d'abreuvement du bétail.

À l'inverse, en période de sécheresse, les animaux consomment davantage d'eau, notamment en raison de la teneur plus élevée en **matière sèche du fourrage**. En effet, l'alimentation du bétail est un facteur déterminant pour la consommation d'eau. Dans ce contexte, le contenu en matière sèche de l'alimentation est un facteur très important qui influence grandement la consommation en eau, notamment parce que l'eau est nécessaire au bon fonctionnement du rumen et à la digestion des fibres, comme le présente Olkowski (2009) par le graphique suivant (Fig. 14). Ce graphique montre une augmentation de la consommation d'eau par les animaux lorsque la quantité de matière sèche présente dans le fourrage est plus importante (Olkowski, 2009 ; Ouarfli et Chehma, 2014 ; SFEA, cours 2023).

Stockdale et King (1983) ont montré que des bovins nourris exclusivement avec de l'herbe ne couvrent qu'environ 28 % de leurs besoins journaliers en eau par l'abreuvement, le reste étant partiellement compensé par l'humidité contenue dans l'herbe. Au contraire, des températures élevées entraînent un dessèchement du fourrage et une diminution de sa qualité. Cela affecte également sa teneur en nutriments ainsi que sa valeur nutritive (Meisser et al., 2015). En

conséquence, la consommation d'eau d'abreuvement du bétail augmente souvent, afin de compenser la diminution de l'humidité et de la qualité du fourrage.

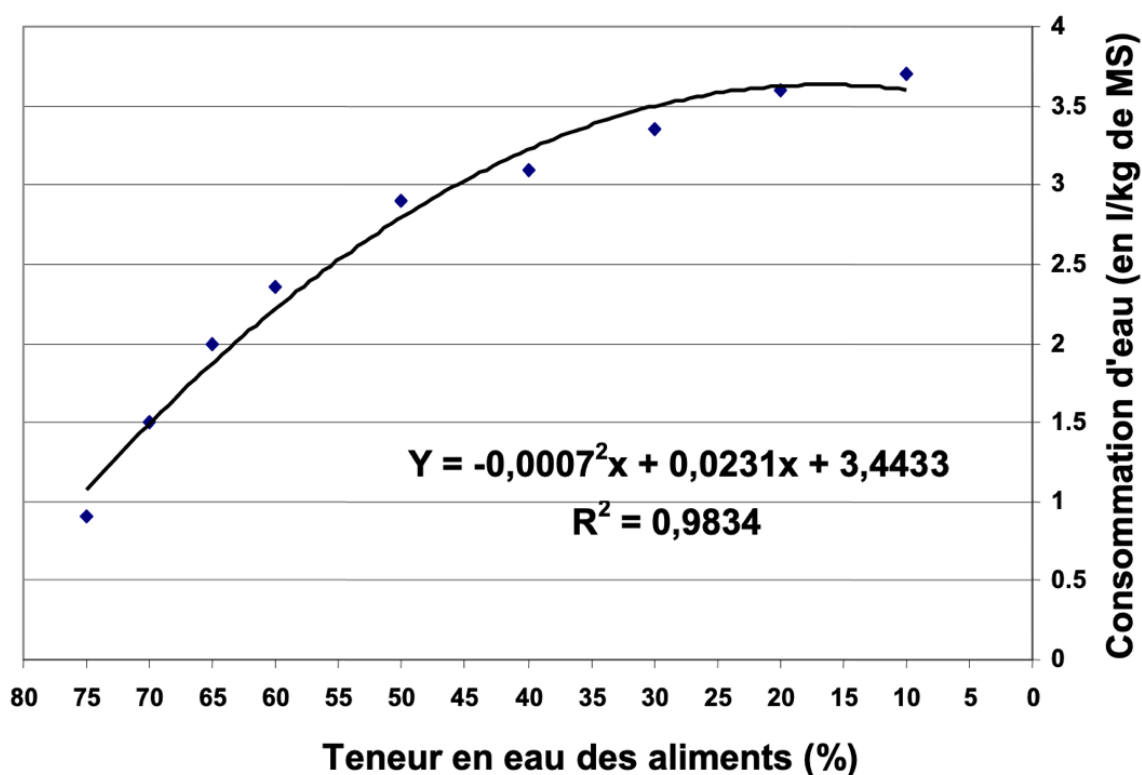


Figure 14. Corrélation entre la teneur en eau des aliments et la consommation en eau du bétail (Source : Olkowski, 2009, p. 30)

Dans ce contexte, le changement climatique, en augmentant les températures et en réduisant les précipitations durant la période d'estivage, tout en favorisant des épisodes de sécheresses, peut fortement impacter les quantités d'eau consommées par le bétail. Des températures plus élevées, associées à des herbages présentant une teneur élevée en matière sèche, peuvent entraîner une augmentation significative de la consommation d'eau par le bétail pendant la période d'estivage.

2.3.3.2 Le type de bétail

Selon Reynard et al. (2024), la race élevée influence directement la consommation en eau, ce qui en fait un facteur clé pour estimer les besoins hydriques sur un alpage. En effet, la quantité d'eau consommée par un bovin dépend de son poids, de son âge, de sa race, de son stade physiologique (croissance, lactation, gestation) et de sa fonction productive (production de lait ou de viande). Pour maintenir un rendement élevé, un animal doit disposer d'un apport hydrique suffisant (Olkowski, 2009).

La **production laitière** détermine positivement la demande en eau, de manière particulièrement importante : plus une vache produit de lait, plus elle consommera de l'eau en réponse à cette production. En raison de leur bilan hydrique interne, les pertes corporelles

doivent être compensées par des apports d'eau, notamment via l'abreuvement et la teneur en eau des aliments consommés (Boudon et al., 2013). La lactation est une phase qui accroît ces besoins en eau (Ménard et al., 2012) (Tab. 2). En général, une vache adulte non allaitante a des besoins plus modérés autour de 40 à 60 litres/jour environ, alors qu'une génisse en croissance consomme seulement environ 25 à 50 litres/jour, selon son poids (Ménard et al., 2012). Les races rustiques, comme la Grise rhétique, souvent moins productives en lait, présentent des besoins moindres que les races laitières intensives.

Tableau 2. Consommation en eau pour les vaches laitières en fonction de leur production de lait (Source : Ménard et al., 2012).

Production laitière (kg)	Abreuvement (L/vache/jour)
< 10 kg	42.9
10 - 20 kg	47.1
20 - 30 kg	51.1

Le **poids** de l'animal détermine également sa consommation en eau. En effet, un poids plus important va induire une consommation d'eau plus élevée. Des travaux comme ceux de Khelil-Arfa et al. (2012) et Appuhamy et al. (2016) ont ainsi proposé des équations de prédiction de la consommation en eau en fonction du poids des vaches laitières. Ce dernier varie en fonction de facteurs tels que l'**âge** ou la **race**. Par exemple, certaines races laitières très productives, comme la Holstein, présentent un poids élevé, ce qui se traduit par une consommation d'eau plus importante, mais également par un impact accru sur les pâturages en raison du piétinement.

Enfin, les **stades physiologiques** influencent également la consommation en eau. Par exemple, une vache en gestation a des besoins hydriques accrus pour soutenir le développement du fœtus (Luke, 1987), tandis qu'une vache allaitante nécessite également une quantité d'eau importante pour produire du lait pour son veau.

Ces variations doivent être prises en compte dans la planification de l'approvisionnement en eau sur les alpages, notamment dans les secteurs isolés où les ressources sont limitées. Il est donc essentiel de considérer non seulement la disponibilité en eau, mais aussi les changements qui interviennent au cours de la saison, en lien avec l'évolution du nombre de bêtes présentes sur l'alpage et leurs besoins différenciés selon les périodes. Adapter la charge en bétail et le choix des races constitue ainsi un levier important pour une gestion plus durable et efficiente de la ressource en eau.

2.3.3.3 Les pratiques pastorales

Les pratiques pastorales, telles que le type de production, l'intensité de la pâture, la rotation des parcelles et les techniques d'abreuvement, jouent un rôle clé dans la gestion de l'eau et influencent directement la consommation en eau de l'alpage et plus particulièrement du bétail (Ménard et al., 2012).

Selon les résultats de l'étude de Reynard et al. (2024), les entretiens menés auprès des amodiataires révèle que le **type de production** de l'alpage a un impact sur la demande en eau de ce dernier. En effet, le choix des exploitants concernant le type de bétail ou le mode de production influence la quantité d'eau nécessaire. L'élevage de vaches laitières, associé à la production de fromage sur l'alpage, entraîne des besoins en eau plus importants que ceux d'une exploitation de vaches allaitantes ou de vaches à viande, en raison des spécificités liées à chaque type d'activité.

La **gestion de la rotation du bétail** dans les parcs influence directement la consommation d'eau et constitue une stratégie essentielle pour préserver la végétation. Face aux évolutions climatiques en cours, les amodiataires doivent adapter leurs pratiques (Reynard et al., 2024). En période de sécheresse, une rotation plus rapide des animaux entre les parcelles permet de limiter le piétinement excessif du sol, ce qui contribue à maintenir la croissance de l'herbe malgré le manque d'eau (Reynard et al., 2024). Toutefois, lorsque les conditions sont trop sèches et que la repousse de l'herbe devient insuffisante, la croissance de la végétation entre les parcs peut ne pas suivre le rythme des besoins, rendant le stock de fourrage sur l'alpage insuffisant. Dans ce cas, l'exploitant peut être contraint de monter du foin (fourrage sec) pour nourrir le bétail. Or, ce type d'alimentation induit une augmentation significative des besoins en eau des animaux, accentuant la pression sur les ressources hydriques déjà limitées.

Selon Reynard et al. (2024), l'adaptation à la disponibilité en eau sur l'alpage passe aussi par une **gestion optimisée de l'abreuvement**, notamment en multipliant les points d'eau ou en ajustant la fréquence de déplacement du bétail entre les différents parcs. Ces mesures permettent d'optimiser la distribution de l'eau et d'assurer un accès régulier aux ressources hydriques nécessaires, tout en limitant les pertes et en adaptant la consommation aux contraintes locales. Une répartition judicieuse des points d'eau dans l'espace permet également de réduire la concentration des animaux autour d'un seul point, limitant ainsi le piétinement, la dégradation des sols et les pertes par infiltration. À l'inverse, cela permet d'augmenter la pression de pâturage dans les zones moins utilisées de l'alpage (Reynard et al., 2024). De plus, entretenir les infrastructures (bassins, conduites, abreuvoirs) et surveiller les niveaux d'eau en continu est indispensable pour anticiper les pénuries - notamment en période de sécheresse - et limiter les pertes.

2.3.3.4 Le chalet

L'utilisation du chalet peut également influencer les demandes en eau de l'alpage. En effet, une **activité touristique** sur place, impliquant par exemple une buvette ou un restaurant,

entraîne une consommation supplémentaire liée aux sanitaires, à la cuisine, à l'entretien du chalet, ainsi qu'à d'autres besoins liés à son exploitation (Reynard et al., 2024).

Par ailleurs, si le chalet est habité durant la période d'estivage par l'amodiatrice ou par ses employés (berger, fromager), la **consommation domestique** doit aussi être prise en compte dans l'estimation des besoins en eau de l'alpage. La demande en eau potable domestique dépendra alors de la composition du foyer (nombre d'habitants), du mode de résidence (temporaire ou permanent), ainsi que du niveau d'équipement du logement (présence de douche, bain, lave-vaisselle, toilettes à chasse d'eau) (Arbués et al., 2003).

2.3.3.5 La fromagerie

La production de l'exploitation constitue un facteur déterminant dans la gestion des besoins en eau sur l'alpage. Les exploitations orientées vers la production laitière, et plus encore celles qui réalisent la **transformation** du lait directement sur place, comme la fabrication de fromage d'alpage, demandent des volumes d'eau plus importants et de meilleure qualité (Sautier, 2009). En effet, la production laitière implique non seulement l'abreuvement des animaux, mais aussi une série d'opérations nécessitant un approvisionnement en eau fiable et propre. Les fromageries d'alpage, en particulier, ont des besoins spécifiques en eau pour la traite, le lavage des équipements, le nettoyage des locaux, le refroidissement du lait, ainsi que pour les processus de pasteurisation et de préparation des fromages. Ces différentes étapes demandent une eau potable conforme aux normes sanitaires strictes afin d'assurer la qualité et la sécurité des produits.

Par ailleurs, **l'entretien** des infrastructures et le respect des règles d'hygiène imposent des volumes d'eau non négligeables. Ainsi, la présence d'une fromagerie sur l'alpage oblige à prévoir des infrastructures hydrauliques adaptées, telles que des réservoirs, des systèmes de distribution efficaces, voire des systèmes de traitement ou de filtration de l'eau.

2.4 Synthèse

Ce chapitre a permis de poser les fondations théoriques de ce travail en contextualisant les enjeux liés à la gestion de l'eau dans les alpages du Jura vaudois. Il a d'abord proposé un éclairage sur les caractéristiques environnementales, géologiques, hydrologiques et climatiques de la chaîne jurassienne, une **chaîne de moyenne montagne** située à la frontière entre la France et la Suisse, présentant un **sous-sol karstique** et une **faible capacité de rétention de l'eau**, notamment sur les anticlinaux, malgré des **précipitations abondantes en altitude**. Ces spécificités locales influencent directement la disponibilité en eau pour les activités pastorales.

Ensuite, les tendances climatiques observées à l'échelle nationale et régionale, ainsi que les projections futures issues des scénarios du GIEC, ont été analysées afin d'anticiper les effets du changement climatique sur les ressources hydriques. Sur la période 1990-2024, une

augmentation notable des températures a été constatée, tandis que les **précipitations présentent des fluctuations interannuelles sans tendance marquée**. À l'avenir, les modèles projettent une hausse continue des températures, accompagnée de variations pluviométriques plus prononcées et d'une **réduction de la couverture neigeuse** aux basses et moyennes altitudes. Ces évolutions influencent directement les alpages du Jura, caractérisés par un régime pluvio-nival qui repose en grande partie sur l'enneigement hivernal comme stock naturel d'eau.

La dernière partie du chapitre s'est centrée sur le fonctionnement de l'agriculture de montagne, en particulier le **pastoralisme jurassien**, en examinant les pratiques de **gestion de l'eau**, les modalités d'approvisionnement et les **facteurs influençant la demande hydrique**. Il ressort que les conditions environnementales et les pratiques pastorales interagissent de manière complémentaire pour façonner la gestion et l'utilisation de l'eau sur les alpages, chacune jouant un rôle déterminant dans l'équilibre global du système pastoral.

En ce sens, ce cadre théorique constitue une **base scientifique solide** sur laquelle s'appuie la démarche méthodologique présentée dans le chapitre suivant. Celle-ci vise à traduire ces enjeux en outils d'analyse concrets, à travers l'étude de deux terrains contrastés et la mise en place d'un dispositif de suivi de la consommation d'eau.

3. Méthodologie du travail et terrain d'étude

Ce chapitre détaille la **méthodologie** adoptée pour mener à bien ce travail de mémoire, réalisé dans le cadre du **projet de recherche Alp'eau**, qui vise à mieux comprendre et gérer la consommation d'eau dans les alpages suisses. Cette section présente d'abord le contexte général de l'étude, en précisant les partenaires impliqués ainsi que les objectifs spécifiques liés à la gestion de l'eau en milieu pastoral. Il expose ensuite les deux axes méthodologiques utilisés dans ce travail, ainsi que les deux sites sélectionnés pour développer et tester cette méthodologie.

3.1 Contexte du travail

Ce travail de mémoire s'inscrit dans le cadre du projet Alp'eau, porté par l'Université de Lausanne, le bureau Montanum, le Parc naturel régional Jura vaudois et le Parc Gruyère Pays-d'Enhaut, et appuyé par la Société vaudoise d'économie alpestre (SVEA), CONICET¹¹ et la Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires du canton de Berne (HAFL).

Face aux sécheresses récurrentes et à la pression croissante sur les ressources hydriques, le projet Alp'eau vise à comprendre et à optimiser la gestion de l'eau en alpage, en identifiant les facteurs influençant la consommation et en proposant des stratégies d'adaptation concrètes. L'approche repose donc sur l'analyse des **déterminants de la demande en eau** et l'installation d'un **dispositif de suivi précis de la consommation d'eau**. Dans ce travail, deux alpages situés dans le Jura vaudois ont été sélectionnés afin de répondre aux objectifs définis. Par la suite, deux autres alpages dans les Préalpes seront choisis pour y appliquer le même protocole de suivi.

Le **train d'alpage du Bucley et du Pré d'Etoy**, qui a servi de référence méthodologique, a été sélectionné comme site d'étude, notamment parce qu'il s'inscrivait dans le projet « Alpages sentinelles », conduit par le bureau Montanum sur plusieurs alpages du Parc Jura vaudois à la demande de ce dernier. Ce projet vise à réaliser un suivi de la végétation, à diagnostiquer la vulnérabilité climatique des alpages et à proposer des pistes d'adaptation (Mosimann et al., 2025).

L'**alpage de la Perroude de Vaud**, où le dispositif de suivi a été installé et mis en œuvre, s'inscrit dans un mandat confié à l'Université de Lausanne par le Parc Jura vaudois. Ce projet vise à analyser la consommation et la gestion des ressources en eau sur les cinq alpages de la commune de Le Vaud, ainsi qu'à évaluer leur vulnérabilité face au changement climatique

¹¹ CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas) est le principal organisme public de recherche scientifique en Argentine. Il regroupe des milliers de chercheurs et de techniciens travaillant dans des instituts répartis sur l'ensemble du territoire. (CONICET. (n.d.). *About the CONICET*. Consulté le 21 juillet 2025, à l'adresse <https://www.conicet.gov.ar/about-the-conicet/?lan=en>)

(Reynard et al., 2024). La Perroude de Vaud s'est donc présenté comme un terrain idéal pour tester et appliquer la méthode élaborée premièrement pour l'alpage du Bucley/Pré d'Etoy¹².

3.2 Démarche générale et approche méthodologique

La méthodologie de ce travail repose sur deux approches distinctes mais complémentaires (Fig. 15), qui permettent de couvrir l'ensemble des objectifs présentés pour ce travail.

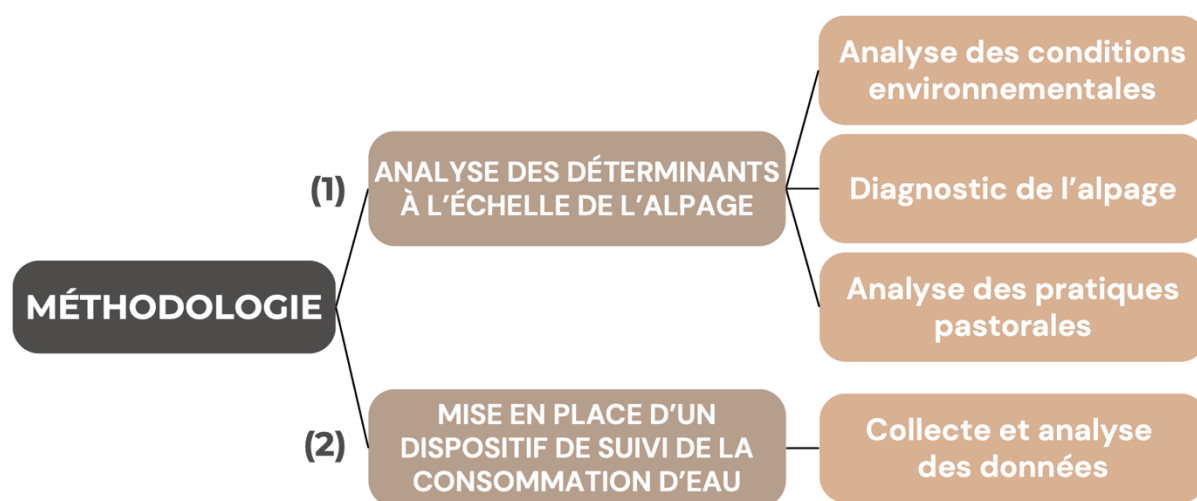


Figure 15. Cadre méthodologique du travail (Roulin, 2025)

La première approche repose sur **l'analyse des déterminants de la demande en eau à l'échelle de l'alpage (1)**. Elle s'articule autour de trois volets complémentaires : **l'analyse des conditions environnementales** (climat, géologie, hydrologie) (chapitre 4.1), le **diagnostic de l'alpage** (infrastructures, vulnérabilité) (chapitre 4.2) et **l'analyse des pratiques pastorales** (profil du bétail, gestion du pâturage) (chapitre 4.3). Cette lecture intégrée permet de décrire les principaux facteurs influençant la disponibilité et la consommation d'eau durant l'estivage et de poser un diagnostic sécheresse de l'alpage (Montanum, 2023). Les données nécessaires à cette analyse ont été collectées à partir de travaux de terrain menés directement sur les alpages, ainsi qu'auprès du bureau Montanum, des amodiataires eux-mêmes ou des communes concernées.

La deuxième approche consiste en une **proposition de mise en place d'un dispositif de suivi de la consommation d'eau (2)**. Elle propose une **méthodologie reproductible**, précisant les conditions de mise en œuvre d'un protocole de suivi : choix et installation du matériel, contexte d'intervention, modalités de collecte et d'analyse des données. Ce dispositif vise à

¹² Ce dispositif de suivi a d'abord été élaboré et prévu pour l'alpage du Bucley/Pré d'Etoy, mais a finalement été réalisé sur l'alpage de la Perroude de Vaud en raison d'un problème technique et par conséquent d'un changement de collaboration avec l'amodiataire.

produire des **résultats quantitatifs** sur les volumes d'eau utilisés en alpage, selon les types d'usages et les conditions spécifiques du site.

Le travail s'est structuré autour de deux sites :

- Le **train d'alpage du Bucley et du Pré d'Etoy**, utilisé uniquement pour l'étude exploratoire suite à l'interruption du suivi, a permis de tester la méthodologie et d'identifier les points forts ainsi que les contraintes techniques et relationnelles du projet.
- L'**alpage de la Perroude de Vaud**, devenu site principal de suivi et d'analyse quantitative, a permis d'appliquer la méthodologie de suivi dans un contexte différent - alpage allaitant, sans production fromagère - mais complémentaire.

Cette articulation entre un site de référence méthodologique - Bucley/Pré d'Etoy - et un site d'application de la méthode - Perroude de Vaud - permet à ce travail de combiner, une réflexion approfondie sur les outils d'analyse en alpage et une expérimentation concrète sur le terrain. Le but est également d'élaborer une méthodologie de suivi robuste qui soit transférable à d'autres alpages.

3.3 Enjeux logistiques et relationnels

La mise en œuvre d'un dispositif de suivi de la consommation d'eau en alpage ne repose pas uniquement sur des facteurs techniques : elle est aussi fortement conditionnée par des enjeux logistiques et relationnels. Cette section revient ainsi sur les aspects pratiques rencontrés lors de l'installation du protocole de suivi sur le terrain, en mettant en lumière les dynamiques propres à chaque site d'étude : celui du Bucley/Pré d'Etoy et celui de la Perroude de Vaud.

3.3.1 Alpage du Bucley : étude exploratoire

Le travail s'est tout d'abord concentré sur une description détaillée de l'alpage du Bucley/Pré d'Etoy. A l'origine, ce train d'alpage devait constituer le seul terrain d'étude, incluant la mise en place du protocole de suivi et la collecte des données. Cependant, l'expérience menée sur l'alpage du Bucley/Pré d'Etoy a révélé plusieurs difficultés, tant techniques que relationnelles.

Le bouchage du compteur installé à la sortie de l'étang du Pré d'Etoy a provoqué un dysfonctionnement dans le système d'approvisionnement en eau pour un alpage voisin, ce qui a entraîné des tensions avec ce dernier. Ces tensions ont ensuite eu un impact sur la relation avec l'amodiatrice de l'alpage du Bucley, conduisant à l'abandon du protocole de suivi sur ce site.

Malgré ces difficultés, cette première phase d'analyse a présenté une base méthodologique précieuse. Elle a notamment permis d'examiner les raisons de l'abandon de l'alpage du Bucley/Pré d'Etoy, afin de tirer des enseignements des erreurs commises et d'orienter la suite du projet. Cette analyse a fourni un référentiel comparatif pour le nouveau terrain et a

finalement permis d'identifier les éléments à surveiller ainsi que de définir les conditions nécessaires à la mise en œuvre d'un dispositif de suivi en alpage.

3.3.2 Alpage de la Perroude de Vaud : site de suivi principal

Par la suite, l'alpage de la Perroude de Vaud a été choisi comme site principal pour la suite de la mise en place du dispositif de suivi, car il faisait partie dès le départ du projet de recherche Alp'eau et que sa configuration permettait un suivi. Ce terrain a donc remplacé le train d'alpage du Bucley/Pré d'Etoy pour les analyses quantitatives, offrant une opportunité d'obtenir des résultats et d'explorer l'impact des conditions climatiques et des pratiques pastorales sur la consommation d'eau en alpage.

Le choix de l'alpage de la Perroude de Vaud comme site principal a été pertinent, notamment grâce à une bonne communication avec la commune et un bon contact avec l'amodiatrice, qui s'est montré collaboratif et impliqué dans le projet. La réduction du nombre de points de mesure et une simplification du protocole ont également facilité la mise en œuvre du dispositif de suivi. Ce contexte plus favorable a permis une collecte de données plus régulière et facilitée.

Cependant, en raison du profil spécifique de l'alpage, principalement dédié aux vaches allaitantes, les usages de l'eau y sont moins diversifiés. En particulier, les besoins liés à la production fromagère, qui représentent une part importante de la consommation d'eau sur d'autres alpages, ne sont pas pris en compte ici. À titre indicatif, sur l'alpage du Bucley/Pré d'Etoy :

- **Traite** : $150 \text{ L/j} \times 120 \text{ j} = 18 \text{ m}^3$
- **Fromagerie** : 140 000 kg de lait $\approx 140 \text{ m}^3$ d'eau
- **Chalet** : $100 \text{ L/personne/j} \times 2 \text{ personnes} \times 120 \text{ j} = 24 \text{ m}^3$
- **Vaches** : $80 \text{ L/vache/j} \times 70 \text{ vaches} \times (120 \text{ j} + 21 \text{ j de sécurité sécheresse}) \approx 790 \text{ m}^3$

Les chapitres suivants traduisent les deux objectifs centraux de ce travail. Ils présentent de manière détaillée les profils des deux alpages étudiés, en mettant en évidence leurs spécificités environnementales, structurelles et pastorales, afin de comprendre les déterminants de leur demande en eau (chapitre 4). Ils proposent également une méthodologie de suivi de la consommation en eau, conçue pour être appliquée à l'échelle des alpages et reproductible dans d'autres contextes pastoraux (chapitre 5).

4. Les déterminants de la demande en eau

Ce chapitre examine les principaux **déterminants de la demande en eau** sur les alpages du Bucley/Pré d'Etoy et de la Perroude de Vaud, en s'appuyant sur les éléments identifiés dans le chapitre 2.3.3. L'objectif est de mettre en lumière les facteurs qui influencent concrètement l'accès, l'usage et la gestion de la ressource en eau sur ces deux terrains. Afin d'en proposer une lecture structurée, ces déterminants ont été regroupés en trois grandes catégories, développées séparément - les **facteurs environnementaux**, le **diagnostic de l'alpage** et les **pratiques pastorales** - bien que ces trois composantes soient étroitement liées dans la réalité. Cette approche permet d'appréhender la gestion de l'eau de manière systémique, en tenant compte à la fois du contexte naturel, des caractéristiques propres à chaque alpage et des stratégies développées par les exploitants.

4.1 Les facteurs environnementaux

Ce chapitre présente les différents **facteurs environnementaux** qui influencent la demande, les usages et la gestion de l'eau dans les alpages du Jura vaudois. Il s'appuie sur les deux cas d'étude : l'alpage du Bucley/Pré d'Etoy et celui de la Perroude de Vaud.

Leurs **contextes géographique et hydrogéologique** y sont d'abord présentés (4.1.1), avant d'aborder les **caractéristiques climatiques de la chaîne jurassienne** depuis les années 1990 (4.1.2). L'analyse des données climatiques permet de comprendre dans quel contexte évoluent les alpages du Jura vaudois, et comment les précipitations et les températures ont évolué depuis la fin du XX^e siècle. Ces variables constituent des facteurs déterminants de la demande en eau, mais aussi de la disponibilité de la ressource. Le contexte climatique local est donc essentiel à prendre en compte pour analyser les dynamiques hydriques propres à chaque alpage.

Enfin, la dernière partie du chapitre présente des **projections climatiques à l'horizon 2060** (4.1.3), en mettant en lumière les modifications potentielles que pourraient subir ces alpages situés dans le Jura vaudois. Ces évolutions futures posent des enjeux importants pour la gestion durable de la ressource en eau, en particulier dans un contexte pastoral déjà soumis à de nombreuses pressions.

4.1.1 Le contexte géographique et hydrogéologique

L'**alpage du Bucley/Pré d'Etoy** est un site pastoral typique du Jura vaudois, situé sur le territoire de la commune de L'Abbaye, à environ **1433 m d'altitude**. Installé sur le versant sud-est de la Vallée de Joux, il bénéficie d'un climat relativement humide, avec des précipitations plus importantes que sur le versant opposé (Reynard et Schoeneich, 2021) (Fig. 16 et 17).

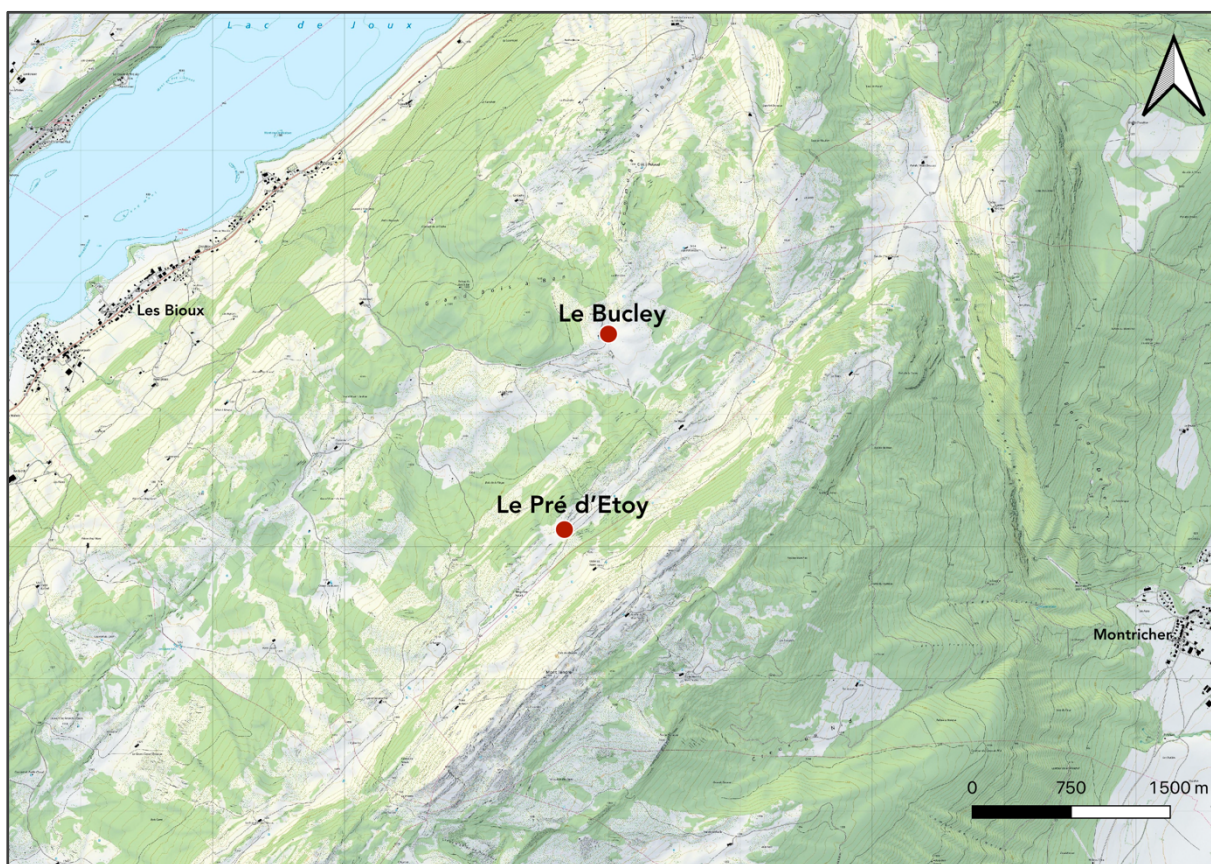


Figure 16. Carte de situation de l'alpage du Bucley/Pré d'Etoy (Roulin, 2025 ; Source : Swisstopo, 2025)

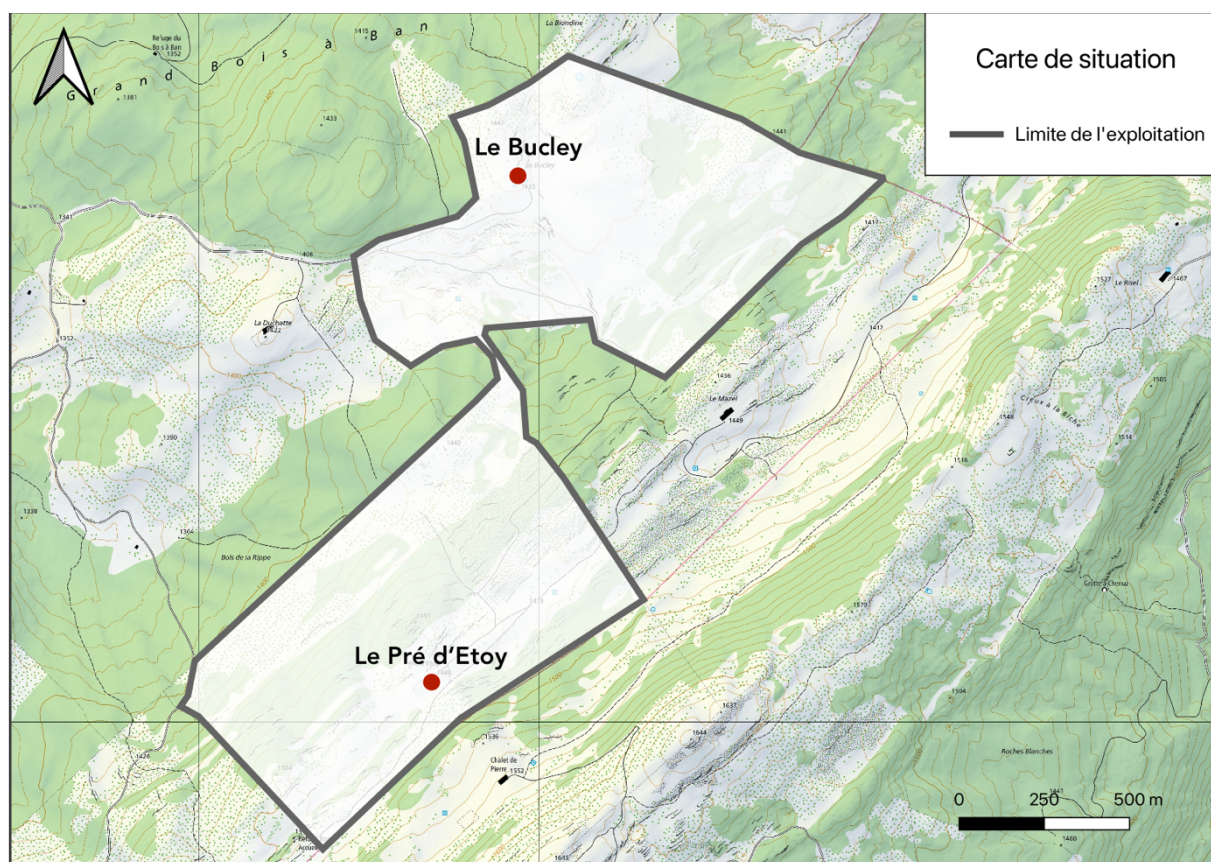


Figure 17. Périmètre de l'alpage du Bucley et du Pré d'Etoy (Roulin, 2025 ; Source : Swisstopo, 2025)

La topographie du site est douce à modérément accidentée, caractéristique du massif jurassien, et les formations calcaires sous-jacentes structurent le paysage tout en influençant les conditions pédologiques et hydrologiques locales. Cette orientation vers l'ouest rend l'alpage particulièrement sensible aux variations saisonnières, notamment en termes d'humidité et de disponibilité en eau, compte tenu du sous-sol karstique. Les alpages du Bucley et du Pré d'Etoy présentent des lithologies distinctes.

L'alpage du **Bucley** repose principalement sur la **formation du Séquanien**, constituée de marnes et de calcaires, datée du Jurassique supérieur (Enay, 1988) (Fig. 18 et 19). Vers l'est, cette formation est recouverte par des affleurements du **Kimméridgien**, caractérisés par des calcaires massifs et fossilifères, qui, comme le Séquanien, ne possèdent que très peu de sources et n'exercent qu'un rôle hydrologique local (Aubert et al., 1979). Par ailleurs, une dépression fermée, située au sud-ouest du chalet d'alpage, révèle un affleurement de **moraine de fond d'origine jurassienne**.

Le **Pré d'Etoy**, quant à lui, se développe sur un ensemble plus complexe de formations géologiques. Le Séquanien affleure au nord-ouest, suivi par le Kimméridgien et le Portlandien, tandis que l'extrémité sud-est repose sur le Valanginien, caractérisé par une alternance de calcaires et de marnes (Aubert et al., 1979). Des sources sont présentes à proximité de l'alpage, notamment dans le secteur où affleure localement le **Purbeckien** (Fig. 19), composé de calcaires fins, de marnes et d'argiles aux propriétés perméables limitées, favorisant l'émergence de l'eau (Carozzi, 1948). Cependant, ces ressources ne sont pas exploitées pour l'approvisionnement en eau de l'alpage.

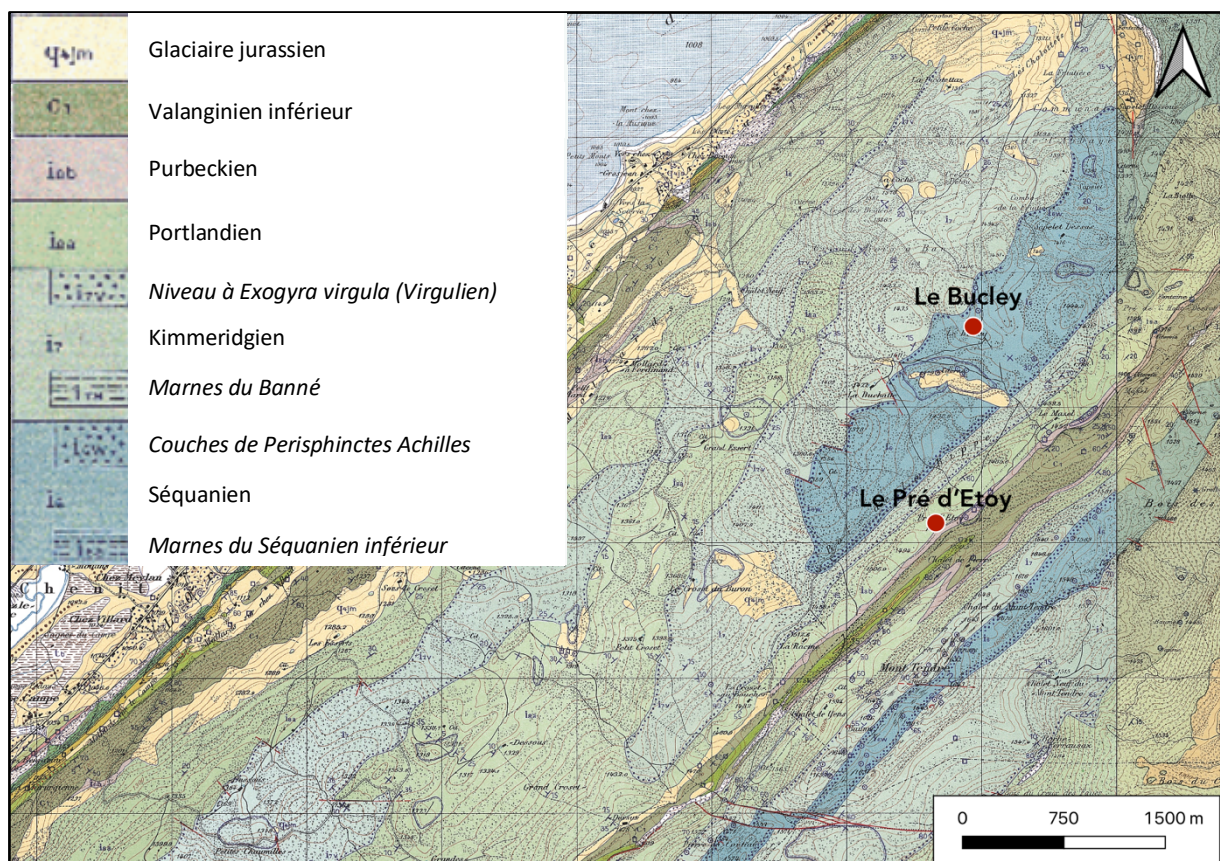


Figure 18. Carte géologique du secteur du Bucley/Pré d'Etoy (Roulin, 2025 ; Source : Swisstopo, 2025)

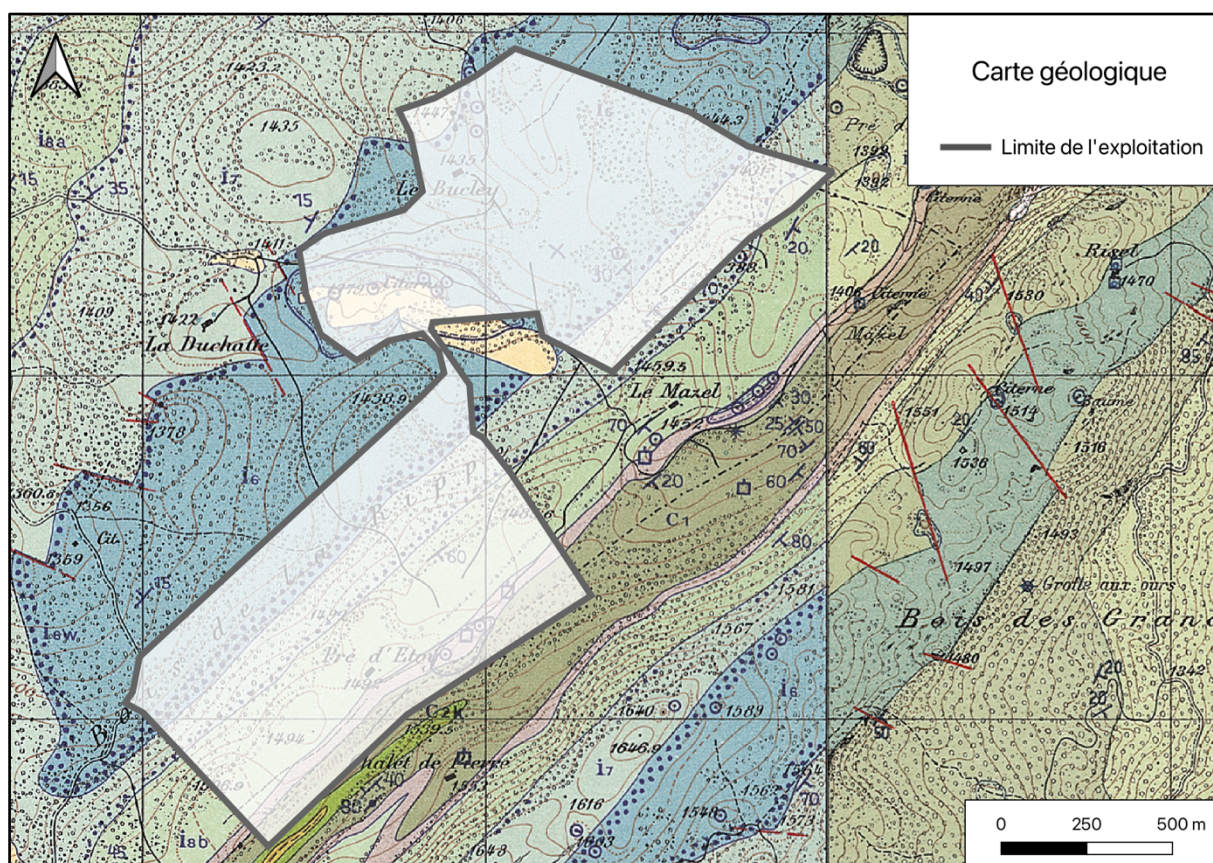


Figure 19. Carte géologique de l'alpage du Bucley/Pré d'Etoy (Roulin, 2025 ; Source : Swisstopo, 2025). La légende de la carte se trouve à la figure 18.

L'alpage de **la Perroude de Vaud** se situe sur le territoire communal de Marchissy, dans le district de Nyon, au sein du Parc naturel régional Jura vaudois, bien qu'il dépende administrativement de la commune de Le Vaud. Installé à environ **1370 m d'altitude**, il occupe la charnière d'un anticlinal séparant le synclinal des Amburnex de celui situé au sud-est (Fig. 20 et 21). Situé dans la partie haute du massif, il est soumis à un climat relativement humide, notamment en raison des précipitations orographiques induites par le relief jurassien (Reynard & Schoeneich, 2021).

Sur le plan géologique, l'alpage se trouve dans le **premier chevauchement** jurassien formant la haute chaîne, plus précisément sur un micro-pli anticlinal du grand anticlinal du Mont Tendre (Reynard et al., 2024). La majeure partie du site repose sur des **calcaires du Portlandien** (Jurassique supérieur), caractérisés par une alternance complexe de calcaires, de marnes, de dolomies (Lombard, 1933) (Fig. 22).

La portion sud de l'alpage repose sur des **formations calcaires**, correspondant à l'**Hauterivien supérieur** (Fig. 23), « fait de terrains calcaires plus ou moins karstiques pouvant receler de petites nappes hétérogènes » (Aubert et al., 1979, cité par Reynard et al., 2024, p. 7). Cette zone de l'alpage comporte également un affleurement de moraine de fond.

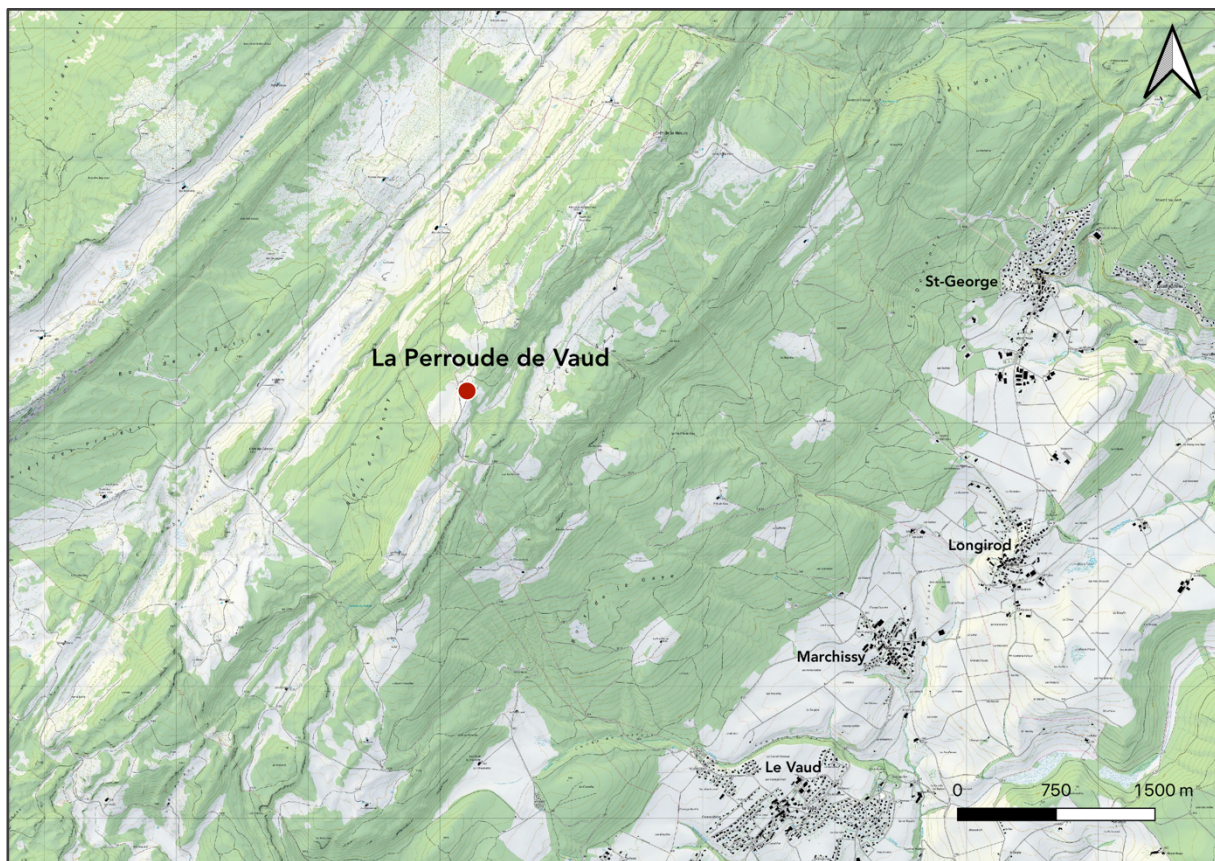


Figure 20. Carte de situation de l'alpage de la Perroude de Vaud (Roulin, 2025 ; Source : Swisstopo, 2025)

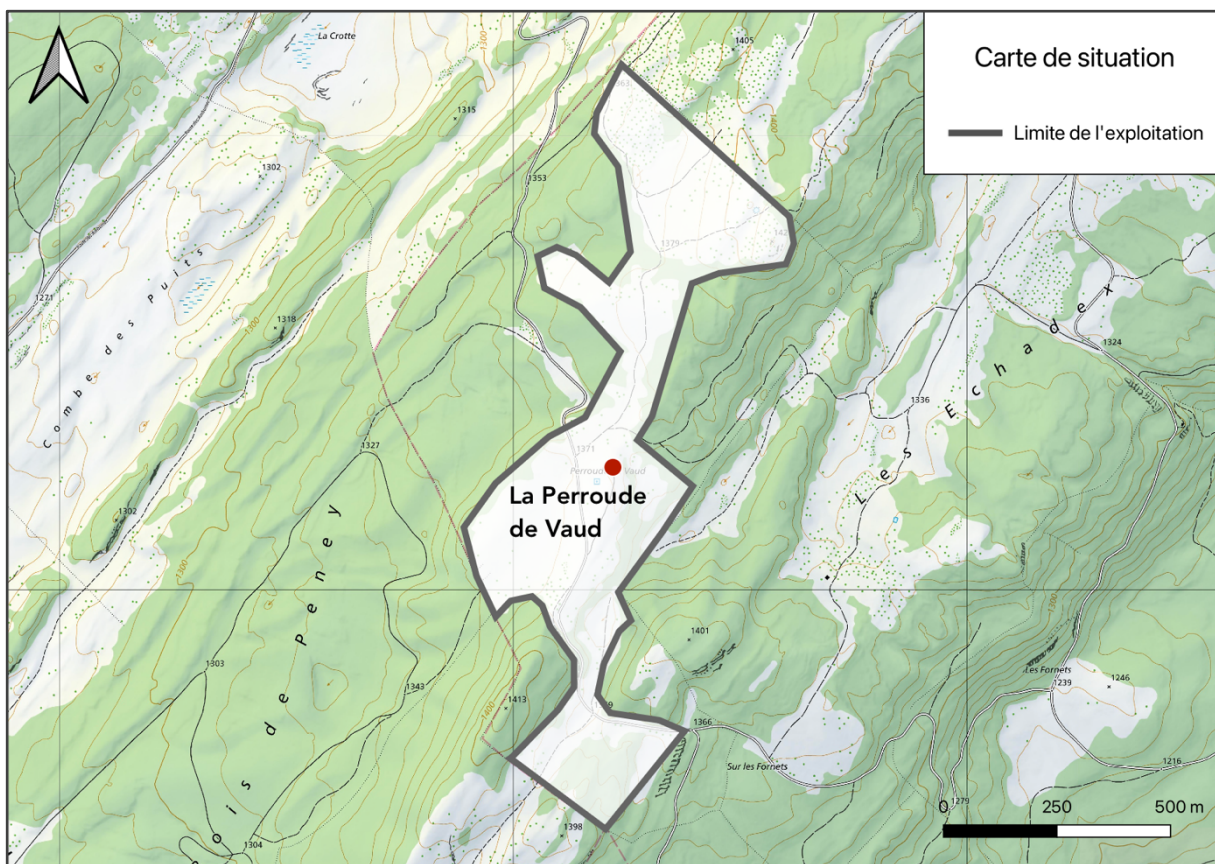


Figure 21. Périmètre de l'alpage de la Perroude de Vaud (Roulin, 2025 ; Source : Swisstopo, 2025)

Le site présente des calcaires du Malm, incluant le Valanginien. Cet ensemble calcaire de 600 à 700 m comprend « quelques intercalations plus marneuses [qui] ne jouent qu'un rôle hydrologique local » et sont pratiquement **dépourvus de sources**, car ce groupe est « très fortement diaclasé, faillé et karstifié en surface » (Aubert et al., 1979, cité par Reynard et al., 2024, p. 7). L'alpage est en outre intégré dans une zone de protection des eaux (S3) destinée à préserver l'aquifère du Malm.

Cette structure géologique se traduit par une prédominance d'affleurements calcaires, peu favorables à la rétention d'eau, **limitant ainsi la disponibilité hydrique**. Aucun point d'eau pérenne n'existe sur l'alpage, et la source la plus proche, située hors du périmètre d'exploitation, est fréquemment à sec (Reynard et al., 2024).

Toutefois, la topographie locale favorise le blocage des perturbations venues de l'ouest, engendrant une **pluviométrie abondante** mais variable. Sur le plan hydrogéologique, l'alpage dépend d'aquifères peu profonds du Crétacé, offrant un contexte généralement favorable en termes de ressources en eau. Néanmoins, ces aquifères restent vulnérables aux sécheresses hivernales et estivales, pouvant se tarir lors de périodes prolongées sans précipitations (Reynard et al., 2024).

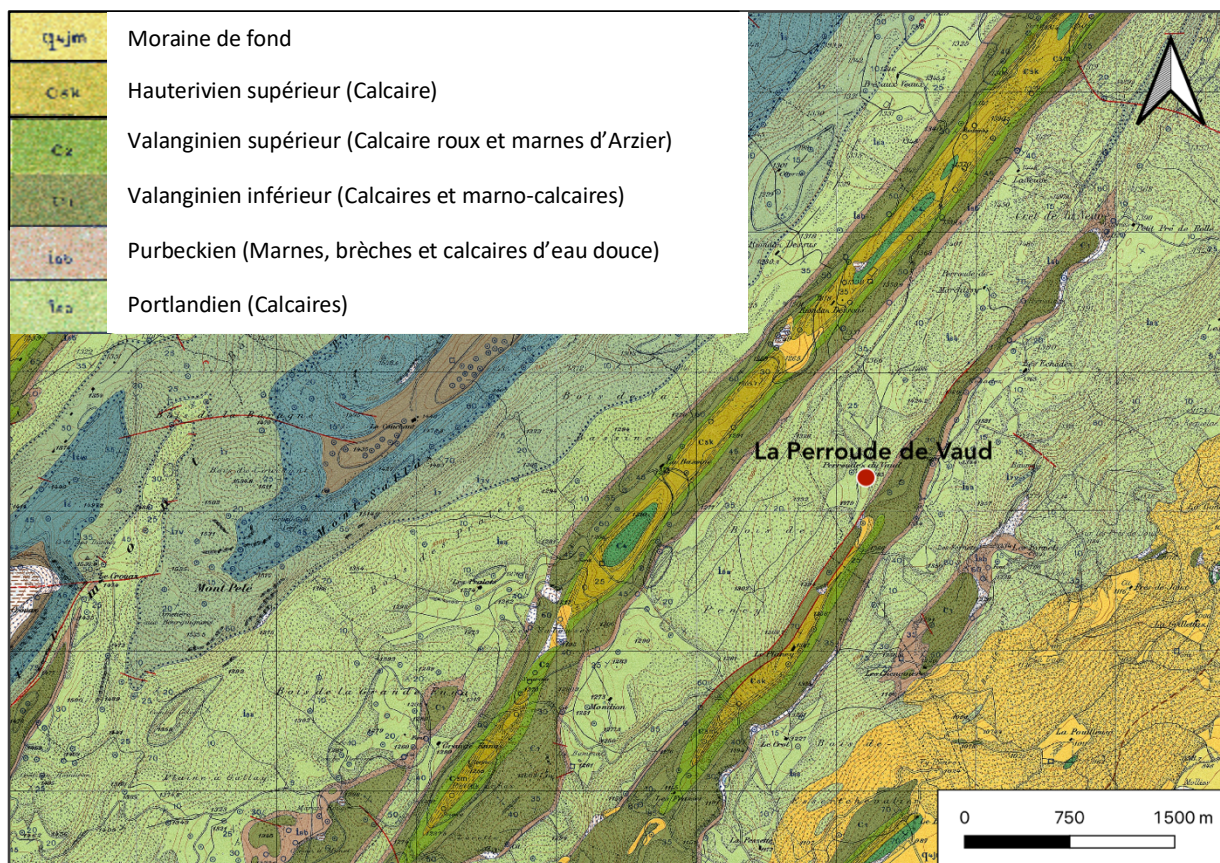


Figure 22. Carte géologique du secteur de la Perroude de Vaud (Roulin, 2025 ; Source : Swisstopo, 2025)

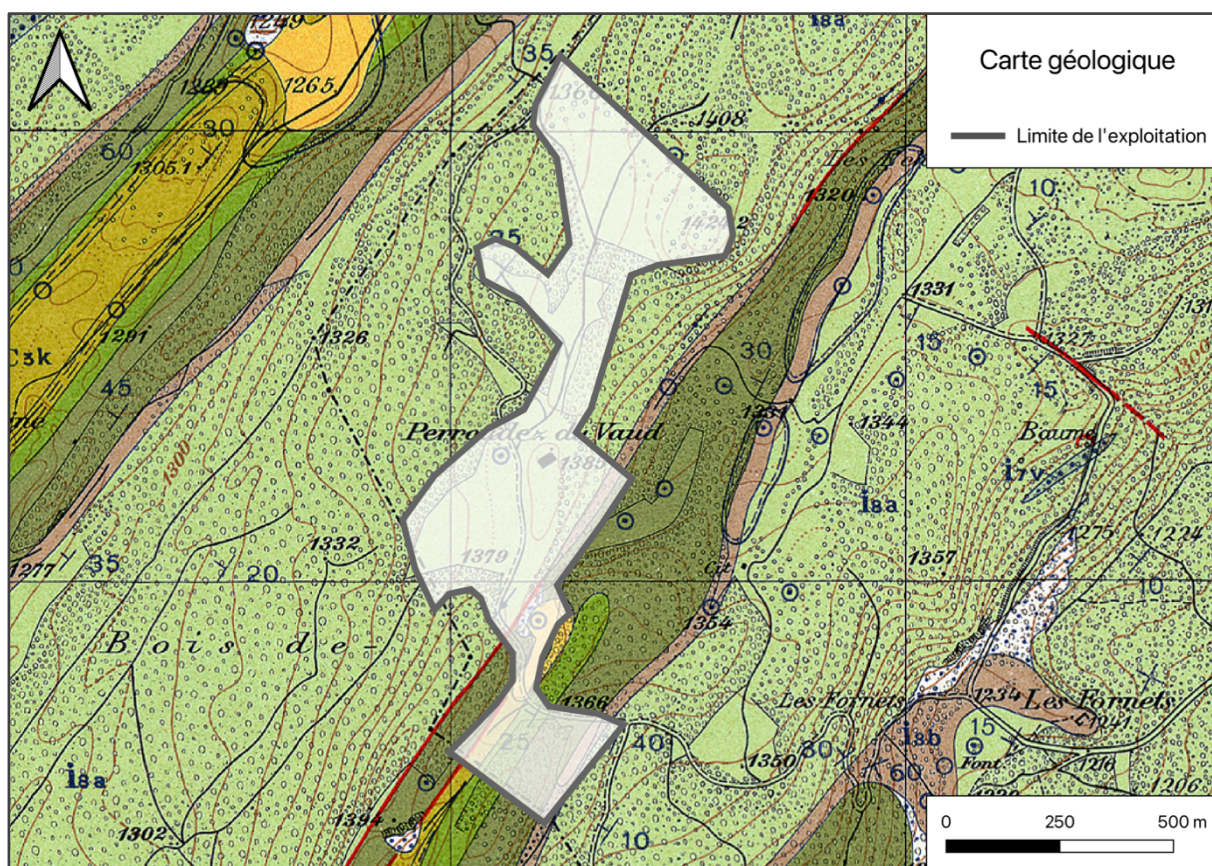


Figure 23. Carte géologique de l'alpage de la Perroude de Vaud (Roulin, 2025 ; Source : Swisstopo, 2025). La légende de la carte se trouve à la figure 22.

Le contexte environnemental et géologique conditionne donc fortement la gestion des ressources en eau sur l'alpage de la Perroude de Vaud. L'absence de sources permanentes, combinée à la nature calcaire des sols, limite l'accès à l'eau pour le bétail, ce qui nécessite une adaptation des pratiques pastorales, particulièrement en période de sécheresse estivale.

4.1.2 Analyse climatique

En plus des conditions géologiques et hydrologiques de l'alpage, les **conditions climatiques** influencent également la disponibilité de la ressource en eau. Ce chapitre propose donc une analyse des données climatiques récentes pour la région du Jura vaudois, englobant les deux sites d'étude.

En examinant les tendances des températures, des précipitations et des épisodes de sécheresse sur plusieurs années, cette analyse vise à mieux comprendre les conditions climatiques auxquelles sont soumis les alpages. L'étude des données climatiques historiques et actuelles permet ainsi de situer les observations de terrain dans un contexte régional plus large, tout en préparant le terrain pour une réflexion sur les impacts futurs du changement climatique dans cette région de moyenne montagne.

4.1.2.1 Données et analyses effectuées

Quatre stations météorologiques ont été sélectionnées afin de réaliser cette analyse climatique (Tab. 3). L'analyse des données de ces stations permet de donner une idée de **l'évolution des précipitations et des température depuis le début des années 1990**.

Tableau 3. Descriptif des stations

Station	Propriétaire	Altitude	Type	Températures	Précipitations
La Chaux-de-Fonds (CDF)	MétéoSuisse	1017 m	Auto	01.01.1990 – 31.12.2024	01.01.1990 – 31.12.2024
La Frêtaz (FRE)	MétéoSuisse	1205 m	Auto	01.01.1990 – 31.12.2024	01.01.1990 – 31.12.2024
La Dôle (DOL)	MétéoSuisse	1669 m	Auto	01.01.1990 – 31.12.2024	01.01.1990 – 31.12.2024
Les Amburnex (AMB)	Agroscope	1321 m	Auto	01.01.2011 – 31.12.2024	01.01.2011 – 31.12.2024

La plupart des données journalières et annuelles des précipitations et des températures ont été récoltées auprès de l'Office fédéral de météorologie et de climatologie : MétéoSuisse. Les stations de MétéoSuisse font partie du réseau automatique SwissMetNet qui regroupe 160 stations de mesure (Reynard et al., 2024). Ces dernières enregistrent différents paramètres météorologiques, notamment la température, l'humidité de l'air, la pression atmosphérique, le rayonnement solaire, les précipitations, ainsi que la direction et la vitesse du vent¹³.

Les stations de **La Frêtaz (1205 m)** et de **La Chaux-de-Fonds (1017 m)** ont été sélectionnées car elles se trouvent à une altitude plus ou moins comparable à celle des alpages du Bucley/Pré d'Etoy (1433 m) et de la Perroude de Vaud (1370 m) et qu'elles se situent sur le Jura (Fig. 24). Bien qu'elles soient situées relativement loin des deux alpages, elles permettent de donner une idée des précipitations et des températures à ces altitudes, ainsi que de leur répartition temporelle.

Quant à la station de **La Dôle (1669 m)**, elle a été sélectionnée car elle se situe proche de l'alpage du Bucley et de la Perroude de Vaud (Fig. 24), bien qu'elle reçoive davantage de précipitations car elle se situe plus en altitude.

La dernière station sélectionnée est la station **des Amburnex (1321 m)**, exploitée par Agroscope. Elle enregistre plusieurs variables climatiques telles que la température, l'humidité

¹³ MétéoSuisse. (s. d.). Réseau de mesures automatiques MétéoSuisse. Consulté le 16 janvier 2025, à l'adresse <https://www.meteosuisse.admin.ch/meteo/systemes-de-mesure/stations-au-sol/reseau-de-mesures-automatiques.html>

relative, les précipitations, le rayonnement solaire, ainsi que la vitesse et la direction du vent¹⁴. Située entre les alpages du Bucley/Pré d'Etoy et de la Perroude de Vaud, à une altitude relativement similaire, elle présente l'avantage d'être au cœur de la zone d'étude (Fig. 24). Cependant, sa localisation dans une combe influence le régime thermique, notamment par des inversions de température en hiver, et peut également modifier le régime des précipitations.

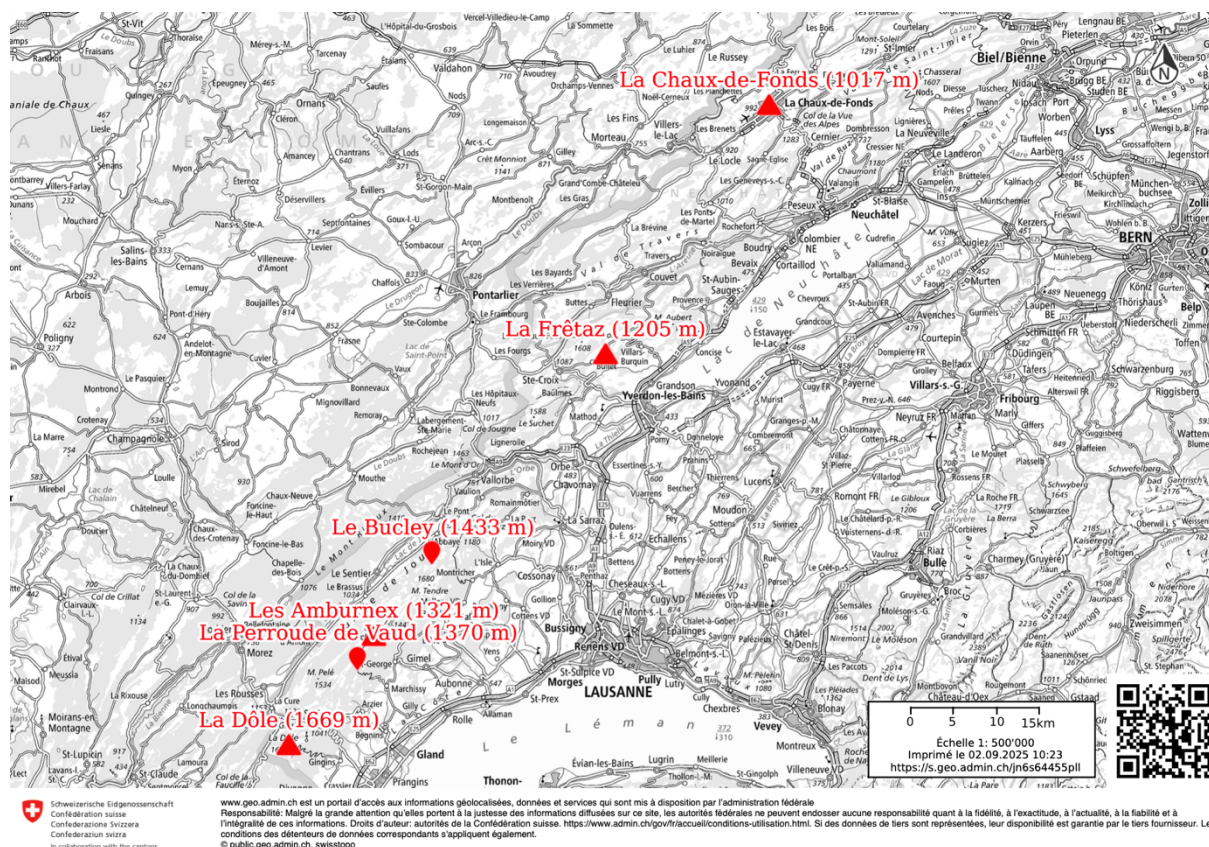


Figure 24. Localisation des stations climatologiques (Source : Swisstopo, 2025)

4.1.2.2 Analyse des données climatiques

Pour chaque station météorologique, une analyse a été réalisée avec les données disponibles. Pour les stations de La Dôle, de La Frêtaz et de La Chaux-de-Fonds les données s'étendent de **1990 à 2024**, alors que pour la station des Amburnex, les données commencent **seulement à partir de 2011**. L'objectif est d'évaluer la variabilité des précipitations à la fois d'une année à l'autre - **variabilité interannuelle** - et au cours d'une même année - **variabilité saisonnière** -, dans le but de détecter de potentielles tendances à long terme ou changements brusques dans les données climatiques.

Ensuite, un **indice standardisé des précipitations** (SPI - *Standardized Precipitation Index*) a été utilisé pour repérer les années présentant des conditions sèches ou humides qui ne sont pas

¹⁴ Agrometeo. (s. d.). *Agrometeo*. Dernière consultation le 13 août 2025, à l'adresse <https://www.agrometeo.ch>

dans la norme (McKee et al., 1993). Le SPI se calcule sur la base de données à long terme comme suit :

SPI = (Précipitations d'une année - Moyenne des précipitations) / Écart type

- Un SPI compris entre **-1 et +1** indique une année normale.
- Un SPI compris entre **-1 et -1,5** (ou entre **+1 et +1,5**) correspond à une année **modérément sèche** (ou **modérément humide**).
- Un SPI inférieur à **-1,5** (ou supérieur à **+1,5**) reflète une **année très sèche** (ou **très humide**).

Une autre méthode a ensuite été utilisée pour caractériser plus précisément les périodes de sécheresse : la **méthode des valeurs seuils** (*Threshold Level Method* ; Van Loon et Van Lanen, 2012). Elle repose sur l'idée qu'une sécheresse survient lorsque les précipitations passent en dessous d'un seuil déterminé, et dure jusqu'à ce que ce seuil soit à nouveau dépassé.

Pour chaque station, un seuil de précipitation propre à chaque mois a été défini, basé sur la moyenne mensuelle observée entre 1991 et 2020¹⁵. Ces seuils ont ensuite été comparés aux précipitations mensuelles moyennes des années 2011, 2018 et 2022, identifiées comme des années marquées par des épisodes de sécheresse prolongée.

4.1.2.3 Évolution et variabilité des températures annuelles

La figure 25 présente les **températures moyennes annuelles** des quatre stations sélectionnées. Malgré des températures moyennes qui varient beaucoup d'une année à l'autre, les stations pour lesquelles les données sont disponibles de 1990 à 2024 (La Chaux-de-Fonds, La Frêtaz et La Dôle) montrent des **températures à la hausse depuis 1990**, et ceci pour toutes les stations, peu importe leur altitude.

Pour la station des Amburnex, les données ne sont disponibles que depuis 2011. Cependant, la tendance est relativement similaire ; en effet, une légère hausse des températures peut quand même être clairement observée.

D'après ces résultats, les **températures moyennes annuelles ont augmenté d'environ 1,5°C entre 1990 et 2024 pour l'ensemble des stations**. Au vu des stations sélectionnées, une hausse marquée des températures est observée sur l'ensemble de la chaîne jurassienne au cours des dernières décennies, bien que les variations interannuelles demeurent importantes.

¹⁵ MétéoSuisse. (2022, janvier). *Nouvelles valeurs normales du climat pour la période 1991–2020*. Consulté le 27 juin 2025, à l'adresse <https://www.meteosuisse.admin.ch/portrait/medias/communiqués-de-presse/2022/01/nouvelles-valeurs-normales-du-climat-pour-la-periode-1991-2020.html>

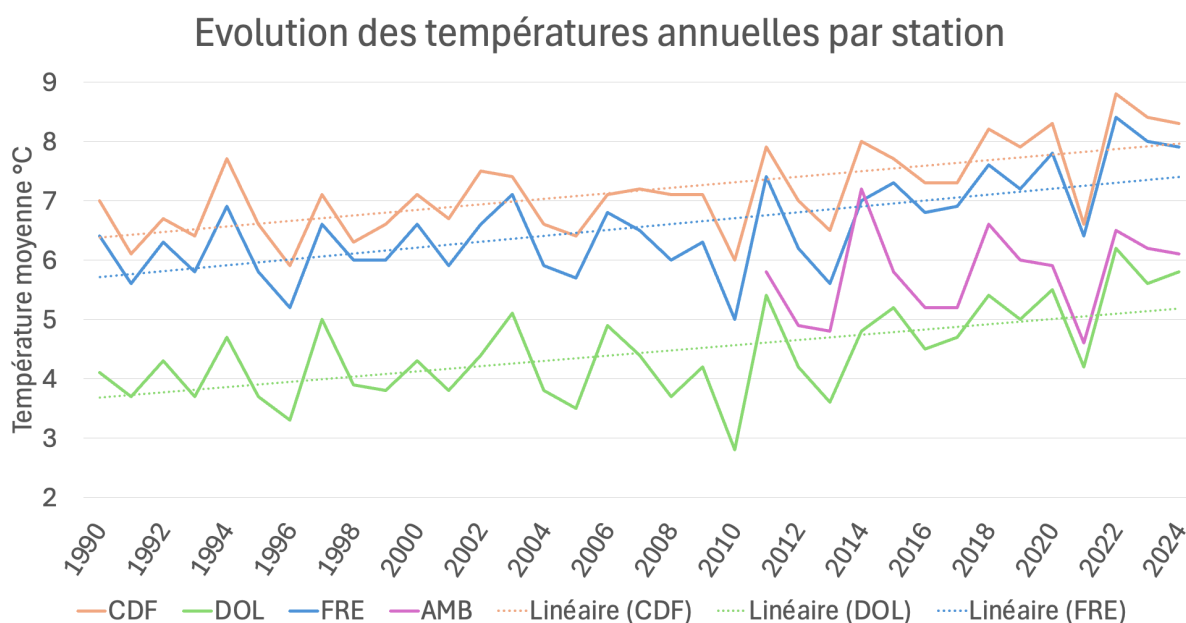


Figure 25. Évolution des températures moyennes annuelles par station entre 1990 et 2024. **CDF** : station de La Chaux-de-Fonds (1017 m), **DOL** : station de La Dôle (1669 m), **FRE** : station de La Frêtaz (1205 m), **AMB** : station des Amburnex. Les droites de régression linéaire mettent en évidence une augmentation des températures enregistrées par l'ensemble des stations, de l'ordre de 1,5 °C sur la période 1991-2024, et ce indépendamment de l'altitude, ce qui souligne le caractère généralisé du réchauffement observé. (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)

Les figures 26, 27 et 28 présentent l'**écart des températures annuelles** par rapport à la moyenne de référence 1991-2020 pour les stations de La Chaux-de-Fonds, La Frêtaz et La Dôle. Peu importe l'altitude de la station, les données mettent en évidence un changement significatif à partir de 2011, marqué par une stabilisation des températures à des niveaux nettement supérieurs à la moyenne.

Si, depuis 1990, les écarts de température oscillaient entre années plus chaudes et plus froides, **une tendance claire au réchauffement s'installe dès 2015**, avec des écarts principalement positifs, culminant à plus de **+2,5°C en 2022** pour l'ensemble des stations.

En 2022, l'altitude ne semble pas avoir une influence majeure, puisque la station de La Dôle, située à plus haute altitude, présente une tendance similaire au réchauffement, avec un écart de +2,7 °C par rapport à la moyenne. Les stations de La Frêtaz et de La Chaux-de-Fonds, situées à des altitudes plus basses, affichent des écarts comparables, respectivement de +2,8 °C et +2,7 °C. Ce réchauffement semble structurel et dépasse le cadre de simples fluctuations interannuelles.

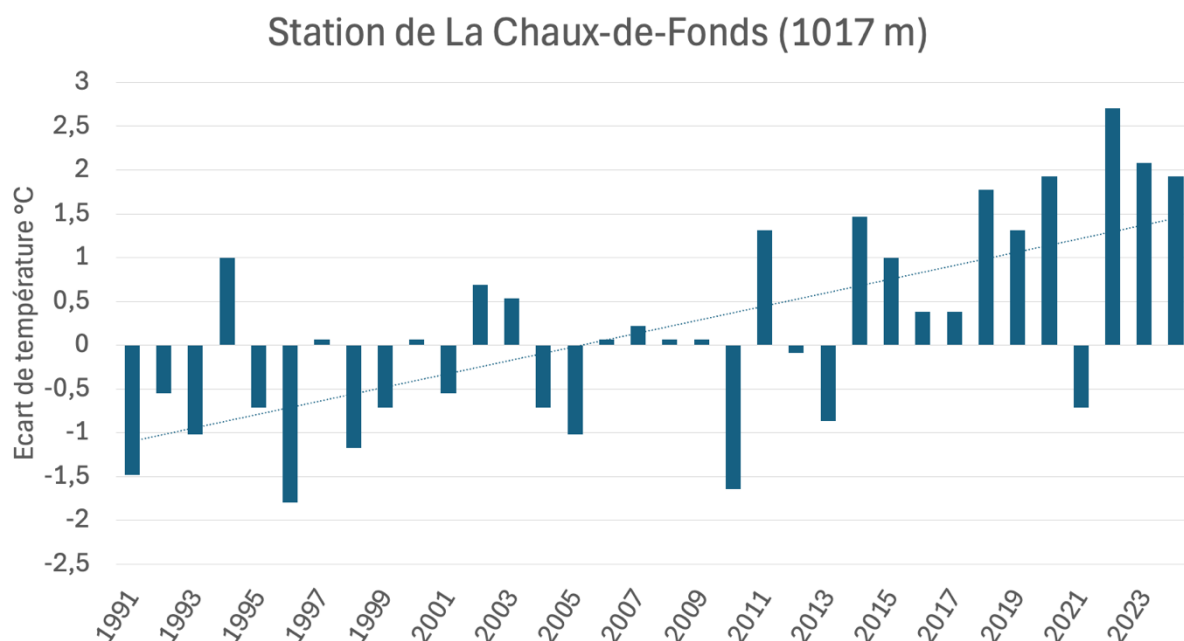


Figure 26. Écart de température par rapport à la moyenne de la période 1991-2020 pour la station de La Chaux-de-Fonds (1017 m). La droite de régression met en évidence une augmentation notable des températures, avec un écart atteignant 1,5 °C (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)

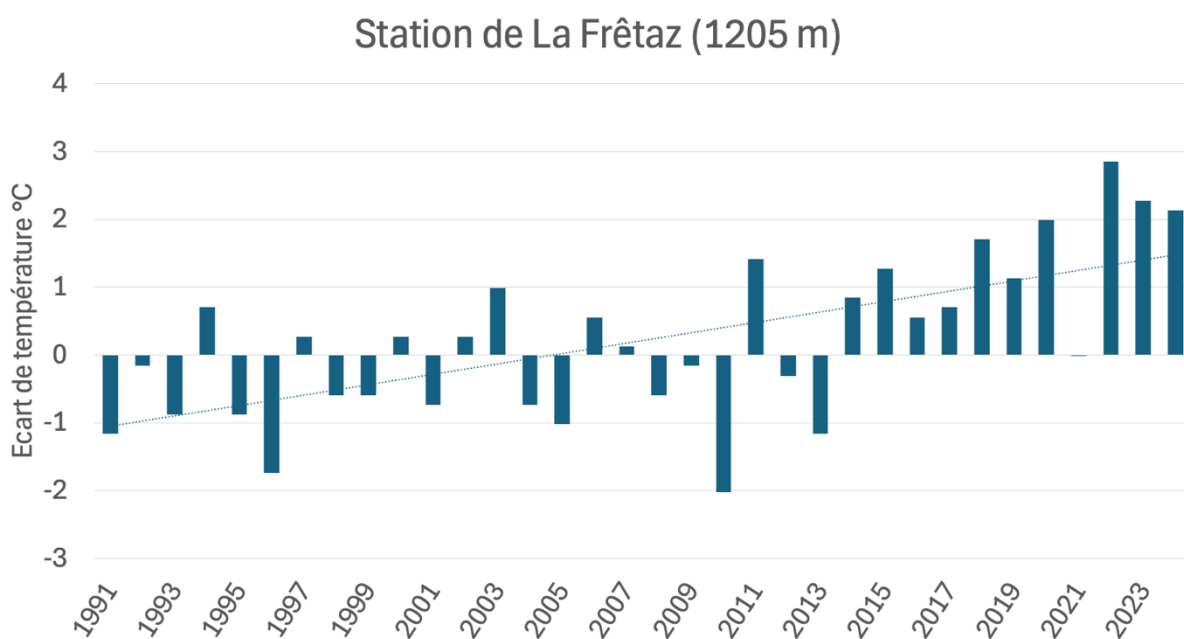


Figure 27. Écart de température par rapport à la moyenne de la période 1991-2020 pour la station de La Frêtaz (1205 m). La droite de régression met en évidence une augmentation notable des températures, avec un écart atteignant 1,5 °C (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)

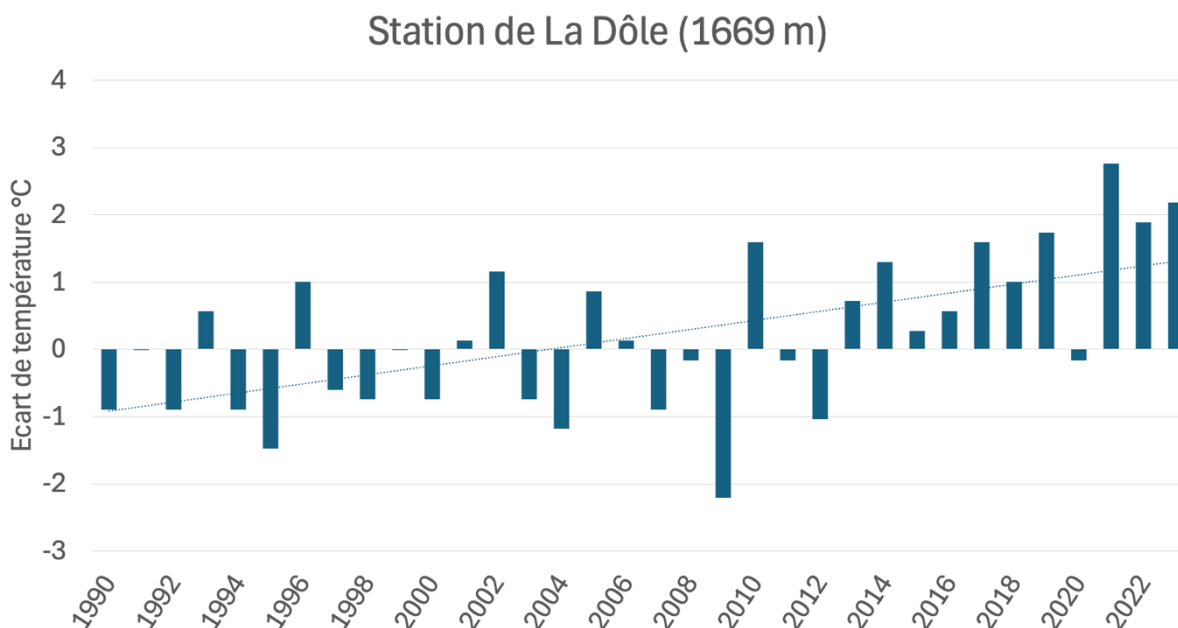


Figure 28. Écart de température par rapport à la moyenne de la période 1991-2020 pour la station de La Dôle (1669 m). La droite de régression met en évidence une augmentation notable des températures, avec un écart atteignant 1,5 °C (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)

4.1.2.4 Évolution et variabilité des précipitations annuelles

La figure 29 présente l'**évolution des précipitations annuelles** entre 1990 et 2024 pour les stations de La Chaux-de-Fonds, de La Frêtaz et de La Dôle, et depuis 2011 pour la station des Amburnex. Il est à noter que les précipitations augmentent avec l'altitude, notamment à la station de La Dôle qui enregistre la quantité de précipitations la plus élevée. La station des Amburnex présente une quantité de précipitations qui se rapproche de celle de La Dôle, cependant située plus en altitude. Cela peut s'expliquer par le fait que la station est située dans une combe, ce qui vient perturber l'effet de l'altitude.

Les précipitations présentent une **forte variabilité interannuelle**, sans qu'une tendance claire puisse être dégagée sur la période observée. Toutefois, certaines années exceptionnellement sèches, comme 2003, se distinguent nettement sur l'ensemble des stations étudiées.

Ces constats soulignent l'importance d'**intégrer la variabilité intra-annuelle** dans les stratégies d'adaptation des alpages jurassiens au changement climatique, mais aussi de considérer chaque année individuellement afin d'identifier précisément les déficits hydriques annuels. Cela permet de mieux anticiper l'apparition de phénomènes extrêmes et de développer une gestion plus fine et réactive des ressources en eau à l'échelle saisonnière.

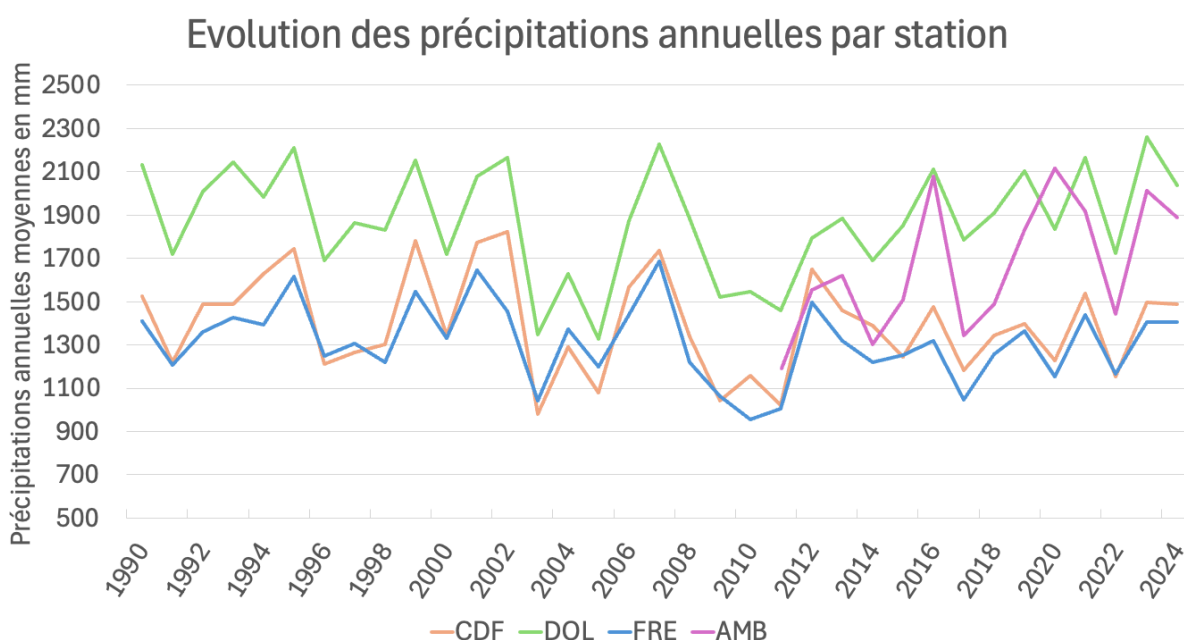


Figure 29. Évolution des précipitations annuelles moyennes par station entre 1990 et 2024. **CDF** : station de La Chaux-de-Fonds (1017 m), **DOL** : station de La Dôle (1669 m), **FRE** : station de La Frêtaz (1205 m), **AMB** : station des Amburnex (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)

Par conséquent, le calcul de l'**indice standardisé des précipitations** (*SPI - Standardized Precipitation Index*) permet de montrer les déficits de précipitations par année malgré l'absence de tendance générale. Les figures 30, 31 et 32 présentent le SPI annuel pour les stations de La Chaux-de-Fonds, de La Frêtaz et de La Dôle.

Sur l'ensemble des stations, on observe une **augmentation des années sèches à partir de 2003**, avec des périodes regroupant plusieurs années consécutives déficitaires, notamment entre 2003 et 2005, ainsi qu'entre 2009 et 2011.

Depuis 2016, la station de La Dôle, située à plus haute altitude, semble moins affectée par le manque de précipitations, avec des SPI relativement élevés, dépassant pour la plupart +1, notamment en 2016, 2019, 2021, 2023 et 2024 (Fig. 32). Les autres années restent encore dans la norme, y compris 2022, qui présente un SPI négatif mais demeurant dans la plage normale (-1 à +1).

Cependant, les deux autres stations, situées à des altitudes plus basses, montrent certaines années avec des valeurs de SPI proches de -1. C'est notamment le cas en 2017, année particulièrement sèche à La Frêtaz, où le SPI avoisine -1,5 (Fig. 31), ainsi qu'en 2022 à La Chaux-de-Fonds, où il atteint -1 (Fig. 30), frôlant ainsi la limite des conditions considérées comme sèches. Ces résultats mettent en évidence une fréquence des déficits pluviométriques, lesquels ont des répercussions concrètes sur la disponibilité en eau, en particulier dans les alpages où les sources se révèlent sensibles aux fluctuations saisonnières.

Ainsi, l'utilisation du SPI (*Standardized Precipitation Index*) renforce l'idée que ce n'est pas tant la quantité annuelle d'eau qui est préoccupante, mais plutôt sa répartition dans le temps et l'occurrence répétée d'années sèches, qui constituent une menace majeure pour une gestion durable de l'eau dans les milieux pastoraux jurassiens.

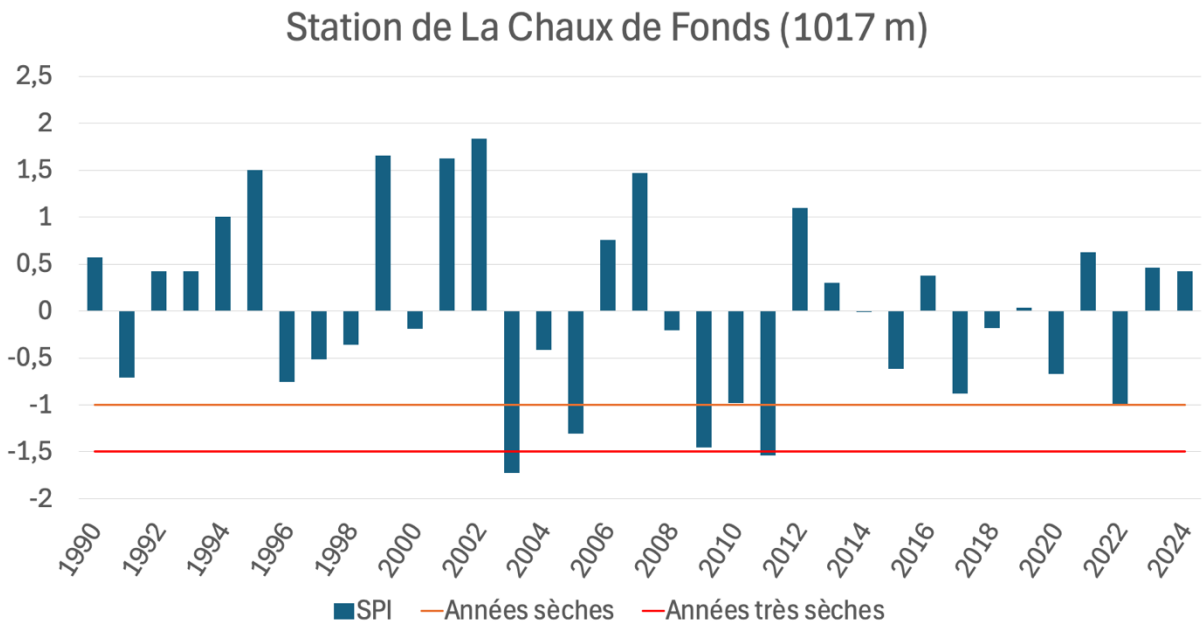


Figure 30. SPI à la station de La Chaux-de-Fonds (1017 m). La période de référence est 1991-2020 ; le seuil des années sèches est indiqué par la ligne orange (-1) et le seuil des années très sèches par la ligne rouge (-1,5) (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)

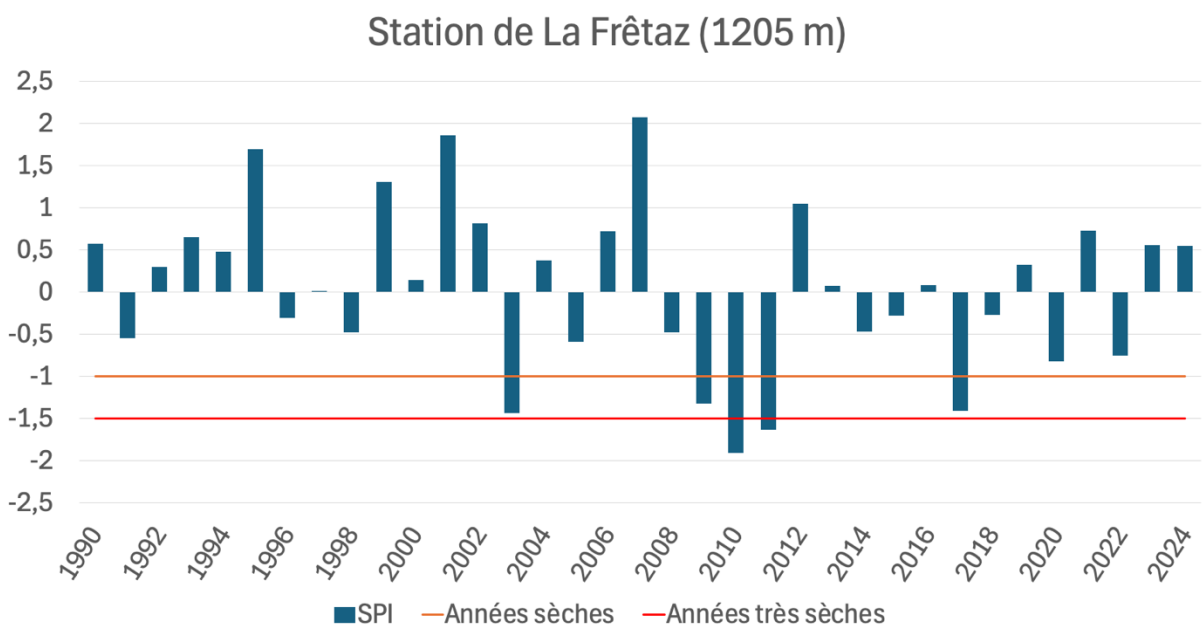


Figure 31. SPI à la station de La Frêtaz (1321 m). La période de référence est 1991-2020 ; le seuil des années sèches est indiqué par la ligne orange (-1) et le seuil des années très sèches par la ligne rouge (-1,5) (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)

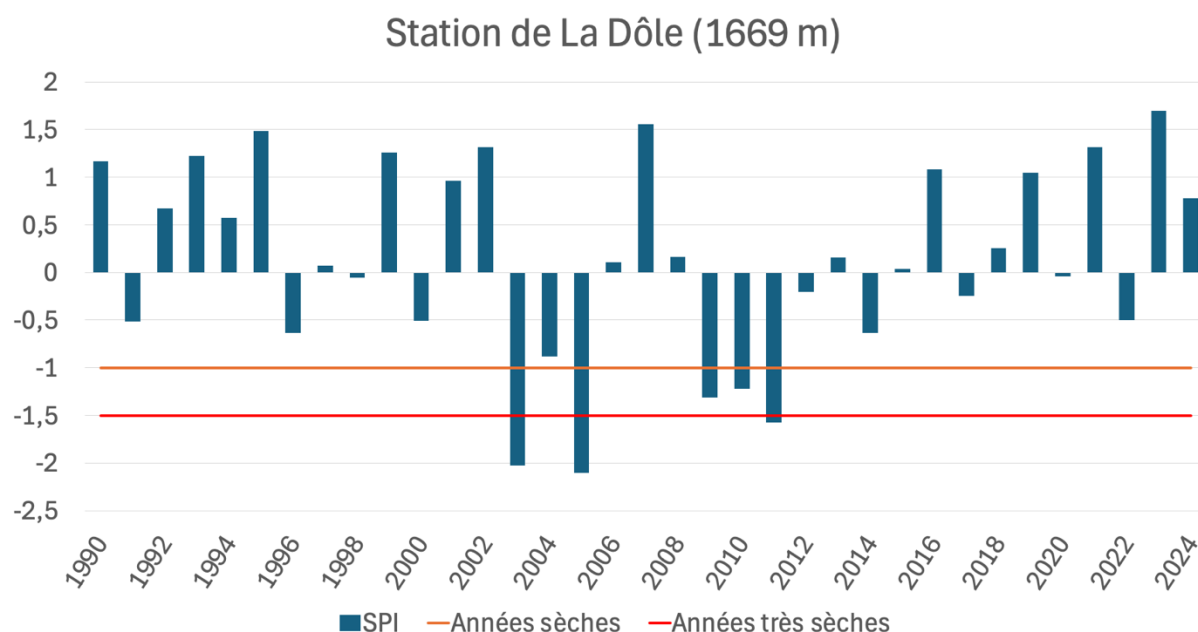


Figure 32. SPI à la station de La Dôle (1669 m). La période de référence est 1991-2020 ; le seuil des années sèches est indiqué par la ligne orange (-1) et le seuil des années très sèches par la ligne rouge (-1,5) (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)

4.1.2.5 Caractérisation des années sèches : 2011, 2018, 2022

La **méthode des valeurs seuils** (Threshold Level Method) a ensuite été mobilisée pour analyser plus finement certaines années considérées comme sèches depuis le début du siècle. Elle permet d'observer plus précisément la répartition et l'intensité des précipitations au cours de ces années, et d'identifier les différents profils pluviométriques associés aux sécheresses. Ces éléments offrent un éclairage complémentaire à l'indice SPI, en mettant en évidence la manière dont les épisodes de sécheresse se manifestent concrètement au cours d'une année.

L'année **2011** (Fig. 33 et 34) se caractérise par un déficit de précipitations prolongé de janvier à juin, soit pendant environ six mois consécutifs. Les trois stations - La Dôle, La Frêta et La Chaux-de-Fonds¹⁶ - n'enregistrent des précipitations supérieures au seuil que durant les mois de juillet et de décembre. Même la station de La Dôle, située en altitude, n'est pas épargnée, ne franchissant le seuil qu'assez légèrement en juillet, ce qui confirme que les alpages d'altitude sont eux aussi exposés à des situations de sécheresse prolongée. En résumé, l'année 2011 a été **globalement sèche de janvier à novembre**, avec seulement quelques épisodes ponctuellement plus humides, autour du mois de juillet, ainsi qu'un mois de décembre plus arrosé.

¹⁶ Les graphiques issus de la station de La Chaux-de-Fonds n'ont pas été présentés, les résultats étant très similaires à ceux de la station de La Frêta.

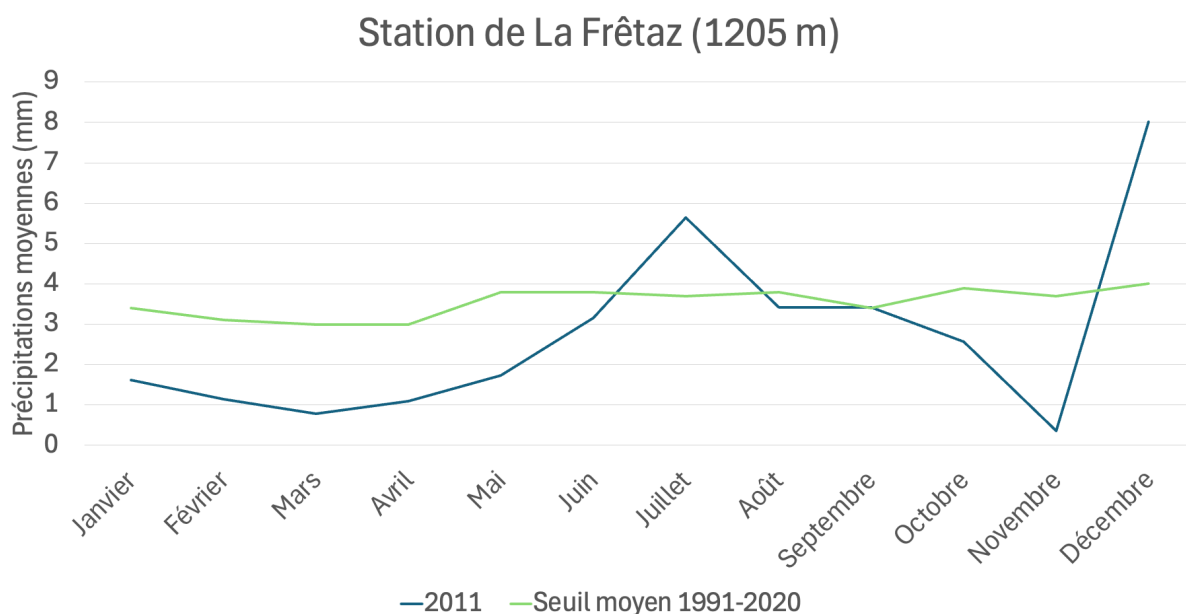


Figure 33. Précipitations moyennes mensuelles (mm) en 2011 pour la station de La Frêtaz (1205 m) par rapport aux valeurs seuils de la période de référence 1991-2020 (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)

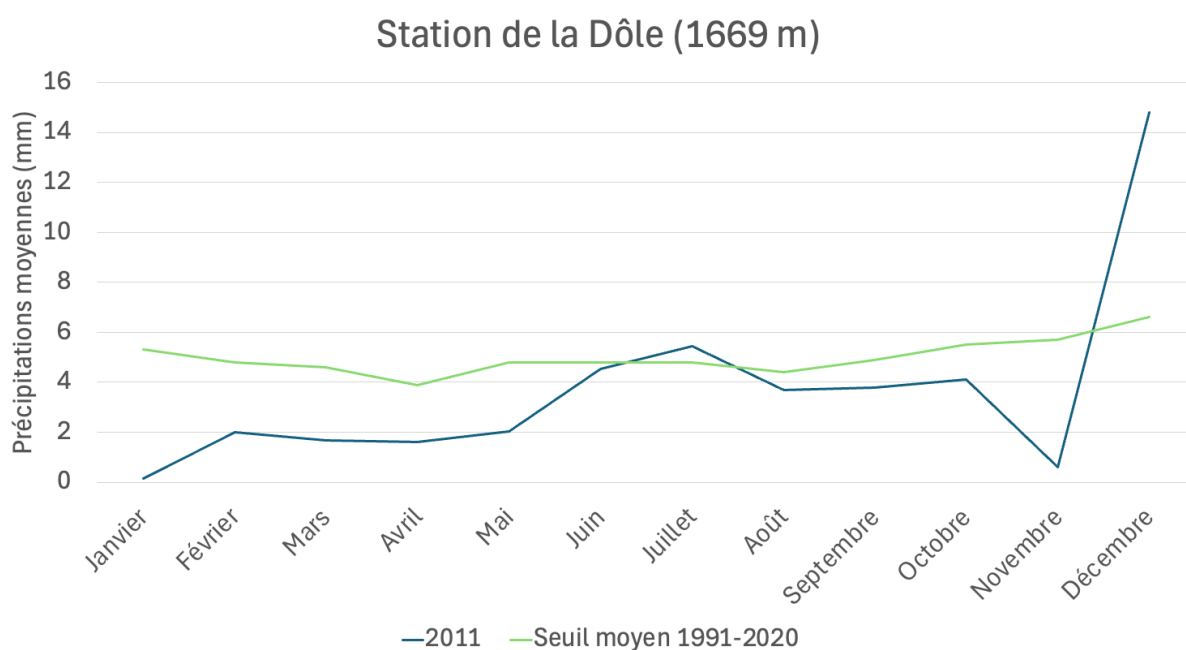


Figure 34. Précipitations moyennes mensuelles (mm) en 2011 pour la station de La Dôle (1669 m) par rapport aux valeurs seuils de la période de référence 1991-2020 (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)

L'année **2018** (Fig. 35 et 36) se distingue par des précipitations globalement inférieures aux valeurs de référence de 1991 à 2020. Pour les trois stations, des cumuls inférieurs au seuil sont observés de manière continue entre avril et novembre, avec quelques épisodes plus humides en avril et juillet pour la station de La Dôle et de La Chaux-de-Fonds. Cette variabilité s'explique en partie par l'altitude plus élevée de la station de La Dôle, qui lui permet de bénéficier d'épisodes de précipitations localisés même en période sèche. En revanche, la station de La Frêtaz, située à plus basse altitude, reste sous les seuils de précipitation d'avril à novembre,

sans réelle pause dans cet épisode de sécheresse. Les mois de septembre, octobre et novembre ont été particulièrement secs pour l'ensemble des stations, traduisant une situation de déficit hydrique prolongé. En résumé, l'année 2018 se caractérise par un **printemps déficitaire dès ses débuts, suivi d'un été et d'un automne très secs**, posant d'importants défis pour les ressources en eau dans les alpages.

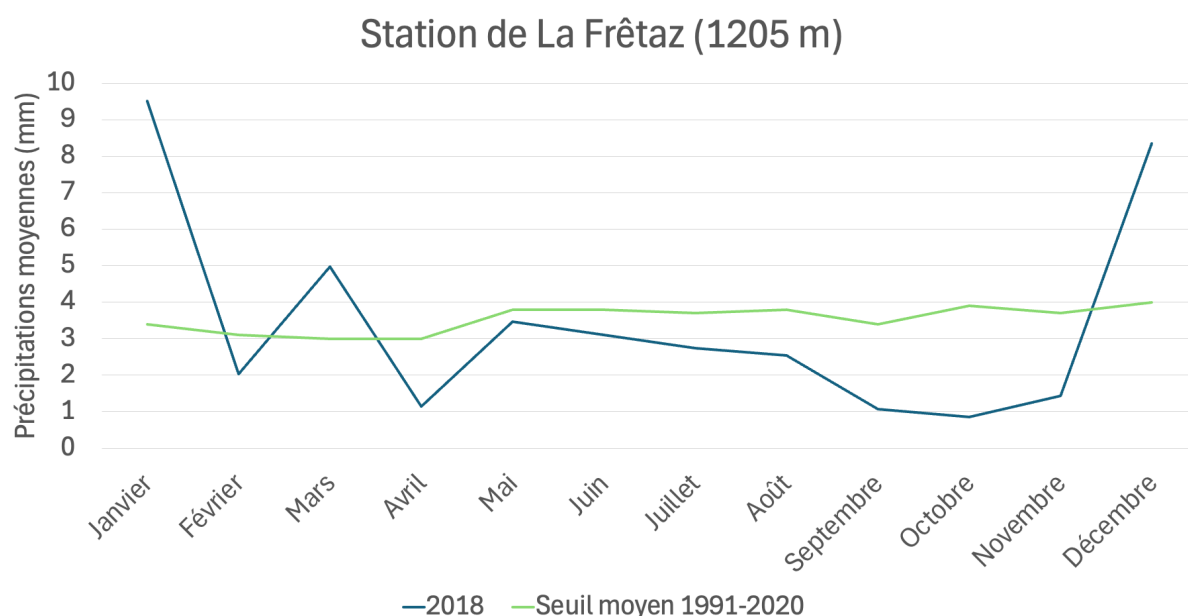


Figure 35. Précipitations moyennes mensuelles (mm) en 2018 pour la station de la Frêtaz (1205 m) par rapport aux valeurs seuils de la période de référence 1991-2020 (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)

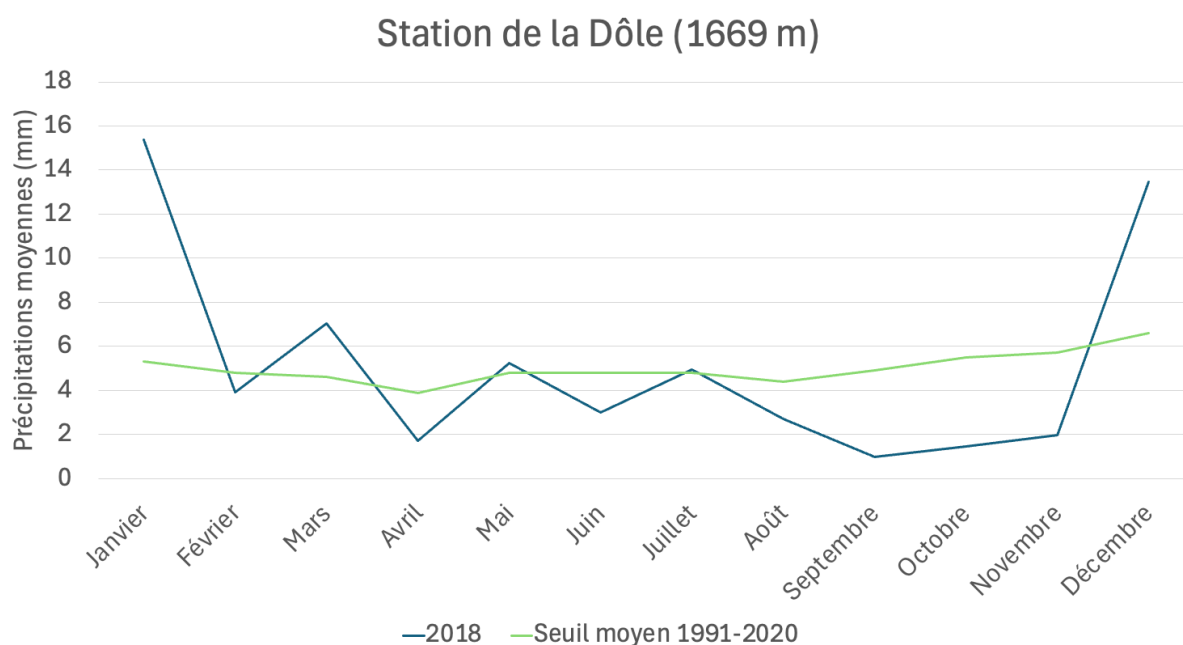


Figure 36. Précipitations moyennes mensuelles (mm) en 2018 pour la station de la Dôle (1669 m) par rapport aux valeurs seuils de la période de référence 1991-2020 (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)

Pour terminer, l'année **2022** (Fig. 37 et 38) se caractérise par des précipitations inférieures aux normales à partir de la mi-avril jusqu'en août. Cependant, le début de l'année présente

également un déficit, avec les mois de janvier, mars et mai affichant des précipitations sous les valeurs de référence 1991-2020, bien que ces déficits précoces aient peu affecté le remplissage des stocks pour la saison estivale. Puis durant l'été, les mois de juillet et août ont été relativement secs, avant qu'un mois de septembre plus humide ne vienne atténuer ces déficits. Pour résumer, 2022 est l'année qui révèle **la plus forte variabilité des précipitations** entre les mois de l'année, bien que le printemps et l'été aient été marqués, dans plusieurs stations, par une **sécheresse prononcée**.

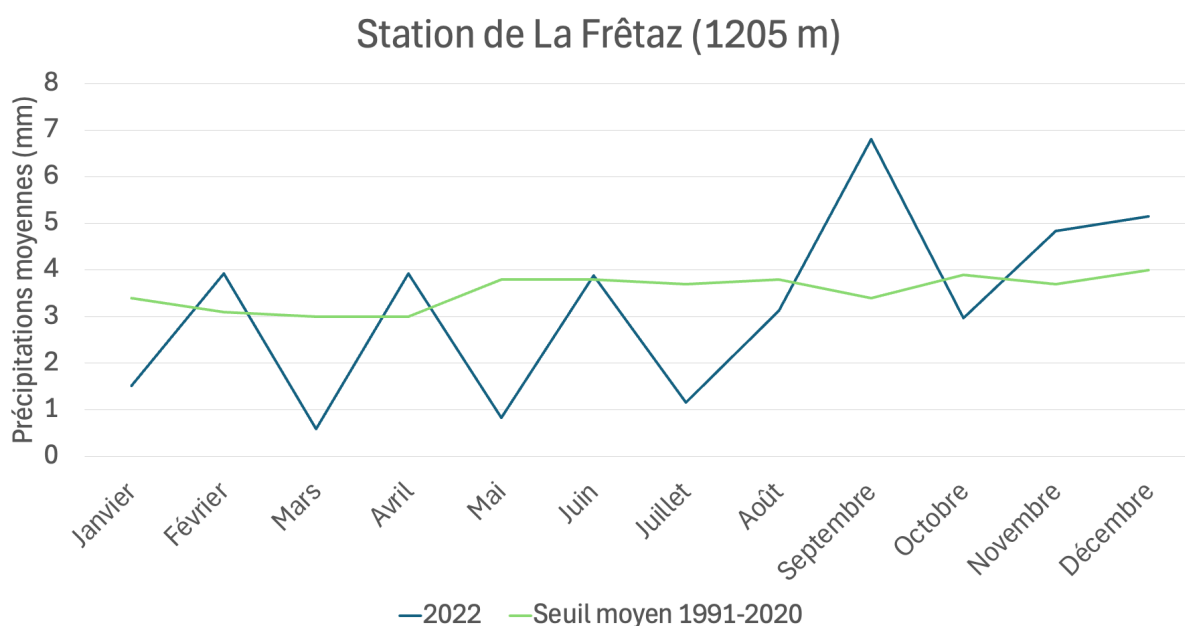


Figure 37. Précipitations moyennes mensuelles (mm) en 2022 pour la station de la Frêtaz (1205 m) par rapport aux valeurs seuils de la période de référence 1991-2020 (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)

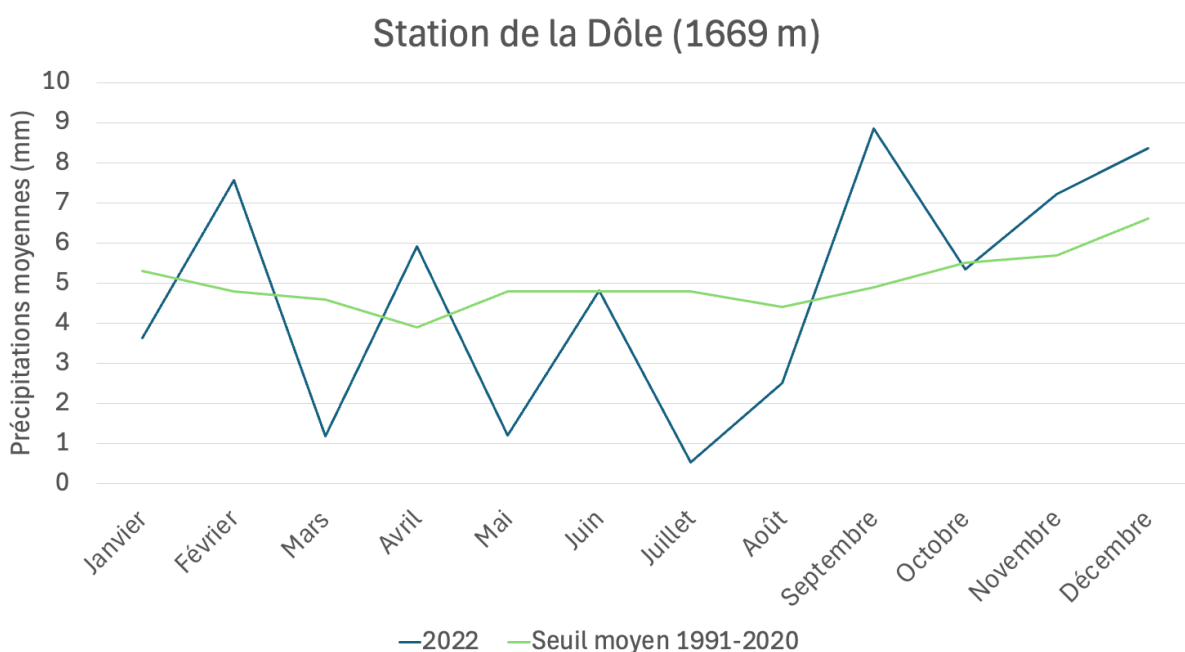


Figure 38. Précipitations moyennes mensuelles (mm) en 2022 pour la station de la Dôle (1669 m) par rapport aux valeurs seuils de la période de référence 1991-2020 (Sources des données : MétéoSuisse ; Roulin, 2025)

L'analyse des années sèches récentes permet de dégager plusieurs conclusions importantes : les **profils des épisodes de sécheresse peuvent être très différents** et ne se construisent pas toujours de la même manière, mais ils ont en commun un impact marqué sur la disponibilité en eau et sur la régénération des pâturages.

En 2011, le climat a été marqué par un **assèchement prolongé sur une grande partie de l'année** (janvier-novembre), limitant le remplissage des sources, citernes et étangs en début de saison et réduisant l'eau disponible pour le fourrage et sa régénération dans les pâturages. Cette situation a provoqué une **diminution rapide des stocks d'eau**, déjà insuffisamment reconstitués par les précipitations du début d'année, ce qui a aggravé la sécheresse estivale et affecté à la fois la qualité et la disponibilité du fourrage jusqu'à la fin de la saison d'estivage.

En 2018, malgré un mois de janvier particulièrement humide, un **déficit prolongé de précipitations s'est installé durant la seconde moitié de l'année**, d'avril à novembre, coïncidant avec la période d'estivage. Cette configuration a entraîné une diminution progressive des réserves d'eau accumulées en début d'année. La sécheresse, principalement estivale, a également limité la régénération des pâturages en fin de saison, avec trois mois consécutifs particulièrement secs (septembre, octobre et novembre), accentuant les tensions sur les ressources fourragères. L'épisode, qui s'est prolongé jusqu'à la fin de l'année, a eu des effets durables, affectant à la fois la disponibilité en eau et la régénération des herbages.

L'année 2022 a présenté un profil différent, avec une **forte variabilité des précipitations au cours des mois**. Malgré des précipitations variables en début d'année, une période de sécheresse durable s'est installée d'avril à août, avec des déficits marqués en juillet et en août. Cette situation a entraîné une diminution rapide des ressources en eau en pleine période d'estivage. Les conditions de sécheresse ont également fortement impacté l'humidité du sol, limitant la régénération du fourrage durant une période cruciale.

Dans l'ensemble, l'analyse de ces trois années (2011, 2018 et 2022) montre que, bien que les épisodes de sécheresse puissent suivre des trajectoires différentes, ils entraînent systématiquement une réduction des stocks d'eau et une pression accrue sur les pâturages, mettant en évidence la vulnérabilité des alpages face aux variations climatiques et l'importance d'adapter les pratiques de gestion de l'eau et du pâturage pour maintenir la résilience du système pastoral.

4.1.2.6 Les impacts du changement climatique

Depuis la fin du XX^e siècle, les tendances climatiques observées dans la chaîne jurassienne, notamment le réchauffement marqué et la variabilité accrue des précipitations, comme nous a montré l'analyse climatique des alpages du Jura vaudois, ont déjà impacté la disponibilité de la ressource en eau. Il apparaît donc essentiel d'**anticiper les évolutions climatiques futures** afin de mieux appréhender les défis potentiels liés à la gestion de l'eau dans les décennies à venir.

Ce chapitre s'appuie sur les travaux de Reynard et al. (2024), qui se sont intéressés aux projections climatiques pour l'horizon 2060, en se concentrant sur les **stations météorologiques de La Chaux-de-Fonds (1017 m) et de La Dôle (1669 m)**. Ces projections sont basées sur les données du Centre National pour la Climatologie et la Surveillance (NCCS) produites dans le cadre le programme CH2018 (Technical Report CH2018, 2018), et par conséquent sur les différents scénarios climatiques présentés au chapitre 2.2.1 de ce travail. Pour cette étude, Reynard et al. (2024) ont retenus quatre indicateurs principaux :

- Les **températures moyennes annuelles**, ainsi que celles mesurées en hiver (décembre à février) et en été (juin à août)
- Les **précipitations moyennes**, globales, hivernales et estivales
- Le **nombre de jours avec chute de neige fraîche**, utilisé comme indicateur indirect de la variation du rapport pluie/neige dans les précipitations hivernales
- Le **nombre de jours dits « d'été »**, c'est-à-dire les journées où la température atteint ou dépasse 25°C, ce qui permet d'estimer l'évolution de l'évapotranspiration estivale

L'horizon retenu pour cette étude est 2060, car il s'agit d'un cadre temporel pertinent pour la planification d'adaptations climatiques à moyen terme (Reynard et al., 2024). Sur le plan spatial, les données utilisées proviennent des publications du NCCS pour le canton de Vaud¹⁷ et la région du Jura¹⁸.

Étant donné que les alpages du Bucley/Pré d'Etoy et de la Perroude de Vaud se situent entre 1300 et 1400 mètres d'altitude, les données des stations de La Chaux-de-Fonds (1017 m) et de La Dôle (1669 m) ont été intégrées, en complément des gradients altitudinaux fournis par le NCCS. Cette approche permet de prendre en compte les variations climatiques liées à l'altitude dans la chaîne du Jura. L'objectif de ce chapitre est donc de projeter les impacts potentiels du changement climatique sur le massif jurassien d'ici le milieu du siècle, afin d'en évaluer les conséquences pour la gestion future de l'eau dans les alpages.

Les quatre indicateurs retenus - les températures et leur augmentation, les précipitations et la neige - constituent des déterminants majeurs des conditions environnementales des alpages jurassiens. Ces facteurs influencent à la fois la disponibilité, le stockage et la demande en eau, conditionnant ainsi l'utilisation de la ressource hydrique tout au long de l'année.

¹⁷ Office fédéral de l'environnement (OFEV) et Centre national de la recherche sur le climat (NCCS), Projections climatiques pour le canton de Vaud. Consulté le 23 juillet 2025, à l'adresse

<https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/regions/cantons/vaud.html#766300646>

¹⁸ Office fédéral de l'environnement (OFEV) et Centre national de la recherche sur le climat (NCCS), Projections climatiques pour la région du Jura. Consulté le 23 juillet 2025, à l'adresse

<https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/regions/grandes-regions/jura.html>

Le tableau 4 présente l'évolution de ces indicateurs à l'horizon 2060 pour la chaîne jurassienne, en fonction de deux scénarios climatiques (IPCC, 2023) :

- Le scénario **RCP 2.6**, qui suppose une réduction importante et rapide des émissions de gaz à effet de serre mondiales dans les années à venir.
- Le scénario **RCP 8.5**, qui reflète une trajectoire de poursuite des émissions à un rythme élevé, sans mesure de protection du climat.

Tableau 4. Projection des changements climatiques à l'horizon 2060 pour deux stations jurassiennes selon les scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5 (Reynard et al., 2024) (Source : CH2018 (NCCS, 2018))

Station	Altitude (m)	Situation actuelle (1981-2010)	Situation en 2060 selon :	
			Scénario RCP 2.6	Scénario RCP 8.5
		Températures hivernales [°C]		
La Chaux-de-Fonds	1017	-1.1	-0.3 à +1.0	+0.9 à +2.0
La Dôle	1669	-2.5	-1.9 à -0.7	-0.6 à +0.5
		Températures estivales [°C]		
La Chaux-de-Fonds	1017	+14.3	+15.2 à +16.4	+16.5 à +18.3
La Dôle	1669	11.0	+12.0 à +13.5	+13.6 à +15.6
		Jours d'été		
La Chaux-de-Fonds	1017	13	17 à 30	27 à 50
La Dôle	1669	1	1 à 4	3 à 12
		Précipitations hivernales [mm/mois]		
La Chaux-de-Fonds	1017	110	106 - 130	114 - 140
La Dôle	1669	169	164 - 197	171 - 210
		Précipitations estivales [mm/mois]		
La Chaux-de-Fonds	1017	125	99-134	90-128
La Dôle	1669	136	110-144	99-126
		Jours de neige fraîche		
La Chaux-de-Fonds	1017	36	26-41	20-30
La Dôle	1669	69	45-66	33-50

Les alpages du Bucley/Pré d'Etoy et de la Perroude de Vaud dépendent entièrement des précipitations, la ressource en eau étant exclusivement issue de la collecte d'eau de pluie, via les toits ou les étangs. L'absence d'aquifères plus profonds les rend particulièrement sensibles aux fluctuations saisonnières du climat, en particulier aux variations pluviométriques

observées tout au long de l'année. Dans ce contexte, les projections climatiques à l'horizon 2060 annoncent des évolutions susceptibles d'accentuer leur vulnérabilité hydrique.

D'après les scénarios climatiques du NCCS analysés par Reynard et al. (2024), les hivers à l'horizon 2060 devraient devenir plus doux et plus humides, mais également nettement moins neigeux, y compris en altitude (Fig. 39). Sous le **scénario RCP 2.6**, les températures hivernales augmenteraient d'environ +1.4°C à La Chaux-de-Fonds et +1.2°C à La Dôle, tandis que les précipitations hivernales progresseraient de 6% à 8 % selon les stations. Cependant, cette humidification apparente s'accompagnerait d'une réduction marquée du nombre de jours avec neige fraîche, de -3 à -14 jours (Fig. 41).

Le scénario RCP 8.5 accentue ces tendances : les températures hivernales atteindraient +2.7°C à La Chaux-de-Fonds et +2.4°C à La Dôle, les précipitations augmenteraient de 12% à 15 % (Fig. 39), tandis que le nombre de jours avec neige fraîche pourrait chuter de 11 à 28 jours, en fonction de l'altitude (Fig. 41). Cette transition d'un régime nival vers un régime pluvial, y compris en moyenne montagne, entraîne une réduction de la recharge différée en eau via la fonte printanière de la neige, un processus pourtant essentiel pour maintenir les débits printaniers et assurer une disponibilité en eau suffisante en été.

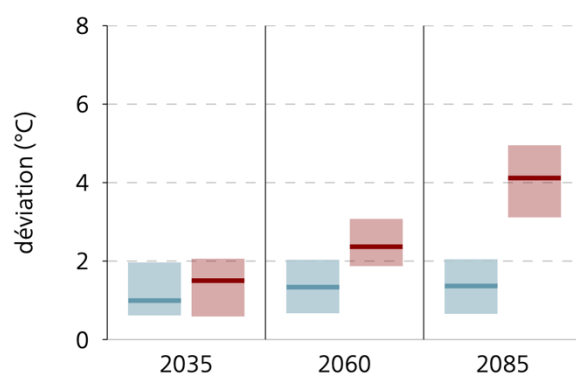
Pour des alpages comme le Bucley/Pré d'Etoy ou la Perroude de Vaud, cela pourrait se traduire par un risque accru de pénurie d'eau dès la fin du printemps, en particulier si les précipitations liquides ne suffisent pas à compenser la perte de stockage liée à la disparition progressive du manteau neigeux.

Température

déviations de la période standard 1981-2010

Jura
hiver

RCP2.6
RCP8.5



Précipitations

déviations de la période standard 1981-2010

Jura
hiver

RCP2.6
RCP8.5

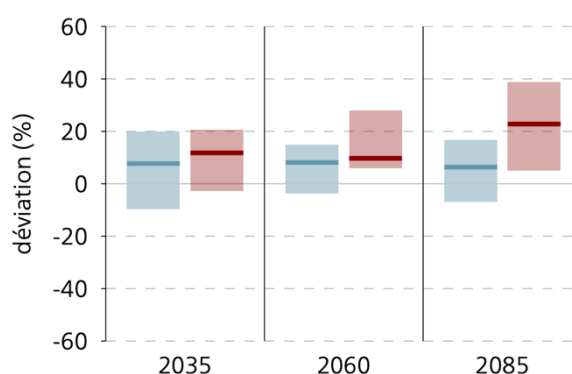


Figure 39. Évolution des températures et des précipitations hivernales selon les scénarios climatiques CH2018 pour la chaîne jurassienne. (Source : Scénarios climatiques CH2018 (NCCS, 2018)).

Les projections estivales permettent de dresser un constat tout aussi préoccupant. Si le **scénario RCP 2.6** annonce une augmentation modérée des températures estivales (+1.5°C à +1.8°C) et une baisse des précipitations (-8% à -9%), le nombre de jours d'été augmente déjà de 2 à 11 jours en fonction de l'altitude, se traduisant par une évapotranspiration plus forte (Fig. 40).

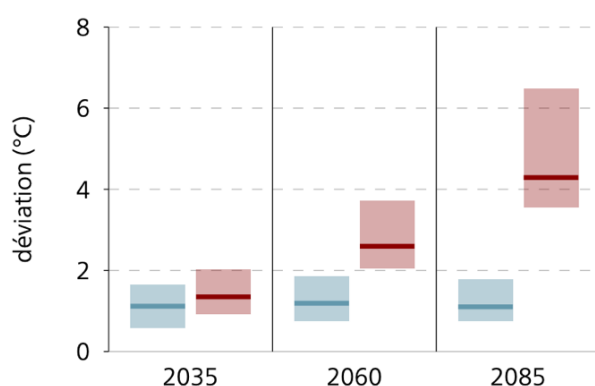
Le scénario RCP 8.5 est nettement plus critique : les températures estivales s'élèveraient de +3.1 à +3.6 °C, les précipitations moyennes chuteraient de -15% à -23% (Fig. 40), et les journées dépassant 25 °C augmenteraient de 6 à 25 jours par année en fonction de la station et de l'altitude considérée (Fig. 41). Ce rallongement marqué de la saison chaude, couplé à une baisse de l'humidité, aggrave les stress hydriques pour les pâturages et accroît la pression sur les infrastructures d'approvisionnement, mais il augmente également la durée potentielle de la saison d'estivage.

Température

déviations de la période standard 1981-2010

Jura
été

RCP2.6
RCP8.5



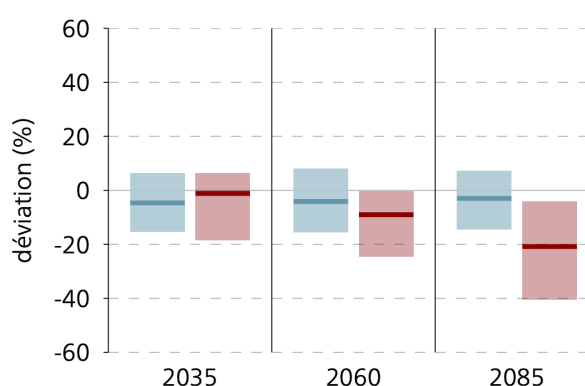
© scénarios climatiques CH2018

Précipitations

déviations de la période standard 1981-2010

Jura
été

RCP2.6
RCP8.5



© scénarios climatiques CH2018

Figure 40. Évolution des températures et des précipitations estivales selon les scénarios climatiques CH2018. (Source : Scénarios climatiques CH2018 (NCCS, 2018)).

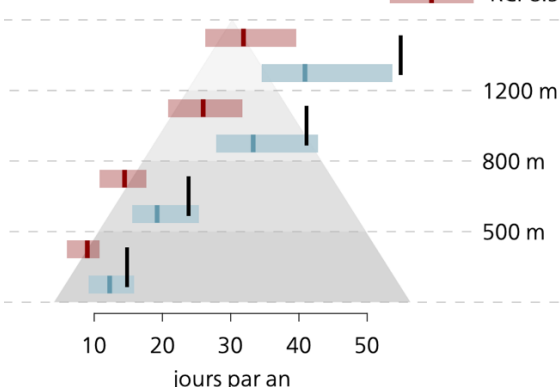
Jours avec neige fraîche

Jura

période standard
1981-2010

2060

RCP2.6
RCP8.5



© scénarios climatiques CH2018

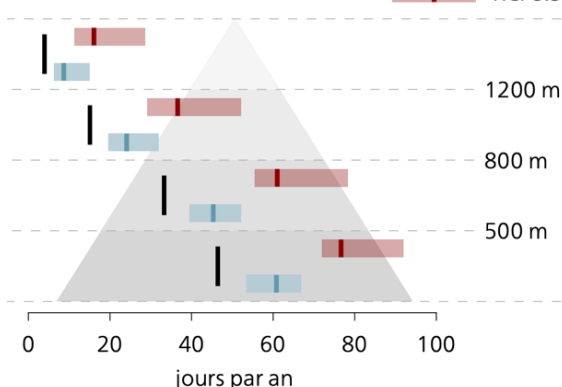
Jours d'été

Jura

période standard
1981-2010

2060

RCP2.6
RCP8.5



© scénarios climatiques CH2018

Figure 41. Évolution du nombre de jours d'été et du nombre de jours avec neige fraîche à différentes altitudes selon les scénarios climatiques CH2018 pour la chaîne jurassienne (Source : Scénarios climatiques CH2018 (NCCS, 2018)).

L'**allongement de la période de végétation** constitue également un indicateur significatif de l'évolution climatique. Actuellement, la durée de la saison de croissance de la végétation atteint environ 200 jours sur les crêtes du Jura. À l'avenir, cette période pourrait s'allonger d'environ 40 jours, atteignant ainsi jusqu'à 240 jours par an en altitude (Crocchi-Maspoli et al., 2014). Une telle évolution pourrait entraîner une modification des pratiques pastorales, en allongeant la période d'estivage des troupeaux sur les alpages, et impacter la gestion des ressources en eau dans un contexte de présence prolongée du bétail.

Pour résumer, pour la Perroude de Vaud comme pour le Bucley/Pré d'Etoy, ces évolutions climatiques laissent présager une **situation de double vulnérabilité** : d'une part, **une recharge hivernale plus incertaine**, d'autre part, **des étés plus chauds, plus longs et plus secs, avec des conséquences directes sur la disponibilité en eau et sur la qualité du fourrage**, déjà sensibles aux stress hydriques. Ces éléments demandent une adaptation renforcée, tant sur le plan des infrastructures hydrauliques que des pratiques pastorales, afin de garantir la résilience de ces alpages face aux défis climatiques à venir.

Dans cette perspective, les alpages apparaissent comme des systèmes particulièrement exposés à une vulnérabilité hydrique croissante face au changement climatique. Il devient dès lors essentiel d'établir un diagnostic précis de l'état actuel des ressources et des modalités d'approvisionnement en eau, afin d'anticiper plus efficacement les problématiques à venir et d'adapter les stratégies de gestion.

4.2 Le diagnostic des alpages

Ce chapitre présente le deuxième groupe de déterminants de la demande en eau dans les alpages, qui concerne les **installations hydrauliques** (Fig. 15). Il propose une description des **infrastructures de captage, d'adduction, de stockage et de distribution de l'eau** sur les alpages du Bucley/Pré d'Etoy et de la Perroude de Vaud, ainsi qu'une analyse de leur impact sur la **vulnérabilité des alpages face à la sécheresse**. En effet, chaque alpage possède des infrastructures hydrauliques différentes qui vont influencer la disponibilité de l'eau sur l'alpage pour les usages et les demandes liés à cette ressource.

4.2.1 Descriptions des infrastructures hydrauliques

L'**alpage du Bucley/Pré d'Etoy** est la propriété de la Commune de L'Abbaye et l'exploitation est menée par M. Cédric Rochat, amodiataire. Les alpages du Bucley et du Pré d'Etoy font partie du même train d'alpage et sont donc exploités par le même amodiataire (annexe I et II). Le tableau 5 présente les principales caractéristiques liées à la surface pâturable, aux charges en bétail et à l'organisation du pâturage, ainsi qu'à la production fromagère de l'alpage du Bucley/Pré d'Etoy.

Tableau 5. Caractéristiques générales de l'alpage du Bucley/Pré d'Etoy en 2024 (Source : Montanum)

Surface pâturable	83.2 hectares
Charge usuelle totale	92.3 PN ¹⁹ (45.6 PN pour le Bucley + 46.7 PN pour le Pré d'Etoy)
Types d'animaux présents	Vaches laitières de race Red Holstein, porcs
Taille du troupeau	70 vaches laitières et 60 porcs
Organisation du pâturage	Tournus entre les parcs du Bucley (8 parcs) et du Pré d'Etoy (6 parcs) (Fig. 42)
Valorisation du lait	Transformation en Gruyère d'alpage AOP au chalet d'alpage ²⁰ , directement par le fromager

En termes d'infrastructures hydrauliques, l'approvisionnement en eau sur **l'alpage du Bucley** (Fig. 43) se fait par le stockage de l'eau de pluie dans trois citernes, deux de 40 m³ (C1 et C2) se trouvant à proximité du chalet, alimentées par la récupération d'eau du toit, et une autre de 40 m³ (C3), située plus au sud de l'alpage, approvisionnée par sa dalle. Le stockage total des trois citernes s'élève à 120 m³ et alimente trois bassins (B1, B2 et B3) sur l'ensemble de l'alpage, ainsi que le chalet, la fromagerie et la porcherie.

L'approvisionnement en eau est complété par un étang de 250 m³ (E1), situé au nord de l'alpage, qui alimente six bassins (B4, B5, B6, B7, B8 et B9) répartis sur l'alpage. La combe se trouvant au sud de l'alpage, comprenant un bassin (B10), est approvisionnée par l'eau provenant de la citerne située à proximité du chalet de l'alpage du Pré d'Etoy.

Sur **l'alpage du Pré d'Etoy** (Fig. 44), l'eau est stockée dans une citerne de 55 m³ (C1) située à proximité du chalet, qui est approvisionnée grâce à l'eau de ruissellement du toit. Cette citerne alimente quatre bassins (B1, B3, B4 et B8) répartis sur l'alpage ainsi qu'un bassin (B10) situé dans la combe au sud de l'alpage du Bucley.

L'approvisionnement en eau est complété par un puits de 20 m³ (P1), qui alimente un bassin (B2). Pour terminer, un étang de 150 m³ (E1) dessert trois bassins (B5, B6 et B7), également répartis dans différents parcs de l'alpage. L'eau de l'étang est également partagée avec un alpage voisin.

¹⁹ PN : Pâquier normal. Unité de référence pour le calcul des contributions d'estivage correspondant à l'estivage d'une unité de gros bétail pendant 100 jours (Agridea. (2016). *Contributions d'estivage*. Programme national de protection des troupeaux. Consulté le 13 août 2025, sur <https://www.protectiondestroupeaux.ch/fr/programme-national-de-protection-des-troupeaux/couts-et-financement/contributions-destivage/>)

²⁰ La production de fromage s'effectue au chalet du Bucley, y compris lorsque le bétail pâture sur l'alpage du Pré d'Etoy.

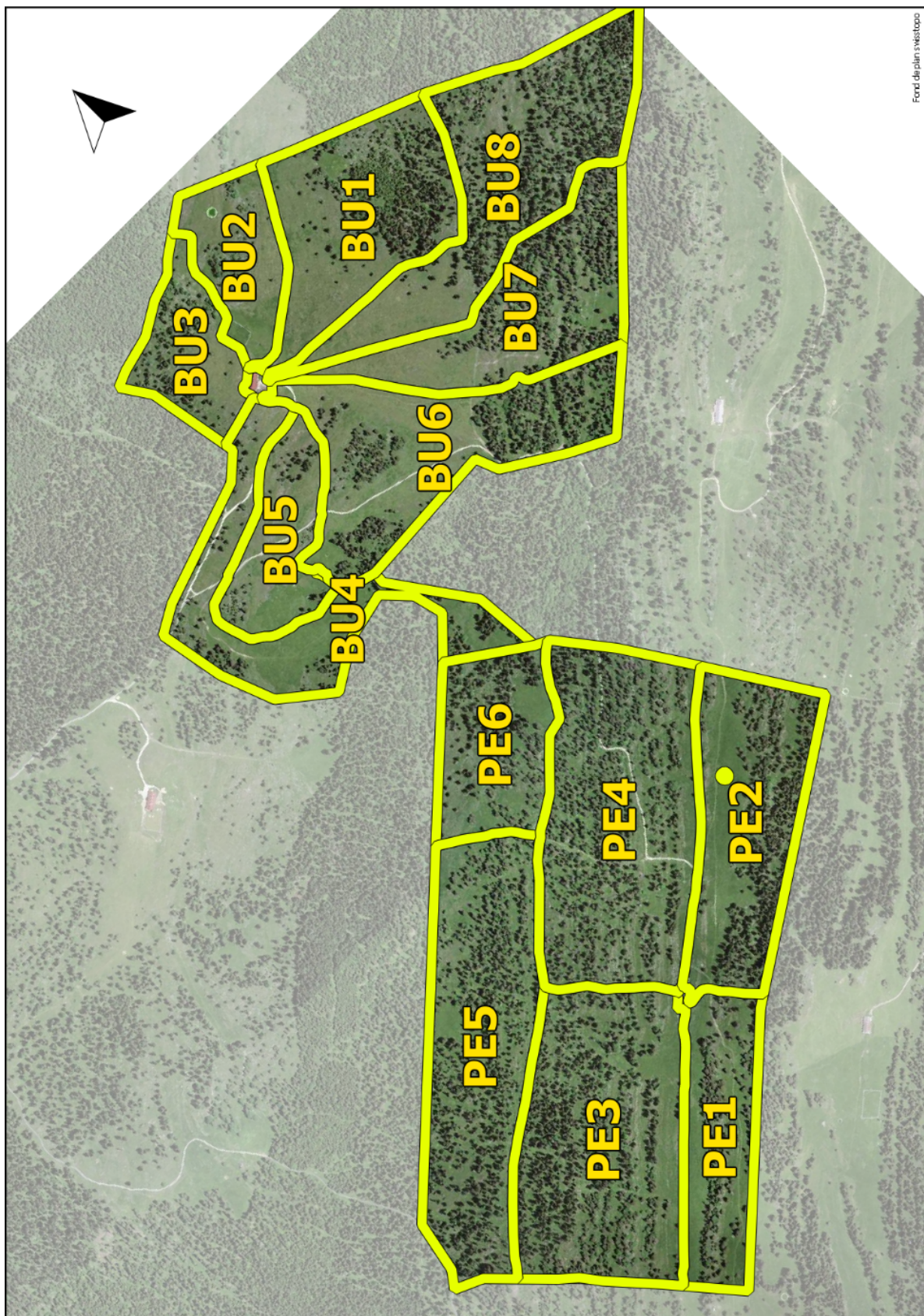
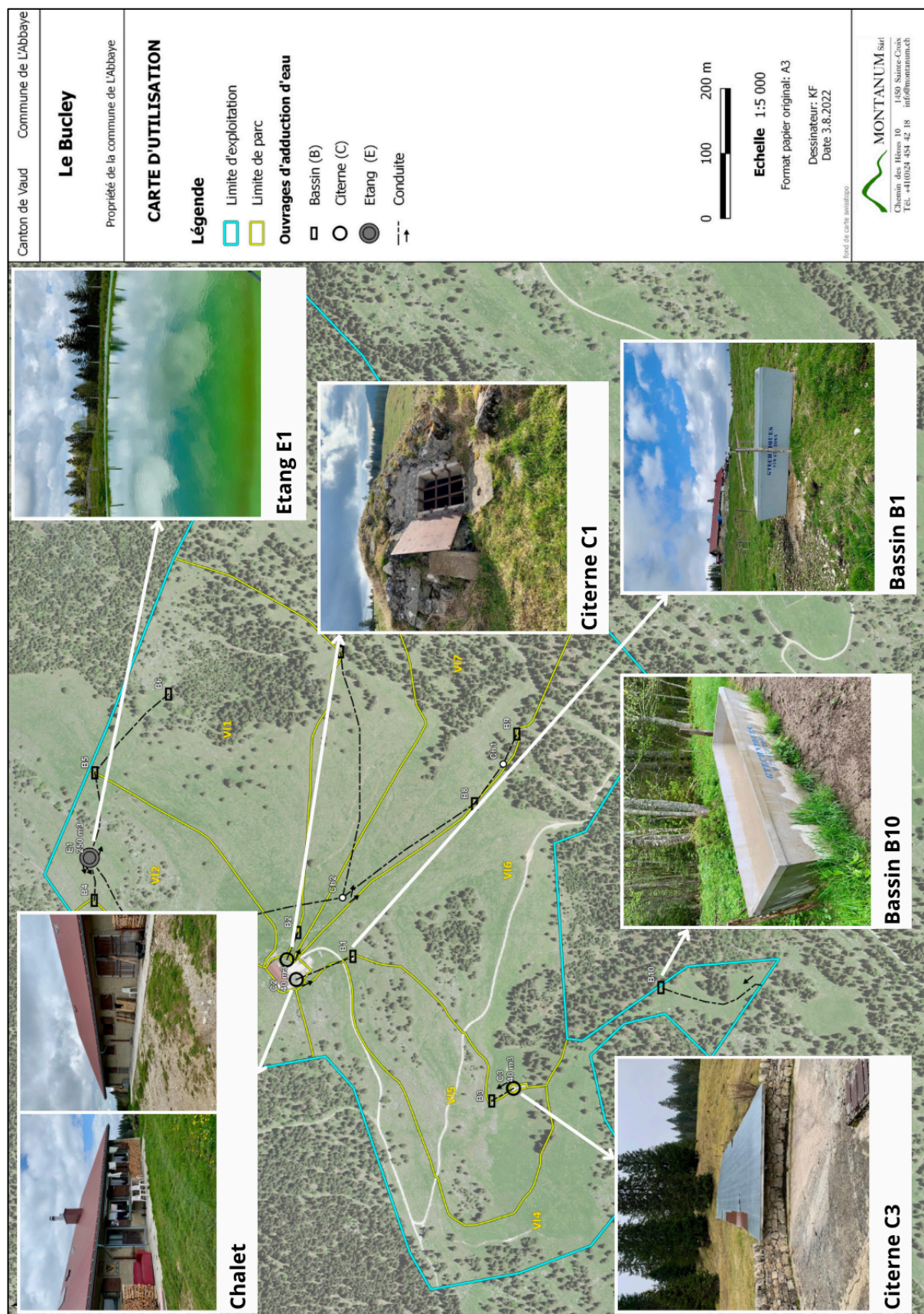


Figure 42. Parcs des alpages du Bucley (BU) et du Pré d'Etoy (PE) en 2024 (Mosimann et al., 2025)



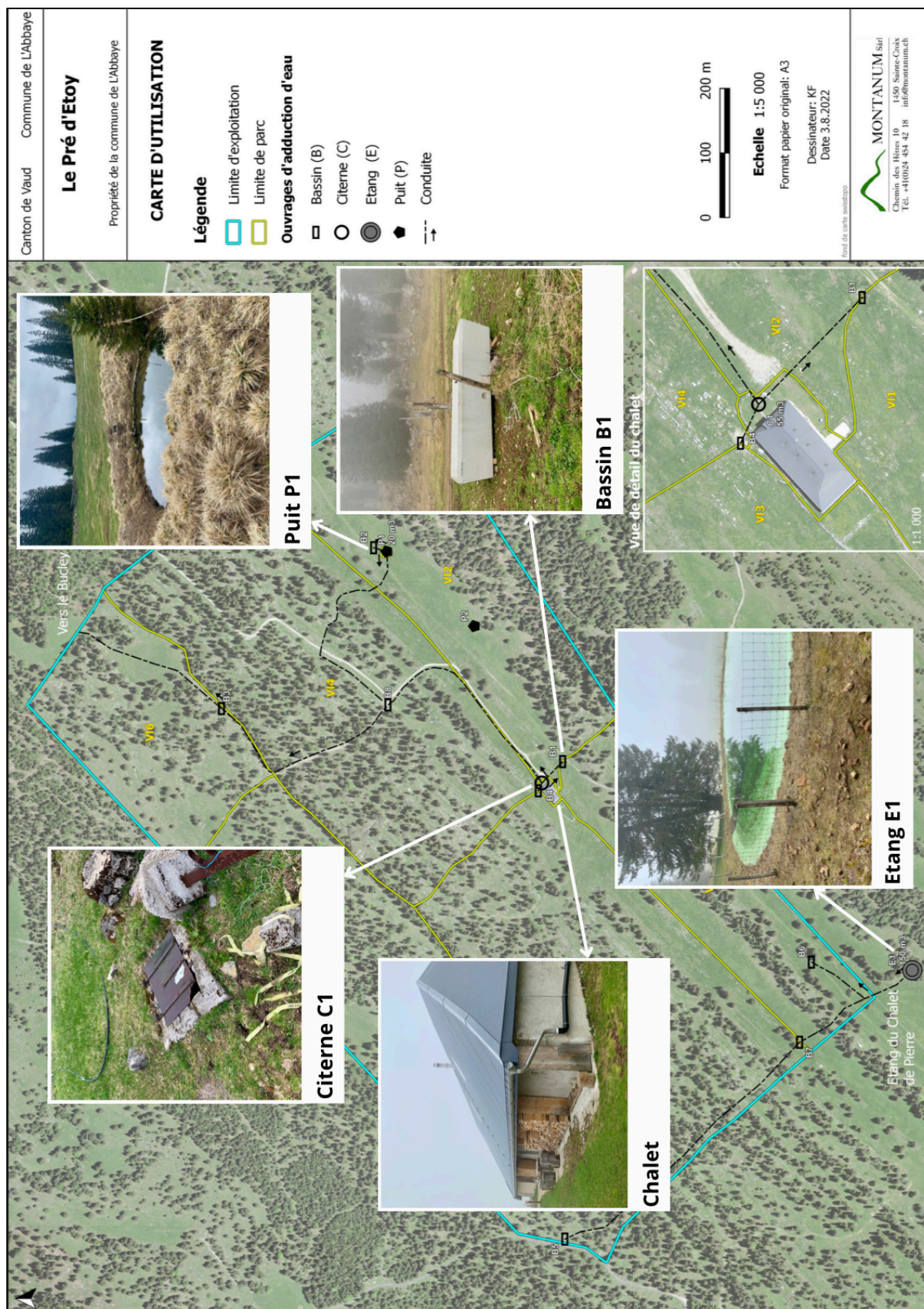


Figure 44. Infrastructures hydrauliques du Pré d'Etoy (Montanum, 2022, modifié par Lorena Roulin, 2025)

L'alpage de la Perroude de Vaud est la propriété de la commune de Le Vaud et est exploité par M. François-Lionel Humbert, domicilié à Le Vaud (annexe III). Le tableau 6 synthétise les principales caractéristiques de ce site, notamment la surface pâturable, la charge en bétail, la composition du troupeau ainsi que l'organisation du pâturage.

Tableau 6. Caractéristiques générales de l'alpage de la Perroude de Vaud en 2025 (Source : Montanum)

Surface pâturable	40.4 hectares
Charge usuelle totale	24.73 PN
Taille du troupeau	20 têtes (environ 50 en tout mais une partie estive ailleurs)
Types d'animaux présents	Génisses, vaches allaitantes et veaux (race Grise rhétique), quelques chevaux
Organisation du pâturage	Tournus entre les 4 parcs composant l'alpage (Fig. 45)
Valorisation du lait	Non concerné (pas de production laitière sur place)

L'approvisionnement en eau (Fig. 46) repose surtout dans un premier temps sur la récupération des eaux de pluie provenant de la toiture du chalet (280 m²), stockées dans deux citernes situées à proximité : l'une de 45 m³ (C1) et l'autre de 38 m³ (C2). Ces citernes, reliées entre elles par gravité, alimentent trois bassins situés à proximité du chalet (B1, B2 et B3). Ces bassins sont eux-mêmes connectés à trois parcs en contrebas, qu'ils approvisionnent en eau par leur extrémité.

Une bossette est parfois installée par l'amodiatiaire à l'extrémité du parc B1, dont la configuration est relativement allongée (Fig. 45). Cet apport ponctuel d'eau permet de stimuler le déplacement du troupeau vers les zones habituellement peu fréquentées (Humbert, F.-L., 2025, comm. pers.).

Ce dispositif est complété par un étang d'une capacité de 120 m³, partagé avec l'alpage voisin, qui alimente un quatrième bassin situé au nord de l'alpage (B4). Ce dernier assure l'approvisionnement en eau d'un quatrième parc.

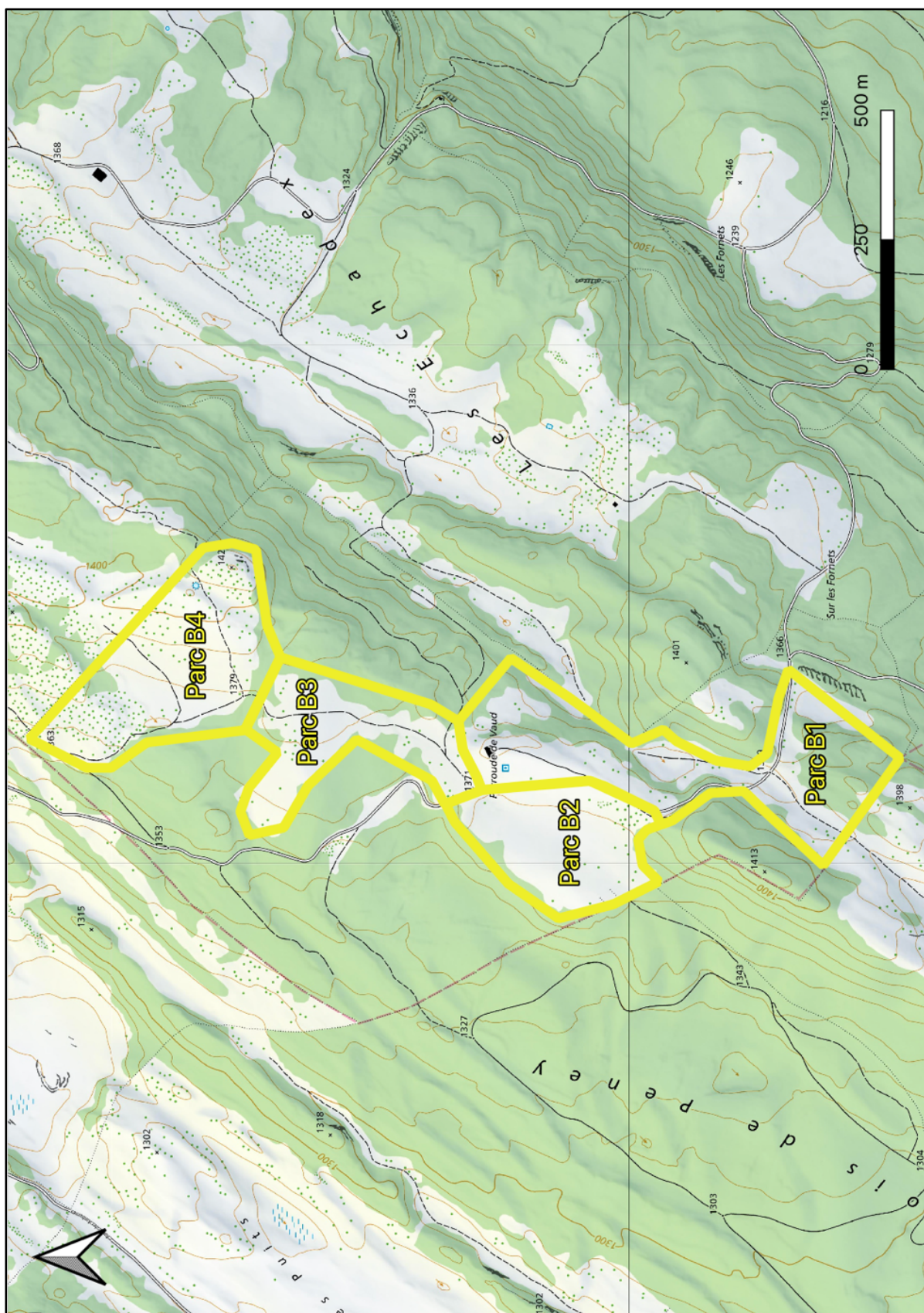


Figure 45. Parcs de l'alpage de la Perroude de Vaud en 2025 (Roulin, 2025)

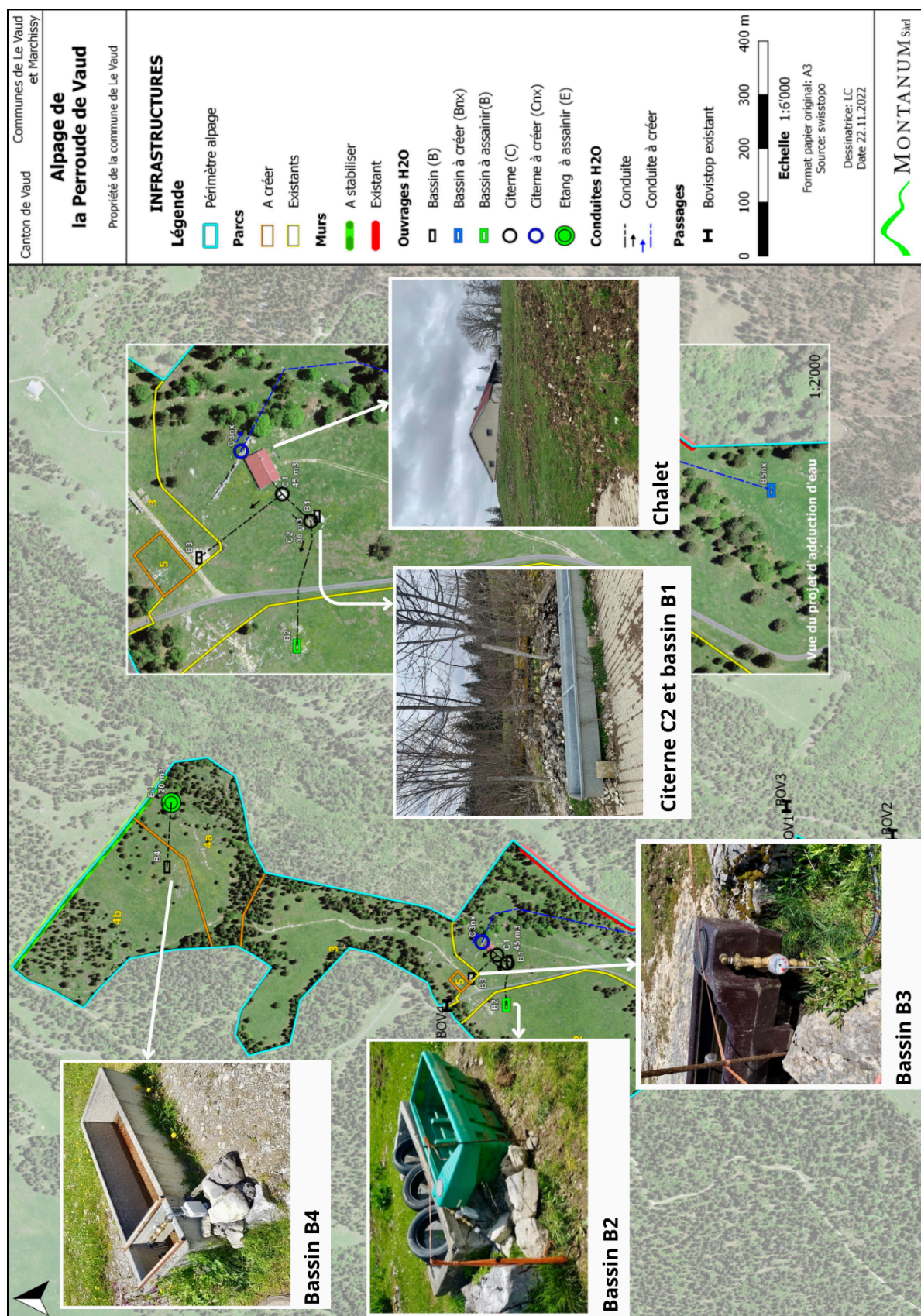


Figure 46. Infrastructures hydrauliques de la Perroude de Vaud (Montanum, 2022, modifié par Lorena Roulin, 2025)

4.2.2 Vulnérabilité de l'approvisionnement en eau

Les infrastructures hydrauliques présentées dans le chapitre précédent illustrent les réponses concrètes apportées aux contraintes environnementales locales. La **vulnérabilité en eau des alpages** constitue en effet un enjeu central, dans un contexte marqué par la raréfaction des ressources hydriques et l'intensification des épisodes de sécheresse. Ce chapitre propose donc d'évaluer cette vulnérabilité à travers une approche combinant la charge en bétail, ainsi que les capacités de stockage en eau propres à chaque alpage.

4.2.2.1 Méthodologie

La vulnérabilité en eau d'un alpage dépend de l'environnement naturel de ce dernier, mais également de la **charge en bétail (PN)** et des **infrastructures hydrauliques** qui vont conditionner la disponibilité de la ressource en eau pour les activités pastorales. Pour estimer cette vulnérabilité, le bureau Montanum (2023) a proposé une estimation de la vulnérabilité structurelle des alpages en termes d'approvisionnement en eau. Cet indice de vulnérabilité se fonde sur la capacité de stockage des infrastructures de l'alpage ainsi que la charge en bétail :

Indice de vulnérabilité : le déficit en eau à la charge utile en m^3/PN .

Ce qui représente le volume d'eau manquant en m^3 divisé par la charge utile de l'alpage en PN (Montanum, 2023).

L'échelle est ensuite la suivante :

- Vulnérabilité **faible** (déficit de moins de $1 m^3/PN$)
- Vulnérabilité **moyenne** (déficit compris entre 1 et $2 m^3/PN$)
- Vulnérabilité **élevée** (déficit de plus de $2 m^3/PN$).

Cet indice est appliqué sur chacun des deux alpages étudiés afin de déterminer leur vulnérabilité structurelle. Il permet ensuite de comparer les alpages entre eux et d'identifier leurs différences en termes de vulnérabilité.

4.2.2.2 Analyse de la vulnérabilité des alpages

Le train d'alpage, incluant **le Bucley et le Pré d'Etoy**, nécessite une quantité d'eau importante, principalement en raison de la présence d'un troupeau de vaches laitières et de la production de Gruyère d'alpage AOP réalisée sur place. Ces besoins élevés exigent la mise en place d'infrastructures adaptées pour stocker l'eau nécessaire pour la saison d'estivage.

Les bilans hydriques des deux alpages - celui du Bucley et celui du Pré d'Etoy - ont été réalisés de manière distincte par le bureau Montanum, afin d'obtenir un suivi spécifique pour chaque alpage. Ces bilans couvrent une période de 70 jours pour le Bucley et de 50 jours pour le Pré d'Etoy, correspondant aux jours de présence effective des vaches dans chacun des alpages. Ces bilans présentent un déficit de **-338 m^3** pour l'alpage du Bucley, pour une charge en bétail

de **45.6 PN**, ainsi de **-199 m³** pour l'alpage du Pré d'Etoy, pour une charge de **46.7 PN** (Tab. 7 et 8).

Le site du Bucley/Pré d'Etoy présente donc une **vulnérabilité élevée (> 2 m³/PN)** en matière d'approvisionnement en eau en cas de sécheresse. En effet, le déficit en eau à la charge utile s'élève à **5.8 m³ par PN**, ce qui représente un indice de vulnérabilité élevée. Ces déficits importants expliquent, par exemple, pourquoi 80 m³ d'eau ont dû être acheminés en 2022 afin de couvrir les besoins en eau durant un été particulièrement sec (Mosimann et al., 2025).

Cependant, pour faire face à ces besoins importants et à un bilan déficitaire, le stock d'eau de l'alpage pourrait être augmenté, notamment en ajoutant d'autres infrastructures de stockage telles que des citernes ou des étangs. De plus, des mesures d'économie et de recyclage de l'eau sont également mises en œuvre au chalet et à la fromagerie (Mosimann et al., 2025).

Tableau 7. Bilan en eau pour l'alpage du Bucley, bilan pour 70 jours de pâture (Montanum, 2023)

Approvisionnement	Toit raccordé [m ²]	Volume [m ³]	Durée des apports [j]	Récup. Estivale [m ³]	Total [m³]
Citerne C1 du chalet	295	40	120	106	146
Citerne C2 du chalet	335	40	120	121	161
Citerne C3	170	40	120	61	101
Étang E1		250			250
Pré d'Etoy (bassin B10)				20	20
Total					678

Besoins	Volume [m ³]	Total [m³]
Bétail (vaches + porcs) ²¹	558	558
Réserve sécheresse	165 80 I/UGB*21 jours	165
Chalet sanitaire	24	24
Traite	14	14
Fabrication	255	255
Total		1016

Bilan	Total [m³]
Apports totaux	678
Besoins totaux	-1016
Total	-338

²¹ Les 60 porcs sont comptabilisés comme suit : 60 animaux à 0,17 UGB chacun, durant 120 jours, avec une consommation d'eau de 20 L par jour et par UGB. Ce bétail est maintenu au chalet du Bucley, où il est nourri à l'engrais.

Tableau 8. Bilan en eau pour l'alpage du Pré d'Etoy, bilan pour 50 jours de pâture (Montanum, 2023)

Approvisionnement	Toit raccordé [m ²]	Volume [m ³]	Durée des apports [j]	Récup. Estivale [m ³]	Total [m ³]
Citerne C1 du chalet	375	50	120	135	185
Étang E1 ²²		120			120
Puit		20		20	40
Total					365

Besoins	Volume [m ³]	Total [m ³]
Bétail	393	393
Réserve sécheresse	148 80 l/UGB*21 jours	148
Chalet sanitaire	10	10
Traite	13	13
Total		564

Bilan	Total [m ³]
Apports totaux	365
Besoins totaux	-564
Total	-199

L'alpage de la Perroude de Vaud nécessite une quantité d'eau moins importante que celui du Bucley/Pré d'Etoy, notamment en raison de la présence d'un troupeau de vaches allaitantes, ce qui implique l'absence de production laitière au chalet d'alpage ainsi que l'absence de personnel résidant durant la période d'estivage.

Le bilan en eau réalisé par le bureau Montanum pour l'alpage de la Perroude de Vaud présente un déficit de **-26 m³** (Tab. 9), pour une charge utile de 24.73 PN. L'alpage de la Perroude de Vaud présente donc une **vulnérabilité moyenne (entre 1 et 2 m³/PN)** face à la sécheresse, avec un déficit en eau à la charge utile s'élevant à **1.1 m³ par PN**.

La vulnérabilité de cet alpage étant moyenne, le charriage de l'eau n'est pas une pratique régulièrement employée. Comme le soulignent Reynard et al. (2024) dans leur étude sur l'alpage, « le charriage d'eau n'a été nécessaire qu'en 2022, pour un volume total assez faible (15 m³) » (Reynard et al., 2024, p. 28).

²² L'étang est partagé avec l'alpage voisin.

Tableau 9. Bilan en eau pour l'alpage de la Perroude de Vaud (Montanum, 2024)

Approvisionnement	Toit raccordé [m ²]	Volume [m ³]	Durée des apports [j]	Récup. Estivale [m ³]	Total [m ³]
Citerne C1	280	45	95	78	123
Citerne C2		38			38
Étang E1 ²³		120			120
Total					281

Besoins	Volume [m ³]	Total [m ³]
Bétail	197	197
Réserve sécheresse	101 80 I/UGB*21 jours	101
Chalet sanitaire	10	10
Total		307

Bilan	rappo 1	Parc 2	Parc 3	Parc 4	Chalet	Réserve sécheresse	Total [m ³]
Apports totaux	56	56	38	120	12	0	281
Besoins totaux	59	60	33	44	10	101	-307
Bilan général	-3	-4	5	76	2	-101	-26

L'évaluation de la vulnérabilité hydrique des alpages, fondée sur l'analyse combinée de la charge en bétail et des capacités de stockage en eau, permet de mieux cerner les **enjeux propres à chaque site** et d'expliquer pourquoi certains alpages sont **plus exposés au stress hydrique**. Cette approche quantitative est essentielle pour identifier les alpages les plus vulnérables au déficit en eau et pour orienter les mesures d'adaptation à privilégier.

L'analyse montre que l'alpage du Bucley/Pré d'Etoy est nettement plus vulnérable aux épisodes de sécheresse, avec un bilan hydrique plus déficitaire et un indice de vulnérabilité supérieur à celui de la Perroude de Vaud. Cette vulnérabilité résulte à la fois de sa **capacité de stockage limitée** et des **choix de gestion liés à l'exploitation et à la production**.

Pour compléter cet indice, l'intégration des dynamiques pastorales constitue un facteur déterminant dans la gestion des ressources en eau, apportant un éclairage complémentaire et enrichissant la compréhension des modalités de gestion.

²³ L'étang est partagé avec l'alpage voisin.

4.3 L'analyse des pratiques pastorales

Ce chapitre constitue le troisième volet des déterminants de la demande en eau dans les alpages (Fig. 15). Il présente les **pratiques pastorales** observées sur les deux sites d'étude, en se concentrant sur plusieurs facteurs clés : **l'utilisation des bâtiments**, **l'exploitation de la surface pâturée**, le **type de bétail** ainsi que la **production de l'exploitation**. Ces éléments sont essentiels pour comprendre comment les modalités d'élevage influencent les besoins en eau des alpages.

La description des infrastructures et des pratiques met en évidence les différences en termes de besoins en eau entre les alpages, et permet de comparer l'alpage du Bucley/Pré d'Etoy - une exploitation nécessitant une grande quantité d'eau en raison du type de bétail, de l'utilisation de ses bâtiments et de son mode de production - avec l'alpage de la Perroude de Vaud, dont les pratiques, l'usage du bâtiment et le type de bétail entraînent une consommation d'eau plus faible durant la saison d'estivage.

4.3.1 Utilisation des bâtiments

Le chalet de **l'alpage du Bucley** (Fig. 47) est habité par deux employés – un fromager et un berger - pendant 5 mois, durant la période d'estivage. Le chalet d'alpage, comprend également une étable pour les soins aux animaux, une fromagerie avec une cuve de 1400 litres, une cave à fromage et une porcherie (Mosimann et al., 2025). Dans la fromagerie, les 140'000 kg de lait annuels sont transformés en Gruyère d'alpage AOP (Mosimann et al., 2025).

Les besoins en eau pour la traite et la fabrication du Gruyère AOP sur l'alpage du Bucley sont estimés à 255 m³ pour la transformation fromagère, soit environ **1,82 litre d'eau par litre de lait** produit selon le bureau Montanum. Ce chiffre dépasse l'estimation moyenne de 1 litre par litre de lait proposée par Sautier (2009) (Tab. 1). Cette différence peut traduire un certain gaspillage, mais elle peut également refléter des méthodes de calcul différentes : Sautier se base probablement sur l'utilisation réelle de l'eau dans le processus de production, tandis que Montanum estime les besoins totaux en intégrant une marge de sécurité pour anticiper les pertes éventuelles, le nettoyage et l'entretien des installations.

L'écart observé met en évidence plusieurs points. D'une part, il souligne la forte dépendance à l'eau pour la production fromagère en alpage, où tout dysfonctionnement pourrait avoir des conséquences directes sur la production et le bien-être du bétail. D'autre part, il reflète les précautions nécessaires pour garantir un approvisionnement fiable et une eau potable dans un contexte montagnard, où l'accès à l'eau peut être limité ou soumis à des aléas. Enfin, il permet d'identifier d'éventuelles sources de pertes, notamment celles liées aux installations.

Ces chiffres illustrent que la gestion de l'eau en alpage ne peut se limiter à une simple estimation théorique des besoins. L'écart entre les valeurs de Sautier et celles de Montanum montre que les conditions de terrain et les pratiques locales influencent fortement la consommation réelle, et que des marges de sécurité sont nécessaires pour prévenir les dysfonctionnements.



Figure 47. Chalet de l'alpage du Bucley (Photos : Lorena Roulin)

Le chalet d'**alpage du Pré d'Etoy** (Fig. 48), contrairement à celui du Bucley, n'est pas occupé durant la période d'estivage et aucune activité de production n'y est réalisée. La consommation en eau y est donc très faible, voire inexistante.



Figure 48. Chalet de l'alpage du Pré d'Etoy (Photos : Lorena Roulin)

Enfin, le chalet de l'**alpage de la Perroude de Vaud**, est occupé de temps en temps en cours de saison par l'exploitant et sa famille (Fig. 49). Le chalet sert également de lieu de stockage pour du matériel, mais plus du tout pour les animaux (Reynard et al., 2024).

L'utilisation de chalet demande une consommation d'eau assez négligeable, qui tourne autour d'une dizaine de mètre cube par saison à l'alpage, selon l'estimation du bureau Montanum. Le bâtiment n'est pas exploité pour des activités touristiques, ni pour de la production laitière ou fromagère. L'eau est donc utilisée uniquement pour des usages occasionnels (Reynard et al., 2024).



Figure 49. Chalet de la Perroude de Vaud (Photos : Montanum ; Lorena Roulin)

4.3.2 Exploitation de la surface pâturée

Sur l'**alpage du Bucley** les sols sont plutôt superficiels, l'eau s'infiltre donc rapidement, entraînant une faible rétention d'eau et des sols relativement secs en surface (Fig. 50). Cependant, le taux de boisement est élevé, malgré le recul important de l'épicéa (Mosimann et al., 2025). La production fourragère reste relativement faible en raison de la forte présence des pelouses maigres.



Figure 50. Aperçu de la végétation de l'alpage du Bucley (Photos : Lorena Roulin)

La charge en bétail potentielle est donc faible et s'élève à 0.6 PN par hectare ; elle correspond à une pratique extensive et en cohérence avec la production herbagère limitée de l'alpage (Mosimann et al., 2025). Cependant, la richesse des milieux présents sur le site traduit une grande biodiversité (Mosimann et al., 2025).

L'alpage du **Bucley/Pré d'Etoy** comptabilise une charge en bétail de 92.3 PN, pour une période d'estive d'environ **120 jours**. La rotation du pâturage est répartie entre les deux alpages : les **8 parcs du Bucley** et les **6 parcs du Pré d'Etoy** (Mosimann et al., 2025) (Fig. 42).

Les changements de parc sont fréquents (entre 1 et 3 jours), notamment en raison de la présence d'un troupeau de vaches laitières, afin d'optimiser la rencontre entre l'herbe et les animaux au bon moment (Mosimann et al., 2025). La présence d'un troupeau de vaches laitières, combinée à la configuration et à la taille de certains parcs, nécessite une rotation rapide entre les différentes zones de pâturage. Une alternance s'opère ainsi entre les parcs de

jour (en vert clair) et les parcs de nuit (en vert foncé), répartis entre l’alpage du Bucley et celui du Pré d’Etoy (Fig. 51). En 2024, les passages se sont organisés en trois périodes de pâturage sur le site du Bucley, contre deux seulement sur celui du Pré d’Etoy (Mosimann et al., 2025).

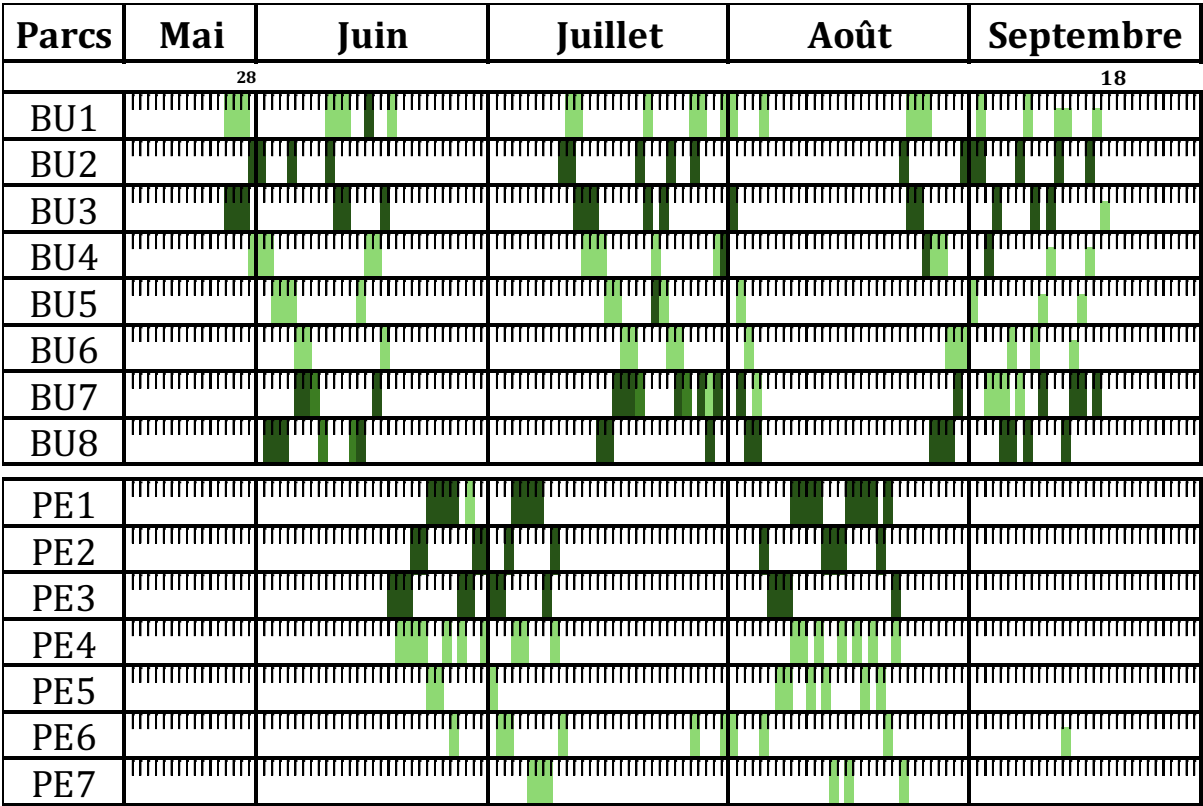


Figure 51. Calendrier de pâture 2024 au Bucley (BU) et au Pré d’Etoy (PE), avec la répartition des parcs de jour (en vert clair) et des parcs de nuit (en vert foncé) (Mosimann et al., 2025)

L’alpage de la Perroude de Vaud, quant à lui, a une charge en bétail de 24.73 PN, avec une période d’estive qui dure environ **130 jours**, de début juin à mi-octobre. Les différents parcs de l’alpage sont très différents en termes de fourrage et de composition de la végétation (Reynard et al., 2024), l’un est très boisé et un autre particulièrement de bonne qualité fourragère, composé de prairies (Fig. 52).



Figure 52. Aperçu de la végétation de l'alpage de la Perroude de Vaud (Photos : Lorena Roulin)

L'alpage de la Perroude de Vaud est divisé en **4 parcs** (Fig. 45) et présente un rapport de 0,5 PN par hectare, ce qui indique qu'une grande partie de l'alpage est composée de forêts et de pâturages boisés au potentiel fourrager limité (Reynard et al., 2024). L'exploitant organise la rotation du bétail entre les différents parcs en fonction de la capacité de régénération du fourrage propre à chacun (Reynard et al., 2024). En 2022, l'amodiatiaire avait laissé le parc 4 en jachère pour favoriser la montée des graines, tandis que l'année suivante, c'est une partie du parc 2 qui avait été laissée au repos.

Au début de la saison d'estivage 2025, les rotations étaient relativement fréquentes, avec un changement de parc environ chaque semaine (Tab. 10). Toutefois, entre le 14 juin et le 18 juillet, le troupeau est resté plus d'un mois dans le parc 4 avant que le cycle de rotation ne reprenne, en commençant par le parc 1. Cette présence prolongée dans le parc 4 résulte de la volonté de pâturer davantage les sous-bois, très présents dans ce secteur, ce qui a permis au fourrage des autres parcs de se régénérer.

Tableau 10. Tournus entre les parcs de la Perroude de Vaud entre fin mai et fin juillet 2025

Parcs	Dates du tournus entre les parcs				
1	24-31 mai				19 juillet-27 juillet
2		01-08 juin			
3			09-13 juin		
4				14 juin-18 juillet	

4.3.3 Type de bétail

Au-delà de la gestion humaine de la pâture et de l'utilisation des bâtiments, le **type de bétail** constitue également un facteur clé influençant la consommation et la demande en eau. Ce chapitre présente ainsi la composition du troupeau présent sur les deux alpages, ainsi que le type d'élevage. Ces éléments ont un impact direct sur la quantité d'eau nécessaire, et conditionnent en partie les besoins hydriques globaux de l'alpage.

Sur **l'alpage du Bucley/Pré d'Etoy**, les besoins en eau pour l'abreuvement du bétail, comprenant à la fois les **vaches laitières** et les **porcs**, sont relativement importants sur l'ensemble de la saison estivale. Le nombre de vaches laitières varie au cours de l'été, entre 60 et 80 têtes de bétail, et une installation de traite mobile est déplacée entre les deux alpages afin de suivre les déplacements du troupeau (Mosimann et al., 2025).

Les vaches présentes sur l'alpage sont majoritairement de **race Red Holstein** (Mosimann et al., 2025) (Fig. 53), une race très présente en Suisse. Les vaches Red Holstein adultes pèsent en moyenne entre 700 et 800 kg et elles sont réputées pour leur capacité à produire de grandes

quantités de lait, avec une moyenne annuelle située entre 7000 et 10 000 litres par lactation, pour une teneur en matière grasse d'environ 4.00 %²⁴.



Figure 53. Le bétail de vaches Red Holstein du Bucley (Photos : Martin Calianno)

En ce qui concerne ses besoins en eau, la Red Holstein, comme les autres races laitières, présente une consommation importante, directement liée à sa production de lait. Une vache laitière en production peut consommer entre 70 et 150 litres d'eau par jour²⁵ (Tab. 1) en fonction des conditions, d'autant plus en période de sécheresse. Ces besoins importants en eau justifient la mise en place d'infrastructures de stockage et de distribution adaptées dans les alpages. L'ensemble de ces caractéristiques fait de la Red Holstein une race performante mais exigeante, qui nécessite une gestion rigoureuse des ressources naturelles.

En complément du troupeau de vaches laitières, 60 porcs pour l'engraissement sont également présents sur l'alpage. Ces animaux consomment en moyenne 4 à 15 litres d'eau par jour²⁶, en fonction de leur poids et de la température ambiante. D'après les estimations de Montanum, utilisées pour calculer les besoins totaux en eau de l'alpage, chaque porc consommerait en moyenne 3,4 litres par jour (ce qui représente, pour l'alpage du Bucley, 24 480 litres pour 120 jours d'estivage). Bien que leur consommation soit faible par rapport aux besoins totaux de l'alpage, elle reste à prendre en compte dans l'organisation et la gestion de l'approvisionnement en eau.

Le cheptel de **l'alpage de la Perroude de Vaud** est principalement constitué de **vaches allaitantes**, auxquelles s'ajoutent quelques vaches à viande, des génisses et quelques chevaux (Reynard et al., 2024). L'effectif total varie au cours de la saison d'estivage, passant d'environ 55 animaux en début de saison à une vingtaine pour le reste de l'été (Humbert, F.-L., 2025, comm. pers.).

²⁴ Swissherdbook. (s. d.). *Holstein / Red Holstein*. Swissherdbook. Consulté le 24 juin 2025, à l'adresse <https://www.swissherdbook.ch/fr/races-du-herd-book/holstein/-red-holstein>

²⁵ GDS Réseau 3M'. (s. d.). *Bovins – Qualité de l'eau – Abreuvement*. Consulté le 24 juin 2025, à l'adresse https://gdsreseau3m.com/?page_id=1373

²⁶ GDS Réseau 3M'. (s. d.). *Porcins – Services d'hygiène – Qualité de l'eau*. Consulté le 24 juin 2025, à l'adresse https://gdsreseau3m.com/?page_id=1621

L'exploitant élève essentiellement des vaches de **race Grises rhétiques** (Fig. 54), une race rustique et adaptée à l'altitude²⁷. Originaires des régions alpines, ces vaches sont particulièrement résistantes aux conditions climatiques difficiles, notamment aux périodes de sécheresse de plus en plus fréquentes (Reynard et al., 2024). Leur capacité à s'adapter à des prairies maigres, peu productives, en fait un choix cohérent dans une logique de gestion extensive des pâturages.



Figure 54. Les vaches Grises rhétiques à la Perroude de Vaud (Photos : Lorena Roulin)

Les vaches allaitantes avec leur veau ont tendance à consommer une quantité d'eau bien plus faible que les vaches laitières, entre 50 et 60 litres d'eau par jour²⁸ (Tab. 1). Par ailleurs, les Grises rhétiques présentent un poids relativement faible, situé entre 350 et 500 kg²⁹, ce qui diminue leur consommation d'eau, limite le tassement des sols et réduit l'impact physique du bétail sur les prairies humides ou fragiles.

L'alpage de la Perroude de Vaud abrite également quatre chevaux, dont la consommation d'eau, bien que relativement modérée, varie entre 20 et 75 litres par jour. Cette variation dépend de plusieurs facteurs, tels que la taille de l'animal, les conditions climatiques ainsi que le niveau d'activité physique fourni³⁰, les chevaux étant ici au repos.

La **composition du troupeau** et le **type d'élevage** pratiqué influencent de manière significative les besoins en eau d'un alpage. Les exemples du Bucley/Pré d'Etoy et de la Perroude de Vaud illustrent deux modèles contrastés : l'un axé sur la **production laitière intensive avec des vaches Red Holstein**, à fortes exigences hydriques ; l'autre fondé sur un **élevage allaitant** plus extensif, mobilisant des **racés rustiques comme la Grise rhétique**, mieux adaptées aux conditions de sécheresse et à des ressources plus limitées. Ces différences soulignent

²⁷ Mutterkuh Schweiz. (s. d.). *Grise rhétique*. Consulté le 24 juin 2025, à l'adresse <https://www.mutterkuh.ch/races-bovines-a-viande/grise-rhetique.html>

²⁸ GDS Réseau 3M'. (s. d.). *Bovins – Qualité de l'eau – Abreuvement*. Consulté le 24 juin 2025, à l'adresse https://gdsreseau3m.com/?page_id=1373

²⁹ Mutterkuh Schweiz. (s. d.). *Grise rhétique*. Consulté le 24 juin 2025, à l'adresse <https://www.mutterkuh.ch/races-bovines-a-viande/grise-rhetique.html>

³⁰ TRM Schweiz. (s. d.). *Wasser in der Nahrung des Pferdes*. Consulté le 24 juin 2025, à l'adresse <https://trm-schweiz.ch/article/knowledges/378?locale=fr>

l'importance de prendre en compte le type de bétail dans l'évaluation des besoins en eau, mais aussi dans la définition des stratégies de gestion pastorale³¹.

4.4 Synthèse

Le chapitre 4 met en lumière **l'interdépendance entre facteurs environnementaux, infrastructures hydrauliques et pratiques pastorales** dans la gestion de l'eau en alpage. À partir des cas du Bucley/Pré d'Etoy et de la Perroude de Vaud, il explore les vulnérabilités et les leviers d'action face à une ressource de plus en plus limitée.

Les caractéristiques géologiques des deux sites, notamment la dominance d'un **sous-sol calcaire et karstique**, conditionnent fortement la disponibilité en eau. Cette configuration géomorphologique limite les capacités de rétention et de stockage naturel de l'eau, accentuant sa rareté, particulièrement en été.

Ce contexte est aggravé par une **tendance climatique au réchauffement** observée depuis les années 1990, avec une hausse moyenne des températures de près de 1,5°C et une augmentation des périodes de sécheresse. Les projections climatiques à l'horizon 2060 confirment cette évolution : hivers plus doux et pluvieux mais moins neigeux, fonte de la neige réduite au printemps, réduisant les potentiels de stockage avant la saison d'estive, étés plus secs, allongeant les périodes de stress hydrique.

Face à cette double contrainte - manque de recharge hivernale et déficit estival -, les infrastructures hydrauliques apparaissent comme des éléments clés. Le deuxième chapitre fait donc **l'analyse des dispositifs existants** (citernes, étangs, puits, bassins) montre que leur configuration influence fortement la **vulnérabilité hydrique** et la résilience de chaque alpage.

Les **pratiques pastorales** constituent le troisième pilier de cette analyse. Elles révèlent que les **choix de gestion** (type de bétail, usage des bâtiments, mode de pâturage) influencent directement la consommation d'eau.

La comparaison entre les alpages du Bucley/Pré d'Etoy et de la Perroude de Vaud met en évidence des **résultats très contrastés**, tant en matière de vulnérabilité hydrique que d'utilisation et de gestion de la ressource en eau. Le tableau 11 illustre cette comparaison en présentant les différences marquées entre les deux alpages, aussi bien au niveau des résultats obtenus que des quantités d'eau nécessaires à leur fonctionnement.

³¹ Ce travail n'aborde pas directement les questions de gestion pastorale en période de crise liée à la sécheresse. Pour une analyse approfondie de la gestion pastorale en temps de crise et en période de sécheresse, voir Reynard et al. (2024) pour l'alpage de la Perroude de Vaud et Mosimann et al. (2025) pour l'alpage du Bucley.

Tableau 11. Comparaison de la vulnérabilité hydrique et de la gestion pastorale entre les alpages du Bucley/Pré d'Etoy et de la Perroude de Vaud.

Critère	Bucley / Pré d'Etoy	Perroude de Vaud
Demande hydrique	Très élevée (1016 m ³ au Bucley et 564 m ³ au Pré d'Etoy)	Modérée (307 m ³)
Production	Vaches laitières, porcs	Vaches allaitantes, chevaux
Volume stocké en eau	Insuffisant par rapport aux besoins (-338 m ³ au Bucley et - 199 m ³ au Pré d'Etoy)	Plus équilibré par rapport aux besoins (-26 m ³)
Vulnérabilité hydrique	Élevée	Faible
Pratiques pastorales	Occupation humaine constante, transformation sur place	Peu d'activités sur le site
Résilience face au déficit hivernal et estival	Faible, infrastructure hydraulique insuffisante	Plus élevée, meilleure adéquation besoins / ressources

Ainsi, cette analyse met en évidence que seule **une approche intégrée**, croisant contraintes environnementales, dispositifs techniques et décisions humaines, permet de comprendre les dynamiques hydriques en alpage. Dans cette continuité, le chapitre suivant propose une méthodologie de suivi de la consommation d'eau en alpage, afin de mieux appréhender les usages réels et d'éclairer les décisions futures.

5. Proposition de suivi de la consommation d'eau du bétail

Ce chapitre présente le deuxième objectif de ce travail, qui consiste à proposer un **dispositif méthodologique permettant de suivre la consommation en eau** dans les alpages, en se concentrant particulièrement sur le bétail, et en tenant compte de différents facteurs déterminants tels que les conditions climatiques, les infrastructures hydrauliques et les pratiques pastorales.

La démarche proposée s'inscrit dans une **double échelle de lecture**. D'une part, elle présente une **méthodologie reproductible** pour la mise en place d'un dispositif de suivi de la consommation d'eau dans les alpages. D'autre part, elle s'appuie sur **deux cas concrets** - ceux du Bucley/Pré d'Etoy et de la Perroude de Vaud - qui permettent d'illustrer et de renforcer la pertinence de cette proposition méthodologique. Ces deux exemples apportent un contenu empirique essentiel pour tester et affiner le protocole, tout en mettant en lumière la diversité des situations rencontrées sur le terrain.

Ce chapitre présente d'abord la proposition de suivi conçue initialement pour l'alpage du Bucley/Pré d'Etoy, puis détaille la mise en œuvre du dispositif sur l'alpage de la Perroude de Vaud, où les données ont été collectées entre fin mai et mi-juillet 2025. Suite au retrait du site initial du Bucley/Pré d'Etoy, ce nouvel alpage a permis d'assurer une continuité dans la démarche, tout en offrant un cadre particulièrement propice au suivi : bassins clairement distincts, accès technique facilité et collaboration étroite avec l'exploitant. L'alpage de la Perroude de Vaud ne disposant de données que sur la consommation liée au bétail, la méthodologie mise en place se concentre principalement sur cet usage.

Les différentes **étapes du protocole** sont présentées dans les sections suivantes, depuis le choix de l'alpage et l'installation du matériel jusqu'à la récolte et l'analyse des données. Ce chapitre propose ainsi une méthodologie transférable, articulant conditions climatiques, pratiques agricoles et consommation hydrique dans les contextes d'estivage.

5.1 Éléments de contexte et planning général

Un certain nombre de données sont nécessaires à la mise en place de ce dispositif de suivi qui a pour but de pouvoir quantifier la quantité d'eau consommée par le bétail en conditions d'alpage. Le point de départ de cette réflexion s'appuie sur le travail de Cardot et al. (2008), qui proposent une équation permettant d'**estimer théoriquement la consommation en eau du bétail**, en intégrant divers facteurs liés aux conditions environnementales, à l'exploitation et au type de fourrage. Cette équation permet d'estimer la **consommation en eau d'une vache laitière**, prise comme référence pour représenter la consommation d'un UGB. Toutefois, cette équation a été développée pour une consommation en milieu contrôlé, ce qui limite son application directe en conditions d'alpage. Cette formule est la suivante :

Eau consommée : $1,54 \times \text{MSI} + 1,33 \times \text{PL} + 0,89 \times \text{MS} \% + 0,57 \times \text{Tmin} - 0,3 \times \text{Pluv} - 26.65$

- **MSI** : Matière sèche ingérée (kg/jour)
- **PL** : Production de lait (kg/jour)
- **MS%** : Pourcentage de matière sèche dans l'alimentation
- **Tmin** : Température minimale (°C)
- **Pluv** : Pluviométrie (mm)

Les données relatives à la matière sèche ingérée et à la production laitière peuvent être issues de la littérature scientifique ou fournies directement par les amodiataires, car ces variables varient peu entre un environnement contrôlé et un contexte d'alpage. En revanche, d'autres paramètres comme le taux de matière sèche du fourrage, les températures minimales ou encore les précipitations sont **fortement influencées par les conditions locales**. Ces données doivent donc être recueillies directement sur l'alpage ou auprès d'une station météorologique située à proximité de l'alpage, afin de refléter au mieux la réalité du terrain.

La mise en place du protocole de suivi proposé dans ce travail permet d'observer, de manière empirique, comment ces différents facteurs influencent la consommation d'eau du bétail dans des conditions réelles d'estivage. Toutefois, il est important de souligner que la réalisation d'un tel suivi en alpage présente des défis spécifiques, notamment en comparaison avec les environnements agricoles contrôlés comme les étables. Dans les étables, les conditions sont beaucoup plus stables, contrairement à celles que l'on trouve en alpage, milieu ouvert soumis à d'importantes variations naturelles et humaines, ce qui complique la précision et la régularité des mesures. Le tableau 12 illustre les principales différences entre ces deux milieux.

Tableau 12. Comparaison entre les suivis de la consommation en étable et en alpage

Critères	Étable / Environnement contrôlé	Alpage
Points d'eau	Fixes et centralisés	Multiples et parfois temporaires
Comptage de l'eau	Un seul compteur généralement suffisant	Plusieurs compteurs nécessaires
Suivi de l'alimentation	Ration connue mais non mesurée avec précision	Pâturage libre, fourrage variable
Présence humaine	Surveillance fréquente	Présence variable
Variabilité des conditions	Faible	Forte (climat, topographie, pratiques)
Installation du matériel	Relativement simple, stable et dépendante de la collaboration avec l'exploitant	Complexe et dépendante de la collaboration avec les exploitants
Fiabilité des données	Relativement élevée	Plus variable, influencée par de nombreux facteurs

La mise en place d’un protocole de suivi en alpage permet donc de suivre la consommation en eau du bétail, tout en analysant l’influence des différents facteurs environnementaux et pastoraux sur cette consommation. Ce suivi constitue un outil essentiel non seulement pour améliorer la gestion des ressources en eau en contexte d’estivage, mais aussi pour affiner l’estimation des besoins réels du bétail et compléter les résultats issus de formules prédictives telles que celle de Cardot et al. (2008), particulièrement face aux défis du changement climatique.

La collecte des données s’est déroulée sur l’alpage de la Perroude de Vaud entre fin mai et mi-juillet 2025 (entre le 24 mai et le 18 juillet), soit sur une durée d’environ deux mois³². Plusieurs visites régulières sur le terrain ont eu lieu afin de procéder au téléchargement des données enregistrées (Tab. 13), de contrôler le bon fonctionnement du matériel ainsi que de prélever des échantillons de fourrage.

Tableau 13. Agenda de récolte des données de fin mai à mi-juillet 2025

23.05.2025	24.05.2025	31.05.2025	11.06.2025	20.06.2025	26.06.2025	18.07.2025
Installation du matériel	Montée du bétail	Récolte des données	Récolte des données	Récolte des données	Récolte des données	Récolte des données

Cette organisation a permis de réaliser des relevés réguliers couvrant environ la moitié de la période de présence du bétail sur l’alpage. Le calendrier de suivi a été établi de manière à coïncider avec les déplacements des troupeaux, notamment lors des changements de parc. En pratique, les données relatives à la consommation d’eau et au fourrage ont été collectées à intervalles d’environ une à deux semaines. À chaque session de relevé, l’enregistreur de données installé dans le parc quitté par les animaux était récupéré, et un échantillon de fourrage était prélevé dans ce même parc.

5.2 Conditions de mise en place d’un protocole de suivi

Le développement de ce travail, ainsi que les ajustements réalisés face aux difficultés rencontrées sur le terrain, ont permis d’identifier un ensemble de conditions et d’étapes clés à réunir pour assurer la mise en œuvre réussie d’un dispositif de suivi en alpage. Ces éléments sont présentés à la figure 55 et développés dans le présent chapitre.

³² Dans le cadre du projet Alp’eau, les mesures de suivi de la consommation d’eau se poursuivent jusqu’à la fin de la saison d’estivage (mi-octobre environ). Toutefois, l’analyse présentée dans ce travail se limite aux données des deux premiers mois de suivi, en raison des contraintes liées au calendrier académique.

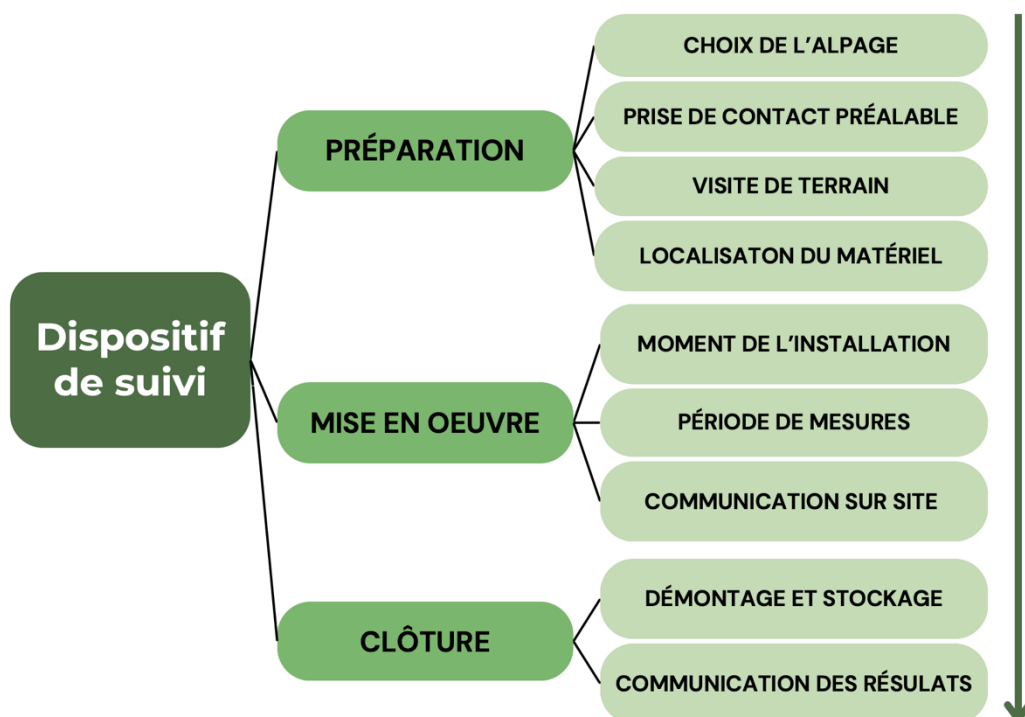


Figure 55. Étapes importantes de la mise en œuvre du dispositif de suivi en alpage (Roulin, 2025)

Tout d'abord, **le choix de l'alpage** constitue une étape déterminante. La mise en place du protocole de suivi nécessite la sélection préalable de sites adaptés. Pour cela, il est pertinent de choisir des alpages présentant des modes de production variés, par exemple certains orientés vers l'élevage laitier, d'autres vers l'élevage allaitant. Cette diversité permet de comparer les consommations en eau selon le type d'exploitation, en partant de l'hypothèse qu'un système moins gourmand en eau pourrait représenter une stratégie d'adaptation face aux effets du changement climatique.

En parallèle, des critères logistiques doivent également être pris en compte : l'idéal est de sélectionner des alpages où le suivi est techniquement réalisable, c'est-à-dire où les déplacements du bétail peuvent être facilement suivis, avec un nombre limité de parcs et de rotations. Un système trop complexe, avec une multiplication des points de distribution d'eau ou des déplacements fréquents et dispersés du cheptel, rendrait le suivi difficile à assurer de manière fiable.

Dans le cadre du projet initial Alp'eau, deux alpages avaient été choisis : le Bucley/Pré d'Etoy, orienté vers l'élevage laitier, et la Perroude de Vaud, dédié à l'élevage allaitant. Ces deux sites illustrent deux systèmes complémentaires, offrant un cadre pertinent pour analyser les variations de la consommation d'eau selon les pratiques. Toutefois, l'alpage du Bucley/Pré d'Etoy présentait une configuration particulièrement complexe, avec de nombreux parcs, des rotations fréquentes du bétail et un système hydraulique complexe, rendant le suivi logistique difficile à mettre en œuvre.

À l'inverse, l'alpage de la Perroude de Vaud se caractérise par une organisation plus simple, avec moins de parcs et de points d'eau, et des déplacements du bétail plus limités, facilitant

considérablement la mise en place du suivi. Cette expérience suggère que, pour de futurs projets, la complexité des infrastructures hydrauliques devrait constituer l'un des critères prioritaires dans le choix des sites, afin d'assurer la faisabilité logistique et la qualité des données collectées.

Une fois le ou les sites identifiés, il est crucial d'établir une **prise de contact claire et anticipée avec les acteurs concernés** - qu'il s'agisse du propriétaire de l'alpage (commune) et de l'exploitant. Ces échanges permettent d'officialiser les démarches par des demandes d'autorisation formelles et de légitimer la présence des chercheurs et du matériel sur place. Un contact établi bien à l'avance permet également d'éviter d'éventuelles tensions au moment de l'installation.

Le contact avec la commune de Le Vaud, propriétaire de l'alpage, a été établi via un courrier officiel de l'Université de Lausanne, responsable du projet Alp'eau, adressé à la commune, qui a ensuite approuvé le projet lors d'une séance de municipalité. Suite à cette approbation, un contact a été pris avec l'amodiatiaire pour planifier les visites sur le terrain et l'installation du matériel. Pour l'alpage du Bucley/Pré d'Etoy, le suivi n'a finalement pas pu être réalisé notamment en raison d'un manque de communication de la part de l'Université de Lausanne.

Dans un second temps, une **visite de terrain** s'impose. Celle-ci permet d'évaluer la faisabilité technique de l'installation du matériel - compteurs d'eau, enregistreurs de données et éventuellement station météo - et d'identifier les points de mesure pertinents. Elle constitue aussi une occasion de mesurer le degré d'engagement de l'exploitant dans le projet, élément déterminant pour le bon déroulement du suivi.

Dans le cas de la Perroude de Vaud, cette première visite a permis de repérer les différents bassins et aménagements hydrauliques, ainsi que d'anticiper les possibilités d'intégration du matériel. Elle a également donné lieu à un échange avec l'exploitant, qui nous a accompagnés pour un tour complet des installations, facilitant la compréhension du fonctionnement du système d'abreuvement. À la suite de cette reconnaissance, le matériel manquant a pu être commandé pour compléter l'équipement nécessaire à la mise en place du protocole.

Ensuite, la **collaboration avec l'amodiatiaire** est une condition indispensable au succès du projet. Il doit non seulement accepter le dispositif, mais également être informé des objectifs, des modalités de suivi et du rôle qu'il peut jouer. Sa connaissance fine du terrain est précieuse : elle permet d'identifier les emplacements les plus appropriés pour l'installation du matériel et de signaler tout changement dans l'organisation de l'alpage, évitant ainsi des erreurs d'interprétation dans l'analyse des données.

Dans le cas de la Perroude de Vaud, l'amodiatiaire a activement contribué au suivi en nous transmettant dès le début de la saison la composition du cheptel, puis en nous informant systématiquement de tout changement. Il nous a également contactés à chaque déplacement du troupeau entre les parcs, ce qui a permis une récolte des données précise et adaptée au rythme de la pâture.

Ensuite, la **localisation du matériel** doit être pensée de manière stratégique et bien en amont de l'installation. Pour un suivi fiable, il est recommandé d'équiper chaque point d'eau - notamment les bassins - avec un compteur individuel. Cela permet d'éviter les erreurs lors des relevés, en particulier dans les systèmes où le bétail se déplace fréquemment d'un parc à l'autre pour la traite ou le pâturage. En équipant directement tous les points de distribution, les mesures deviennent plus précises, fiables et représentatives. De plus, l'utilisation de tuyaux de jardinage flexibles, notamment à proximité des bassins en plastique, permet de réduire la tension exercée lorsque le bétail boit, ce qui contribue à éviter toute rupture du dispositif.

Lors de l'installation du matériel sur l'alpage du Bucley/Pré d'Etoy, qui a ensuite été démonté, nous avons constaté que, d'un point de vue technique, les compteurs d'eau fonctionnent de manière plus stable lorsqu'ils sont placés à proximité immédiate des bassins, où la pression hydraulique est suffisante. En revanche, les installations situées en amont - par exemple à la sortie d'un étang ou d'une citerne - présentent souvent une pression trop faible et sont plus sujettes au bouchage³³, ce qui affecte la fiabilité des mesures et peut compromettre l'approvisionnement en eau de l'alpage et du bétail, générant ainsi des tensions avec l'exploitant. Lors de l'installation à la Perroude de Vaud, ce retour d'expérience a été autant que possible pris en compte afin d'optimiser la mise en place du dispositif.

Par la suite, le **choix du moment de l'installation** est également stratégique. Le début de la saison d'estivage représente une période chargée pour les exploitants : montée du bétail, ouverture des infrastructures, gestion d'imprévus liés à la météo ou à l'état des pâturages. Il est donc essentiel de planifier l'installation en fonction de leur disponibilité, et si possible de procéder avec leur collaboration active. Cela facilite grandement l'identification des points de raccordement, réduit les risques techniques lors de la mise en eau du réseau et favorise une meilleure appropriation du dispositif par les utilisateurs.

Au Bucley/Pré d'Etoy, l'installation a été réalisée sans la présence active de l'exploitant, ce qui a posé plusieurs difficultés techniques et organisationnelles. En revanche, à la Perroude de Vaud, l'installation ainsi que la mise en eau de certains bassins a été effectuée en grande partie en collaboration avec l'exploitant, ce qui a grandement facilité le processus. Sa connaissance fine du terrain a permis d'identifier plus rapidement les points de raccordement et d'anticiper au mieux certains problèmes potentiels.

Entre l'installation et le démontage du matériel, la **période de mesures et de récolte des données** constitue la phase centrale du suivi. Elle implique un contrôle régulier des installations pour garantir le bon fonctionnement des enregistreurs et la fiabilité des données collectées. Dans certains contextes, il serait possible de mettre en place des relevés automatiques à distance, mais cette option n'a pas été utilisée ici, notamment en raison de problèmes potentiels liés à la couverture réseau. La décharge manuelle, réalisée directement

³³ C'est souvent le cas dans les étangs, où des dépôts se sont accumulés au fond. Cette situation de bouchage n'est pas observée à la sortie des citernes. Comme les étangs sont principalement présents sur les alpages du Jura, ce problème de bouchage ne devrait pas se répéter sur d'autres alpages dépourvus d'étangs.

sur le terrain par l'exploitant ou le chercheur, a donc été privilégiée pour la récupération des données, bien que la relève des compteurs ait été automatique grâce aux enregistreurs de données enregistrant les mesures en continu. Parallèlement, des données relatives à l'exploitation de l'alpage ont été récoltées afin de contextualiser la consommation d'eau. Enfin, le relevé des données météorologiques a été essentiel pour interpréter les variations de consommation et relier les mesures aux conditions climatiques locales. Cette organisation permet ainsi de combiner à la fois précision, régularité et contextualisation des données collectées.

Dans une optique de transparence et de sensibilisation, une **communication continue et adaptée** tout au long du projet est essentielle, notamment avec les acteurs présents sur le terrain. Sur le site de la Perroude de Vaud, un panneau informatif (annexe IV) a été installé à la sortie d'un des parcs traversés par un chemin pédestre afin d'informer les randonneurs de l'existence du projet, de son objectif principal et des éléments clés nécessaires à sa compréhension. Ce support mentionne également un contact pour toute question éventuelle. Cette démarche permet de sensibiliser le grand public à la problématique de l'eau en alpage, tout en valorisant la recherche appliquée et les efforts déployés sur le terrain.

Enfin, une fois les données du protocole de suivi récoltées et la saison d'alpage terminée, il est important de prévoir le **démontage des installations** à la fin de la saison. Les équipements doivent être mis hors gel et stockés dans des conditions optimales, afin de garantir leur bon fonctionnement pour les années suivantes. Bien que souvent négligée, cette étape s'avère pourtant essentielle pour assurer la durabilité du dispositif de suivi dans le temps.

Par ailleurs, il est tout aussi crucial de prévoir une **communication claire et synthétique des résultats** auprès des propriétaires et des amodiataires des alpages concernés. Ces acteurs de terrain jouent un rôle central dans la gestion des ressources, et leur implication dans le processus de recherche mérite d'être reconnue. Il est important qu'ils reçoivent un retour sur ce à quoi ils ont contribué, que ce soit sous forme de synthèse écrite, de rencontre ou de présentation. Dans le cas de la Perroude de Vaud, l'amodiataire a eu accès aux données recueillies et aux rapports finaux rédigés dans le cadre de ce projet, ce qui a renforcé la transparence et la collaboration entre les parties.

L'ensemble de ces éléments s'est révélé fondamental pour garantir à la fois la **qualité des données récoltées** et le **bon déroulement des opérations sur le terrain**. Ils constituent une base méthodologique précieuse pour la reproduction de ce type de suivi dans d'autres alpages. Cette liste de critères n'est toutefois pas exhaustive : elle a été établie à partir des difficultés rencontrées au cours de ce travail, et d'autres types de contraintes peuvent émerger dans des contextes différents. Même si ces recommandations sont suivies, elles ne garantissent pas un déroulement parfait du protocole, qui reste soumis à divers aléas liés au terrain et aux conditions spécifiques de chaque alpage.

5.3 Données du dispositif de suivi

Ce chapitre présente les différentes données nécessaires au protocole de suivi mis en place sur les alpages étudiés. Il inclut les **données météorologiques** collectées (telles que les précipitations et les températures), le calcul du **pourcentage de matière sèche**, les mesures **de consommation d'eau du bétail** et les **informations pastorales** relatives à la gestion du troupeau et du pâturage. L'ensemble de ces données constitue une base essentielle pour comprendre les dynamiques hydriques en alpage et évaluer les besoins en eau dans leur contexte environnemental et agricole.

5.3.1 Données météorologiques

Les premières données nécessaires à ce protocole de suivi sont les **données météorologiques**. Ces dernières sont particulièrement importantes car elles permettent de corréliser la consommation du bétail avec les variables de températures et de précipitations tout au long de la saison d'estivage. Ces données doivent donc pouvoir être récoltées régulièrement tout au long de la saison. Pour cela, une station météorologique appartenant à Agroscope a été utilisée : la **station des Amburnex** (Tab. 3 ; Fig. 56).

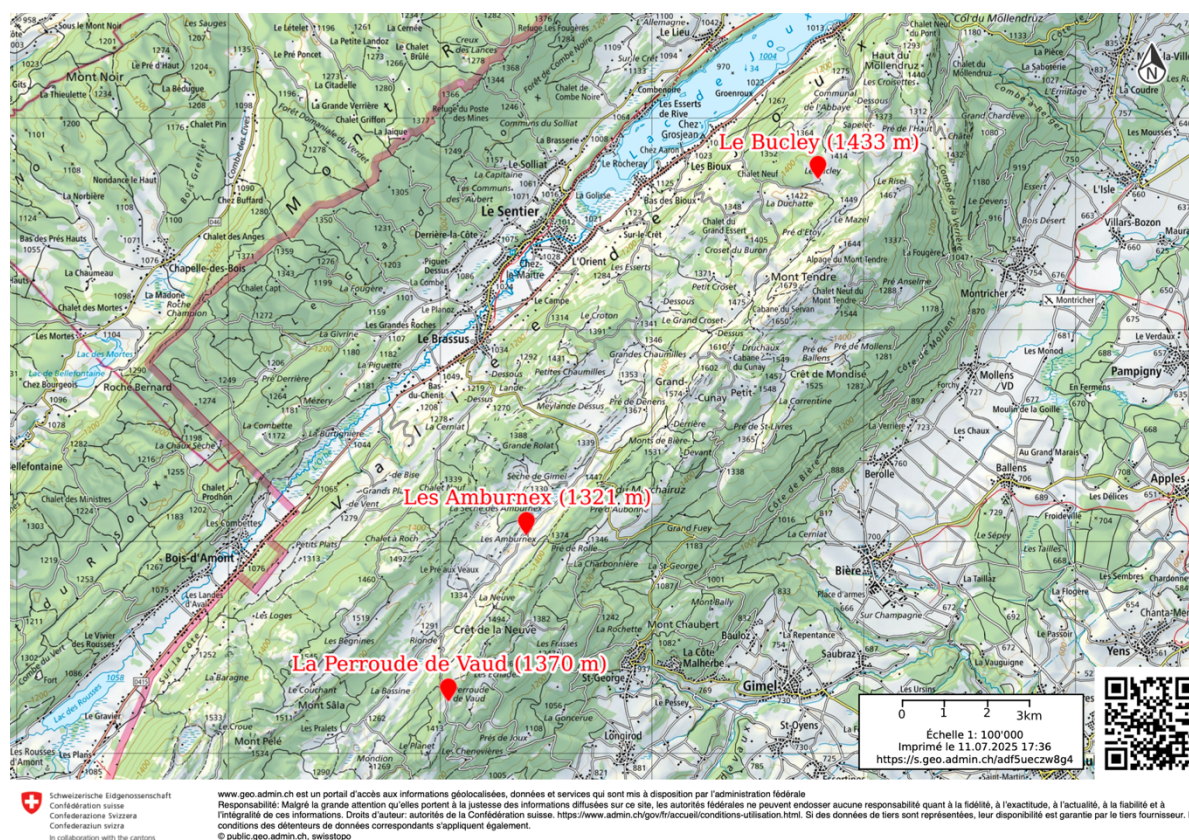


Figure 56. Station des Amburnex utilisées pour la récolte des données météorologiques (Source : Swisstopo, 2025)

Cette station se situe sur la commune de Le Vaud à une altitude de 1321 mètres d'altitude et est considérée comme **représentative des conditions climatiques des deux alpages étudiés**, dont les altitudes sont proches (Fig. 56). Les données de cette station sont en libre accès et disponibles en temps réel sur le site d'Agrométéo³⁴, ce qui permet une exploitation rapide pour l'analyse. Elles peuvent être récupérées sous forme de tableau csv afin d'être ensuite traitées et analysées sur un logiciel comme Excel.

Concernant les **données de température**, les températures minimales, maximales et moyennes quotidiennes ont été récupérées. Les températures minimales sont nécessaires à la réalisation de l'équation de Cardot et al. (2008), tandis que les températures moyennes et maximales permettent de mettre en corrélation les données de consommation avec la température. Ces différentes températures sont intéressantes, car elles fournissent des informations complémentaires pour l'analyse des corrélations dans les résultats finaux.

Les **données de précipitations** correspondent au total journalier des précipitations dans la zone. Cette valeur quotidienne permet d'obtenir une quantité globale de pluie tombée sur la journée, ce qui facilite la mise en lien avec la consommation d'eau du bétail pour le jour concerné.

5.3.2 Données fourragères

La **teneur en matière sèche du fourrage** constitue une donnée essentielle pour suivre et comprendre la consommation d'eau du bétail, et elle est nécessaire pour l'application de la formule de Cardot et al. (2008). En effet, un plus grand pourcentage en matière sèche va directement engendrer une augmentation de la consommation en eau par le bétail (Ouarfli et Chehma, 2014 ; SFEA, cours 2023). Dans ce contexte, un relevé régulier de l'herbe doit être réalisé afin de mesurer son pourcentage de matière sèche.

Dans le cadre de ce travail, la collecte des données a été effectuée environ toutes les deux semaines sur l'alpage de la Perroude de Vaud. Idéalement, une mesure journalière de ce paramètre aurait permis une analyse plus précise de l'influence de ce facteur sur la consommation en eau. Toutefois, pour des raisons logistiques et techniques, un relevé toutes les deux semaines a été retenu, ce qui constitue un compromis entre la précision souhaitée et les contraintes de terrain (temps, déplacement).

À chaque mesure, plusieurs échantillons représentatifs du couvert herbacé ont été prélevés à différents endroits du parc, en fonction de l'observation des conditions du fourrage (zones d'herbage sec ou plus humide). Cette approche permet de refléter au mieux la diversité de la végétation pâturée et d'estimer la qualité et la teneur en matière sèche du fourrage disponible pour le bétail. Ensuite, l'échantillon est d'abord pesé frais, à l'aide d'une balance. Il est ensuite séché au micro-ondes, en plusieurs fois à puissance moyenne, en veillant à ne pas brûler l'herbe. L'opération est répétée jusqu'à ce que le poids mesuré soit constant, signe que toute

³⁴ Agrometeo. (s. d.). Agrometeo. Dernière consultation le 13 août 2025, à l'adresse <https://www.agrometeo.ch>

l'humidité a été évaporée. Le poids sec est alors mesuré. Le pourcentage de matière sèche (MS) est ensuite calculé selon la formule suivante :

$$\text{MS (\%)} = (\text{Poids sec} / \text{Poids humide}) \times 100$$

Cette mesure permet de mieux comprendre les besoins en eau du bétail en fonction de la composition et de l'humidité contenue dans le fourrage consommé, en complément des autres suivis mis en place sur l'alpage. Afin de mettre en relation la matière sèche du fourrage avec la consommation effective d'eau, un suivi précis de cette dernière a été mis en place, présenté dans la section suivante.

5.3.3 Données empiriques de la consommation en eau

Le **suivi de la consommation d'eau** a été mis en œuvre sur l'alpage de la Perroude de Vaud. Ce dispositif avait pour objectif de quantifier les volumes d'eau mobilisés pour l'abreuvement du bétail. Ces données permettent d'estimer la consommation quotidienne et cumulée sur la période d'estivage, en lien avec les pratiques d'exploitation et les conditions climatiques. La mise en place du dispositif de suivi a nécessité un travail préparatoire important, notamment pour le choix et la localisation du matériel. Plusieurs échanges ont eu lieu afin de sélectionner les équipements adaptés aux contraintes de terrain : fiabilité des mesures, autonomie, facilité d'installation et coûts (annexe V). Ce processus a abouti à l'achat et à l'installation de compteurs d'eau et d'enregistreurs de données sur trois bassins distincts sur l'alpage de la Perroude de Vaud.

5.3.3.1 Matériel

Cette section décrit le **matériel** qui a été sélectionné, commandé et installé sur l'alpage du Bucley/Pré d'Etoy - puis démonté par la suite - ainsi que celui installé et mis en service sur l'alpage de la Perroude de Vaud. Ce dispositif a permis de mettre en œuvre le suivi de la consommation d'eau sur le site, en se concentrant plus particulièrement sur celle du bétail, l'alpage de la Perroude de Vaud ne présentant pas de consommation au niveau du chalet d'alpage.

Compteurs d'eau

Les compteurs d'eau sont nécessaires afin de quantifier la consommation d'eau sur l'alpage. Ces instruments permettent de réaliser des mesures volumétriques sur le terrain, offrant une estimation concrète des volumes d'eau utilisés au cours de la saison.

Les **compteurs manuels** sélectionnés³⁵ pour ce travail de suivi sont capables de mesurer des volumes d'eau, qu'elle soit chaude ou froide (Fig. 57). Ils peuvent être installés aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur et offrent une précision de mesure au litre près. Ces compteurs

³⁵ Maddalena. (2022). *Compteurs manuels* [Brochure PDF]. Consulté le 18 février 2025, à l'adresse https://cdn.store-factory.com/www.compteur-energie.com/media/Maddalena-CD-ONE-TRP-2022_compteur-energie_com.pdf

manuels nécessitent un relevé régulier à la main. Ce type de compteur a été sélectionné uniquement au chalet de l'alpage du Bucley, dans le cadre de la première phase du projet.



Figure 57. Compteur d'eau manuel utilisé au chalet du Bucley (Photos : Lorena Roulin ; Maddalena)

Les **compteurs d'eau froide à impulsion**³⁶ sont des dispositifs compacts, faciles à installer sur une conduite existante, permettant d'ajouter un système de comptage sans modification majeure de l'infrastructure. Équipés d'un émetteur d'impulsions de type ampoule reed (ILST) et d'un cadran orientable à 360°, ils sont conçus pour mesurer le volume d'eau froide jusqu'à une température maximale de 30 °C (Fig. 58).

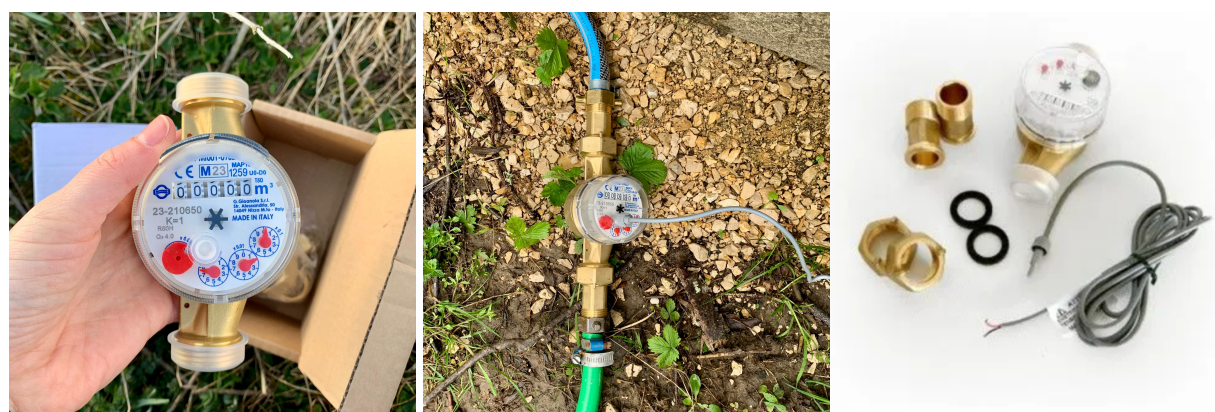


Figure 58. Compteur d'eau à impulsion utilisé sur les alpages du Bucley/Pré d'Etoy et de la Perroude de Vaud (Photos : Lorena Roulin ; Swiss Domotique)

Leur sortie d'impulsion permet de les connecter directement à un enregistreur de données, ce qui facilite la comptabilisation précise et l'enregistrement automatique du débit d'eau s'écoulant à travers le dispositif. Cette technologie permet ainsi un suivi efficace et continu de la consommation d'eau, sans nécessiter d'intervention manuelle fréquente. Ces compteurs à impulsion, couplés à des enregistreurs de données, ont été privilégiés pour le protocole de suivi mis en place sur l'alpage de la Perroude de Vaud, en raison de leur autonomie et de leur capacité à enregistrer les volumes d'eau consommés à intervalles réguliers, même dans des conditions de terrain isolées.

³⁶Swiss Domotique. (s. d.). *Gianola, compteurs d'eau froide à impulsion*. Consulté le 18 février 2025, à l'adresse <https://shop.swiss-domotique.ch/fr/accessoires/981-gioanola-compteur-d-eau-froide-a-impulsion.html>

Enregistreurs de données

Reliés aux compteurs à impulsion les **enregistreurs de données** permettent d'enregistrer à intervalles réguliers la consommation d'eau mesurée par les compteurs (Fig. 59). Ils peuvent donc être reliés à un - ou plusieurs - compteurs d'eau afin de collecter et stocker les données relevées aux divers emplacements de l'alpage. Cet enregistreur de données³⁷, de la marque HOBO, est une micro-station qui est conçue pour résister aux intempéries et est idéal pour suivre le débit d'eau. Il peut également enregistrer d'autres types de données, comme des variables climatiques (par exemple reliées à un thermomètre ou un pluviomètre) ou l'humidité du sol, ce qui offre des possibilités de suivi étendues, même si ces fonctions n'ont pas été utilisées dans notre cas.

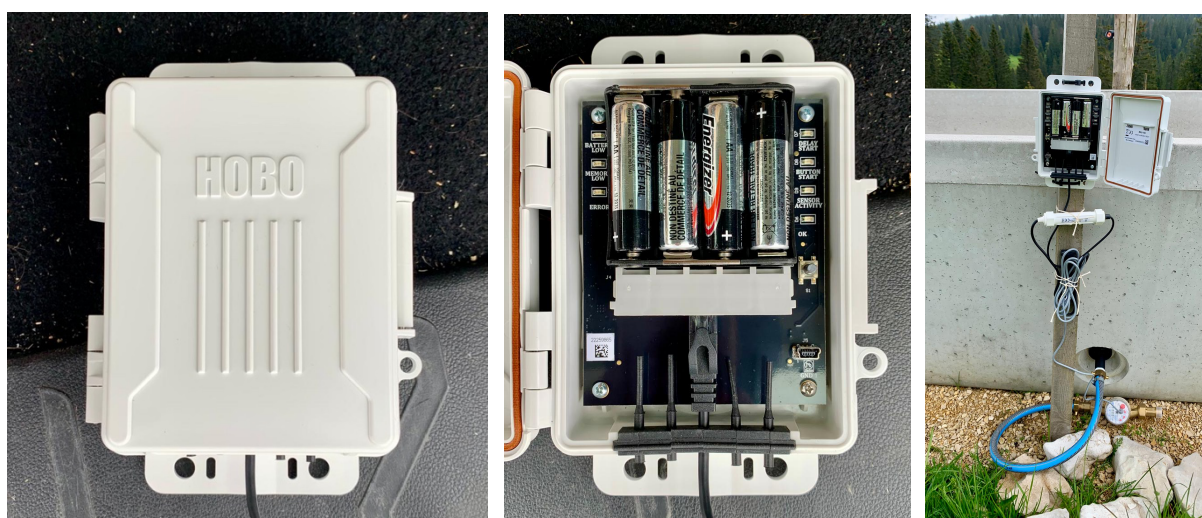


Figure 59. Enregistreurs de données choisis pour le suivi sur les alpages du Bucley/Pré d'Etoy et de la Perroude de Vaud (Photos : Lorena Roulin)

La récolte des données enregistrées par les enregistreurs de données s'effectue à l'aide du logiciel HOBOWare, développé par Onset. Ce logiciel permet de configurer les appareils, de lire les données enregistrées et de les exporter pour le traitement. La même procédure est suivie pour chaque enregistreur de données installé sur l'alpage. Les données sont ensuite directement visualisées dans le logiciel sous forme de graphique ou de table.

Ces données illustrent la consommation d'eau en litres par heure. Pour terminer, les données peuvent être exportées au format csv, afin de les lire, analyser et traiter facilement sur un autre logiciel, tel que sur Excel.

Si nécessaire, l'enregistreur de données est ensuite reconfiguré et relancé pour poursuivre l'enregistrement jusqu'à la prochaine récolte de données. Ce protocole a donc été répété régulièrement, afin d'assurer un suivi régulier et précis des conditions mesurées sur le terrain.

³⁷ Bakrona Zürich AG. (s.d.). *HOBOWare State Data Logger*. Consulté le 18 février 2025, à l'adresse <https://bakrona-zuerich.ch/hobo-state-data-logger-ux90-001>

Les câbles

Afin de connecter les compteurs à impulsion aux enregistreurs de données, des câbles³⁸ sont également nécessaires (Fig. 60). Les câbles commandés sont de différentes longueurs et sont équipés d'adaptateurs qui permettent de connecter des capteurs avec des sorties à impulsions aux enregistreurs de données et de transférer entre les appareils les données du débit.



Figure 60. Câbles de liaison entre les compteurs et les enregistreurs de données sur les alpages du Bucley/Pré d'Etoy et de la Perroude de Vaud (Photos : Bakrona Zürich AG ; Lorena Roulin)

5.3.3.2 Mise en place et localisation du matériel

Le matériel pour le suivi a été initialement pensé pour le site du Bucley/Pré d'Etoy, mais c'est finalement sur l'alpage de la Perroude de Vaud qu'il a été installé et activé. Sur cet alpage, il se compose principalement de compteurs à impulsion couplés à des enregistreurs de données, placés à proximité des bassins.

Dans un premier temps, les compteurs ont été installés à leurs emplacements respectifs, puis raccordés aux enregistreurs de données à l'aide des câbles. L'ensemble du matériel a été fixé et sécurisé selon son emplacement, afin d'éviter tout dommage causé par le passage des vaches ou lorsqu'elles viennent s'abreuver aux bassins.

Les enregistreurs de données ont été installés en hauteur, et les compteurs d'eau ainsi que les câbles ont été protégés et stabilisés à l'aide de pierres ou de fils afin d'éviter tout dommage lié au passage du bétail (Fig. 61).

Cependant, sur l'alpage de la Perroude de Vaud, l'un des bassins n'a pas été suffisamment sécurisé. Il s'agissait d'un bassin en plastique, facilement déplaçable par le bétail si celui-ci n'était pas rempli. Le matériel mis en place n'était pas suffisamment solide et le bassin n'était pas correctement ancré dans le sol pour éviter tout déplacement (Fig. 61 – droite). Le bassin a donc été déplacé par les vaches, provoquant l'ouverture du tuyau situé en amont du capteur.

³⁸ Bakrona Zürich AG. (s. d.). *Electronic switch pulse input adapter – 1 meter sensor*. Consulté le 18 février 2025, à l'adresse <https://bakrona-zuerich.ch/electronic-switch-pulse-input-adapter-1-meter-sensor-s-ucc-m001>

Il est donc important de sécuriser correctement le matériel, et en particulier d'ancrer solidement les bassins, surtout lorsqu'ils sont en plastique, afin d'éviter ce type d'incident.



Figure 61. Mise en place du matériel sur deux bassins de l'alpage de la Perroude de Vaud (Photos : Lorena Roulin, Martin Calianno)

Dans le cadre de la conception du dispositif de suivi, une proposition d'équipement avait été élaborée pour l'**alpage du Bucley/Pré d'Etoy**, servant de référence méthodologique. Dans ce contexte, une partie du matériel avait déjà été installée sur le site en question³⁹. Cette proposition comprenait l'installation de **six compteurs à impulsion**, connectés à **trois** enregistreurs de données⁴⁰ (Tab. 14 ; Fig. 62 et 63).

En complément, un **compteur d'eau manuel** avait été installé afin de comptabiliser l'eau utilisée pour le chalet et pour la fromagerie, occupés durant toute la saison d'estivage. Ce compteur devait permettre de mesurer manuellement la consommation totale en eau du bâtiment, à travers des relevés réguliers, afin d'évaluer la consommation journalière liée à l'usage domestique et à la production fromagère.

Cette configuration, bien qu'elle n'ait pas pu être mise en œuvre suite à l'abandon du site du Bucley, constitue un exemple représentatif de ce qu'un suivi hydrique en alpage peut impliquer en termes d'équipement et de répartition du matériel. Elle a servi de **base de réflexion** pour la mise en place du suivi effectif sur l'alpage de la Perroude de Vaud.

³⁹ Avant le démontage du matériel sur le premier site, l'ensemble du dispositif avait été installé sur l'alpage du Bucley. En revanche, sur l'alpage du Pré d'Etoy, seul un compteur avait été mis en place à la sortie de l'étang, mais celui-ci s'est rapidement bouché, empêchant toute collecte de données. C'est pourquoi seule l'installation réalisée sur l'alpage du Bucley est présentée dans cette section.

⁴⁰ Il convient de noter qu'il y avait plus de compteurs que d'enregistreurs de données, car l'idée initiale était de regrouper plusieurs compteurs sur un même enregistreur pour des raisons économiques. Les compteurs avaient donc été placés aux différentes sorties d'un étang afin de tous les relier au même enregistreur, ce qui aurait pu entraîner des problèmes d'écoulement de l'eau, comme observé sur le site du Pré d'Etoy à la sortie de l'étang.

Tableau 14. Matériel utilisé et installé pour le suivi sur l'alpage du Bucley

Stock	Bassins	Compteurs	Enregistreurs de données
Étang 250 m ³ (E1)	B4, B5, B6, B7, B8, B9	3 compteurs à impulsion	1 enregistreur de données
Citerne 40 m ³ (C1)	B2	1 compteur à impulsion	1 enregistreur de données
Citerne 40 m ³ (C2)	B1	1 compteur à impulsion	
Citerne 40 m ³ (C3)	B3	1 compteur à impulsion	1 enregistreur de données
<i>Citerne de 55 m³ du Pré d'Etoy (C1)</i>	B10	1 compteur à impulsion	1 enregistreur de données
Chalet	Chalet et fromagerie	1 compteur manuel	-

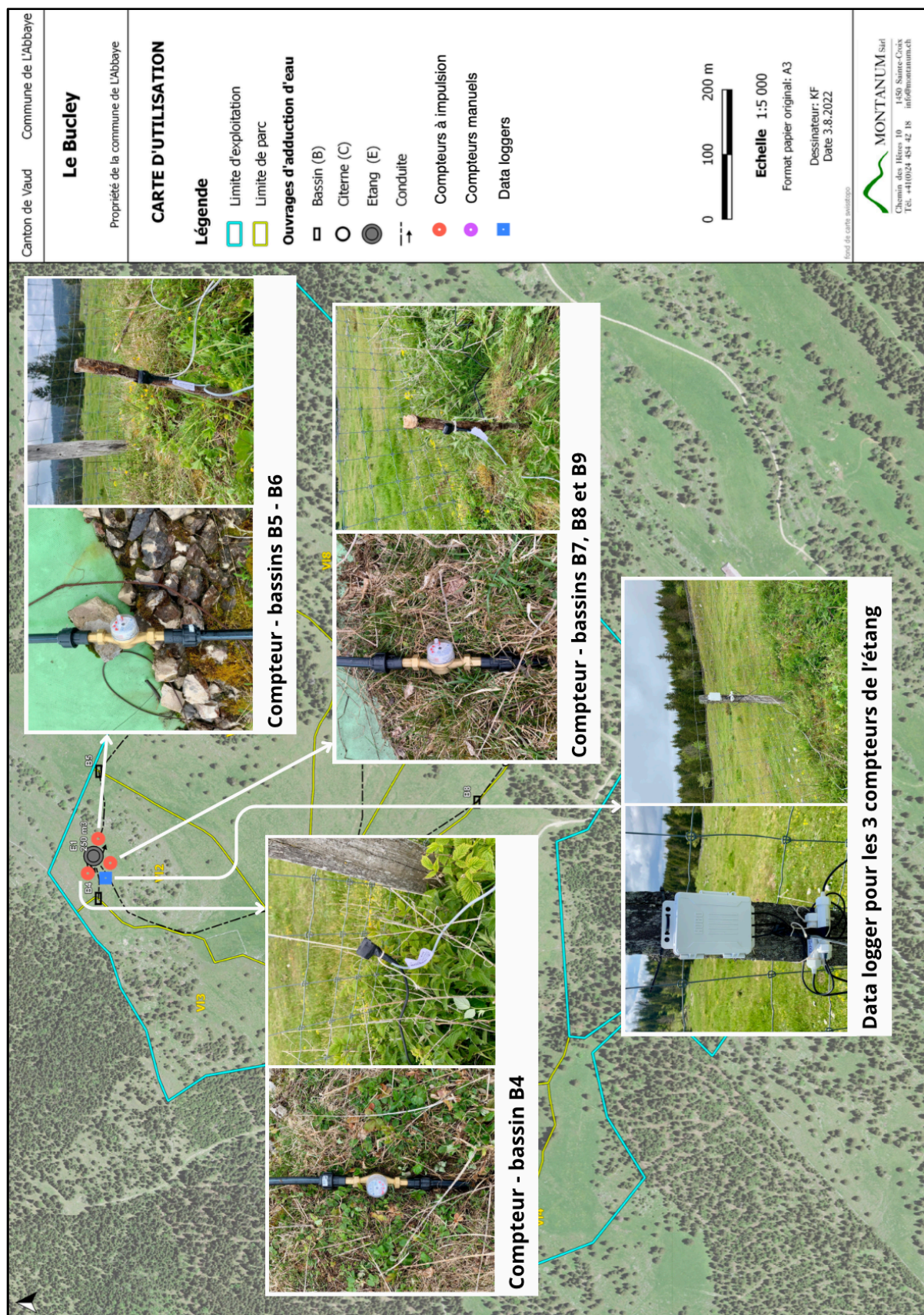


Figure 62. Localisation du matériel de mesure dans le réseau hydraulique de l'étang du Bucley (Montanum, 2022, modifié par Lorena Roulin, 2025)

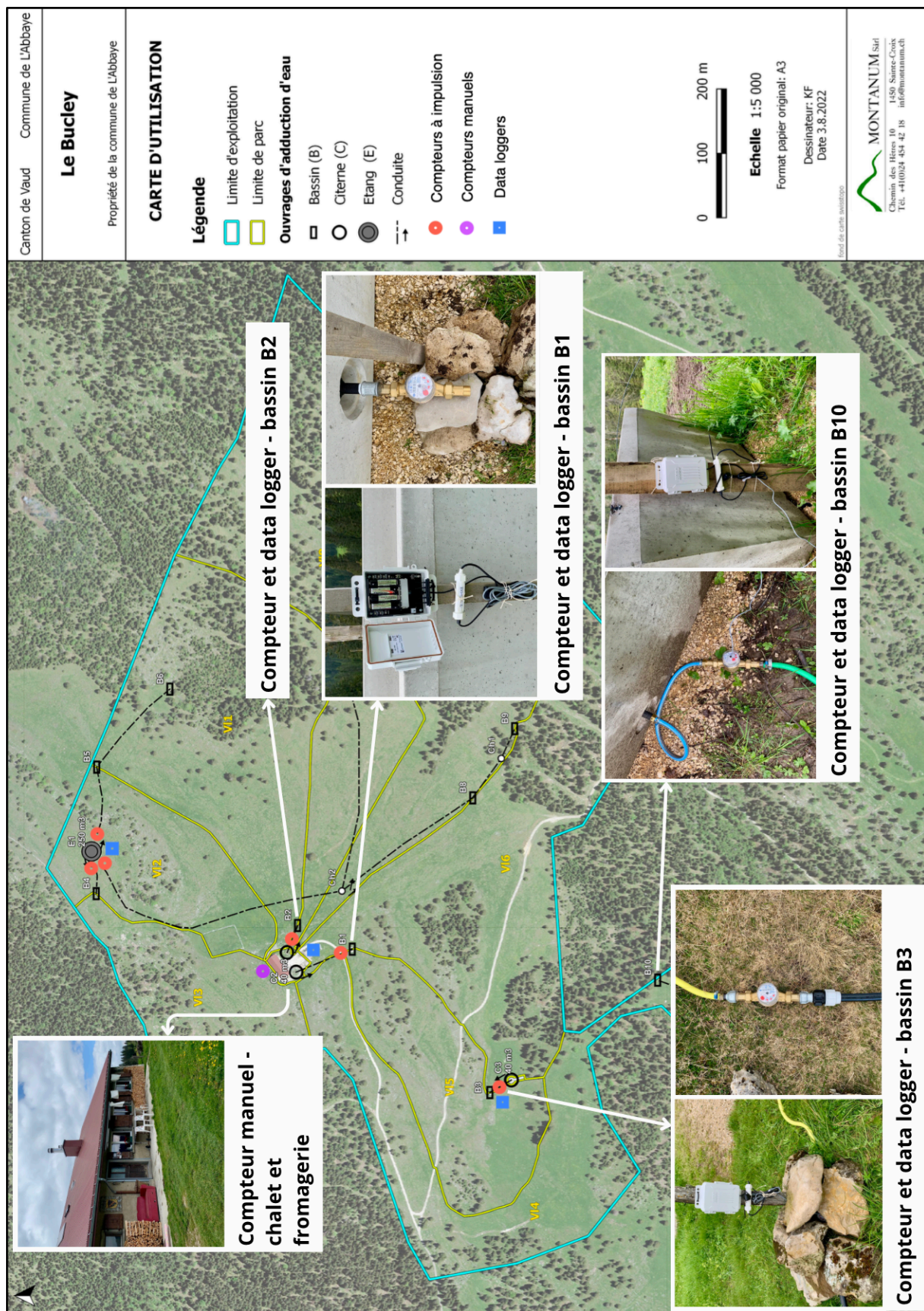


Figure 63. Localisation du matériel de mesure au chalet et sur les différents bassins du Bucley (Montanum, 2022, modifié par Lorena Roulin, 2025)

Suite au retrait du site du Bucley/Pré d'Etoy, **la Perroude de Vaud** a été choisie comme nouveau site de suivi principal. Bien que le contexte technique et les usages y soient plus restreints - absence de fromagerie, notamment - ce terrain a permis l'installation concrète du dispositif de suivi, en s'inspirant partiellement de la configuration initialement pensée pour le Bucley/Pré d'Etoy.

Trois bassins – sur les quatre de compte l'alpage - ont été équipés de **compteurs à impulsion**, connectés à des **enregistreurs de données** (Tab. 15 ; Fig. 64). Le bassin B1 n'a pas été équipé d'un compteur ni d'un enregistreur, en raison de la présence d'une bossette à l'autre extrémité du parc, susceptible de fausser les résultats. De plus, l'installation du matériel sur ce bassin était rendue plus complexe par les tuyaux rigides qui l'alimentent en eau. Cela illustre que, malgré notre volonté de mesurer l'ensemble de la consommation durant la saison, les contingences techniques liées aux infrastructures existantes doivent être prises en compte.

Le matériel a été installé en début de saison estivale (fin mai), principalement avec le soutien de l'amodiatrice. Cette collaboration a permis une mise en place rapide et généralement sans difficultés techniques, grâce à sa bonne connaissance des installations hydrauliques existantes, notamment l'emplacement des bassins et le réseau de tuyaux de raccordement. Elle a également permis de vérifier immédiatement le bon fonctionnement du dispositif de suivi et d'effectuer, si nécessaire, les ajustements directement sur le terrain.

Contrairement au Bucley, aucun compteur n'a été installé au chalet. Le dispositif se concentre donc sur la consommation liée à l'abreuvement du bétail, offrant un suivi simplifié et encouragé par une collaboration solide avec l'exploitant. Cette mise en œuvre opérationnelle à la Perroude de Vaud marque la **transition entre une phase de conception théorique et une application concrète sur le terrain**.

Tableau 15. Matériel pour le suivi sur l'alpage de la Perroude de Vaud

Stock	Bassins	Compteurs	Enregistreurs de données
Étang 120 m ³ (E1)	B4	1 compteur à impulsion	1 enregistreur de données
Citerne 45 m ³ (C1)	B3	1 compteur à impulsion	1 enregistreur de données
Citerne 38 m ³ (C2)	B2	1 compteur à impulsion	1 enregistreur de données

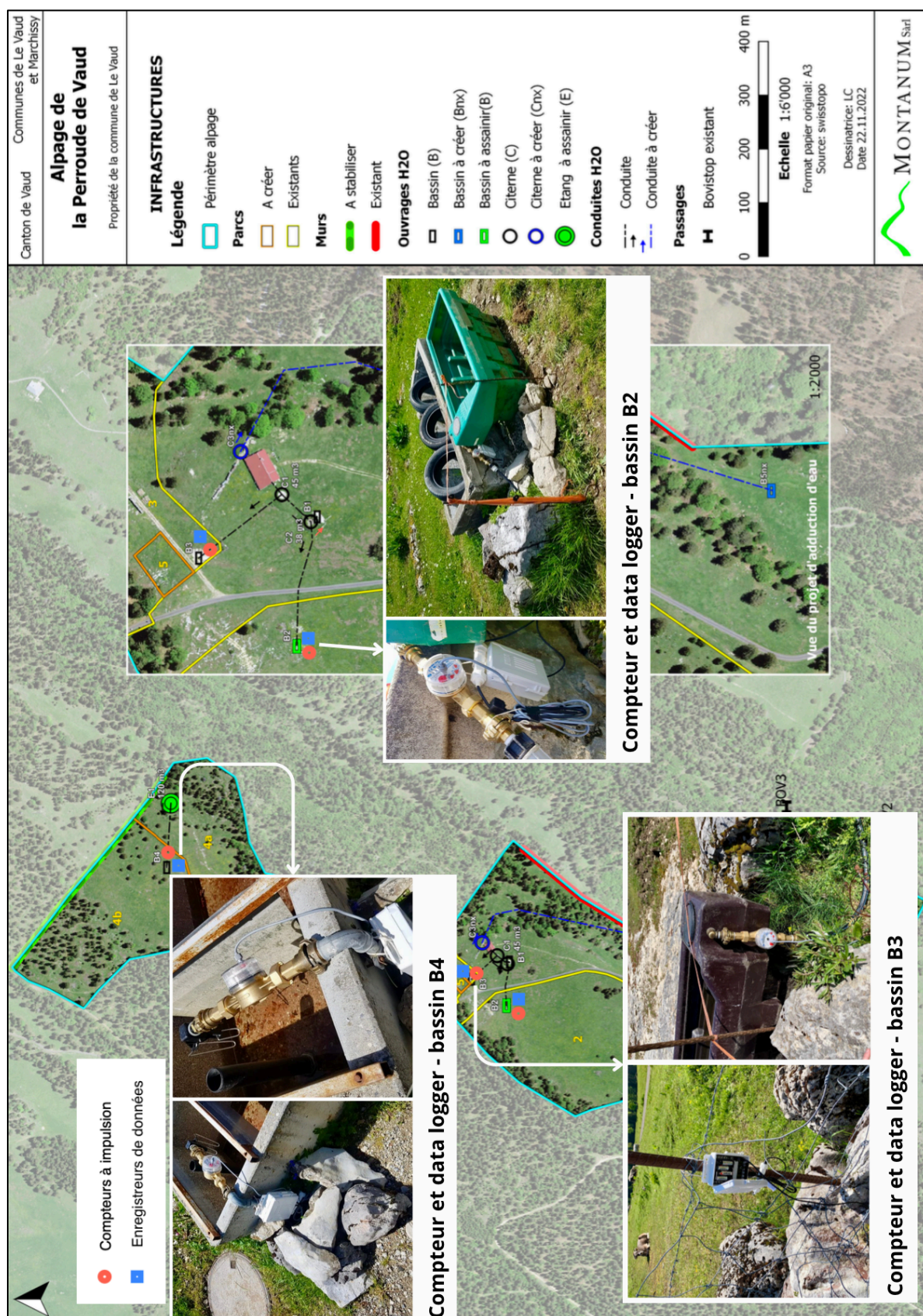


Figure 64. Localisation du matériel de mesure sur l'alpage de la Perroude de Vaud (Montanum, 2022, modifié par Lorena Roulin, 2025)

5.3.4 Données liées aux pratiques pastorales

Les données relatives aux pratiques pastorales, provenant à la fois de l'**amodiataire** et de la **littérature**, sont essentielles pour assurer une récolte de données fiable, une gestion rigoureuse et une analyse pertinente et cohérente des résultats. Dans ce contexte, la bonne entente et la communication avec l'amodiataire sont des éléments centraux au bon déroulement du protocole de suivi.

En effet, certaines informations concernent les pratiques pastorales et le bétail, telles que :

- **La taille et la composition du cheptel** à l'alpage de la Perroude de Vaud, renseignées par l'exploitant, soit par message, soit lors de nos rencontres sur le terrain, incluant les évolutions éventuelles au cours de la saison (naissance des veaux par exemple) ;
- **Le calendrier de rotation entre les parcs**, communiqué par l'exploitant à chaque changement ;
- **Le relevé des différentes infrastructures** présentes sur l'alpage, basé sur les données fournies par le bureau Montanum, ayant travaillé sur le site, et complété par les informations collectées directement auprès de l'exploitant lors de la visite et des discussions sur place ;
- **La production de lait**, issue de la littérature scientifique, ou directement renseignée par l'exploitant sur un alpage laitier (ce qui n'a pas été le cas à la Perroude de Vaud mais qui avait été le cas sur l'alpage du Bucley).
- **La consommation de matière sèche**, issue de la littérature scientifique.

L'intégration de ces données à chaque étape du protocole de suivi permet de mieux contextualiser les résultats et de tenir compte des facteurs susceptibles d'influencer la consommation d'eau, tant pour l'alpage que pour le bétail. On obtient ainsi des résultats plus représentatifs de la réalité du terrain.

Cependant, le contact avec l'amodiataire peut s'avérer difficile à établir pendant la saison d'estivage, en raison de la charge de travail importante des agriculteurs. Il est donc vivement recommandé de **prendre contact suffisamment tôt**, idéalement avant la montée à l'alpage, afin de recueillir les informations essentielles dès le début de la saison, au moment de la mise en place du dispositif de suivi et de l'installation du matériel.

Dans le cas de la Perroude de Vaud, les informations les plus urgentes, telles que les changements de parc, les modifications dans le cheptel ou la naissance des veaux, ont été principalement communiquées par message. En revanche, pour les informations plus générales ou nécessitant des précisions, comme d'autres problèmes rencontrés sur l'alpage, nous avons privilégié des rencontres sur le terrain afin de discuter de vive voix et de poser les questions de manière détaillée. Cela a notamment permis de mieux comprendre l'apport du fourrage ou d'identifier d'éventuels problèmes liés aux installations hydrauliques, en observant directement la situation sur place.

Par la suite, il est important de maintenir un lien régulier tout au long de la période d'estivage. Cette communication continue permet non seulement de tenir l'exploitant informé des déplacements sur le terrain ou de l'avancée du travail, mais également d'obtenir les données nécessaires au bon déroulement du protocole de suivi.

5.4 Analyse des données

Une fois les différentes données récoltées, celles-ci ont été organisées dans **un tableau Excel**, afin de faciliter leur visualisation et leur analyse. Le tableau se compose de **deux parties** : une première basée sur une **organisation horaire des données**, et une seconde sur une **organisation journalière des données**. Cette double structuration permet de croiser efficacement les différentes informations pertinentes et d'étudier de manière plus précise la consommation d'eau du bétail.

5.4.1 Données horaires

Le premier tableau présente **les données brutes enregistrées par les enregistreurs de données heure par heure**, avec la date et l'heure précises. La consommation d'eau est indiquée dans des colonnes distinctes pour chaque parc, ce qui facilite le traitement et l'analyse des données. Le tableau 16 illustre l'organisation des données, qui permet également de suivre la rotation du bétail entre les différents parcs.

Tableau 16. Exemple de tableau de données - données horaires de consommation d'eau

Date et heure	Conso (L) B2	Conso (L) B3	Conso (L) B4
2025.06.01 14:00:00	102	-	-
2025.06.01 15:00:00	11	-	-
2025.06.01 16:00:00	10	-	-

Les parcelles non occupées à un moment donné sont facilement repérables grâce à un « - » dans la case correspondante, indiquant l'absence d'animaux sur cette plage horaire. À l'inverse, la colonne correspondant au parc effectivement occupé présente les volumes consommés au niveau du bassin, reflétant ainsi l'activité du troupeau. Ces données peuvent également être utilisées pour analyser la répartition de la consommation d'eau sur une journée, en identifiant les plages horaires de forte consommation et les périodes de repos.

5.4.2 Données journalières

Le deuxième tableau présente les **données journalières, obtenues en additionnant les valeurs horaires pour chaque jour**. Ces totaux de consommation d'eau sont accompagnés de la date et du jour de la semaine, ce qui facilite la lecture, le repérage chronologique et l'interprétation des données (Tab. 17).

Tableau 17. Exemple de tableau de données journalières

Date	Jour	Conso (L/jour)	Parc	Cheptel	Mat sèche (%)	Tmoy journalière +2 m (°C)	Tmin journalière +2 m (°C)	Precip (mm)	Notes
2025.06.01	Dimanche	431	B2 + B3	55	27	14,2	6,8	30,4	
2025.06.02	Lundi	106	B2	55	-	12	10,4	2,4	
2025.06.03	Mardi	391	B2	55	-	13,5	10,2	16,6	

Le reste des données est organisé dans le tableau en plusieurs sections thématiques, afin de faciliter leur lecture et leur exploitation :

- **Rotations entre les parcs** (Parc) : précisent les moments où les animaux changent de parc, ainsi que le nom du parc concerné.
- **Données liées au bétail** (Cheptel) : regroupent les effectifs présents sur le site.
- **Données fourragères** (Mat sèche (%)) : indiquent le pourcentage de matière sèche calculé sur le site lors des relevés.
- **Données météorologiques** (Tmoy journalière +2 m (°C), Tmin journalière +2 m (°C), Precip (mm)) : comprennent les températures moyennes et minimales mesurées à deux mètres du sol, ainsi que la somme des précipitations journalières (exprimée en millimètres).
- **Informations complémentaires** (Notes) : permet d'ajouter d'autres informations libres, telles que le remplissage d'un bassin ou l'ajout des chevaux avec le reste du bétail.

Ce dispositif et cette organisation des données permettent non seulement la traçabilité de l'activité quotidienne, mais aussi la mise en relation des données techniques (eau, météo, fourrage) avec les pratiques pastorales (effectif et gestion du troupeau).

5.4.3 Données par UGB

Pour interpréter de manière précise les volumes d'eau consommés, il est essentiel de prendre en compte la **composition du cheptel** présent sur l'alpage. En effet, les différents types d'animaux (vaches, veaux, génisses, taureaux, chevaux, etc.) n'ont pas les mêmes besoins et

par conséquent de consommer par la même quantité d'eau. Afin de normaliser la consommation selon un indicateur commun, les effectifs ont été convertis en **UGB (unité gros bétail)**. Chaque type d'animal se voit donc attribuer un coefficient UGB selon les recommandations en vigueur (Tab. 18).

Tableau 18. Tableau des coefficient UGB par animal (Sautier, 2009 ; AGRIDEA, 2023)

Type d'animal	Coefficient UGB
Vache laitière	1
Vache allaitante	0.80
Génisse > 1 an	0.50
Veau	0.25
Veau allaité	0.17
Taureau	0.80
Cheval	0.70

Dans le tableau Excel, une colonne est également dédiée à chaque catégorie animale, où l'on indique le nombre d'individus présents par jour. Un calcul est ensuite effectué pour obtenir le nombre total d'UGB/jour, en multipliant le nombre d'animaux par leur coefficient UGB, puis en faisant la somme de toutes les UGB.

Exemple de calcul d'UGB journalier :

$$4 \text{ vaches allaitantes (0.8)} + 1 \text{ veau (0.25)} + 2 \text{ chevaux (0.7)} = (4 \times 0.8) + (1 \times 0.25) + (2 \times 0.7) \\ = 3.2 + 0.25 + 1.4 = 4.85 \text{ UGB}$$

Ce total est ensuite utilisé pour calculer la consommation d'eau par UGB, selon la formule suivante :

$$\text{Consommation par UGB (L/jour)} = \text{Volume d'eau total consommation par jour (L)} / \text{Nombre total d'UGB/jour}$$

Cette donnée est essentielle pour **comparer objectivement la consommation d'eau en fonction de la charge animale**, indépendamment du type d'animaux présents. La normalisation par UGB permet de lisser les différences entre les types de bétail et d'avoir une lecture plus homogène des consommations. Elle facilite également l'identification d'anomalies ou de pics de consommation qui pourraient être liés à des événements extérieurs - tels qu'un

stress thermique, un changement de pâturage ou un problème d'abreuvement -, et qui ne sont donc pas directement explicable par le seul comportement du bétail.

5.5 Synthèse

Ce cinquième chapitre répond au deuxième objectif de ce travail : **élaborer un protocole méthodologique** permettant de suivre la consommation en eau du bétail dans les alpages. Ce protocole vise à articuler les conditions climatiques, les infrastructures hydrauliques et les pratiques pastorales, afin de quantifier la consommation d'eau dans des contextes réels d'estivage. Il repose sur une démarche reproductible, testée sur deux sites contrastés : le Bucley (protocole initialement prévu) et la Perroude de Vaud (site effectif de suivi).

Inspiré de travaux antérieurs, tel que l'étude de Cardot et al., 2008, le protocole s'appuie sur une équation théorique estimant la consommation d'eau selon plusieurs variables : la matière sèche ingérée, la production laitière, les paramètres climatiques et le type de fourrage.

Toutefois, en raison des **conditions très variables en alpage** (climat, topographie, alimentation, points d'eau), une adaptation empirique est nécessaire pour assurer la pertinence du modèle. À ce titre, un tableau met en évidence les principales différences entre le suivi en étable (milieu contrôlé) et le suivi en alpage (milieu ouvert), soulignant la complexité accrue de ce dernier et la nécessité de recourir à des mesures spécifiques et adaptées.

Le choix du site, la collaboration avec la commune et l'exploitant, la planification des visites et l'installation stratégique du matériel ont été identifiés comme des **facteurs clés du succès du suivi**. En parallèle, la gestion de la pression hydraulique, la logistique liée aux déplacements du bétail et les contraintes propres à la saison d'estivage ont nécessité plusieurs ajustements techniques sur le terrain.

La mise en œuvre du protocole sur l'alpage de la Perroude de Vaud, entre mai et juillet 2025, a permis de tester concrètement la méthode. La **collecte régulière des données de consommation** a été assurée grâce à l'installation de compteurs d'eau à impulsion reliés à des enregistreurs, placés sur chaque point d'abreuvement. En parallèle, des **prélèvements de fourrage** ont été réalisés afin de mesurer la teneur en matière sèche. Enfin, une attention particulière a été portée à la collaboration et à la **communication avec l'amoditaire** de l'alpage, afin de l'informer de l'avancée du projet et d'obtenir les données nécessaires à l'interprétation des résultats.

Afin de clarifier les étapes mises en œuvre, le tableau 19 récapitule les différentes **étapes de la mise en place du dispositif**, depuis le choix initial des sites jusqu'à la communication des résultats auprès des parties prenantes et du public.

Tableau 19. Principales étapes pour le suivi de la consommation d'eau dans les alpages

Choix de l'alpage	Sites avec modes de production variés et infrastructures simples
Prise de contact préalable	Contact avec propriétaire (commune) et exploitant (amodiatrice) pour obtenir les autorisations et planifier l'installation.
Visite de terrain	Évaluation de la faisabilité technique et engagement de l'exploitant, essentiel pour le succès du suivi.
Localisation du matériel de mesure	Objectif : Installation de compteurs individuels à chaque point d'eau, privilégiant les bassins pour garantir la fonctionnalité du dispositif.
Moment de l'installation	Planification en début de saison estivale avec collaboration des exploitants pour faciliter la mise en place. Présence de l'exploitant sur place lors de l'installation.
Période de mesures	Suivi de terrain : contrôle des installations, relevés des données, prélèvement du fourrage et communication avec l'exploitant.
Communication sur site	Mise en place d'un panneau informatif pour sensibiliser le public et expliquer le projet, avec contact pour questions.
Démontage et stockage	Retrait et protection du matériel en fin de saison pour assurer sa durabilité et son bon fonctionnement futur. Présence de l'exploitant sur place lors du démontage.
Communication des résultats	Retour clair et synthétique aux propriétaires et amodiatrices, valorisant leur contribution au projet.

Les différents types de **données nécessaires** à la mise en œuvre de ce suivi sont synthétisés dans le tableau 20, qui regroupe à la fois les sources d'information mobilisées et les méthodes de collecte associées.

Tableau 20. Résumé des données nécessaires au dispositif de suivi de la consommation d'eau en alpage

Type de données	Indicateurs	Méthode de collecte
Données climatiques	Températures (°C) et précipitations (mm)	Station météorologique
Données fourragères	Qualité du fourrage (% de matière sèche)	Échantillon de fourrage
Données empiriques de la consommation en eau	Quantité d'eau consommée par le bétail et par les activités pastorales (L/j)	Compteurs d'eau et enregistreurs de données
Données liées aux pratiques pastorales	Production de lait, taille et composition du cheptel, calendrier de rotation entre les parcs et relevé des différentes infrastructures présentes sur l'alpage	Relevé par l'amodiatrice, communiqué en continu

Ce protocole de suivi a été entièrement mis en œuvre sur l'alpage de la Perroude de Vaud, permettant de recueillir des résultats empiriques concrets sur la consommation d'eau du bétail dans ce contexte spécifique. Ces premiers résultats, présentés dans le chapitre suivant, offrent un aperçu des dynamiques hydriques à l'échelle de l'alpage et constituent une base précieuse pour évaluer les limites, la pertinence et la transférabilité de la méthode.

6. Le cas de la Perroude de Vaud

La mise en place du protocole de suivi a permis de collecter un ensemble de **données détaillées sur la consommation d'eau du bétail** durant la période d'estivage. L'analyse de ces données met en évidence plusieurs tendances, en lien avec les conditions climatiques, les pratiques pastorales et la dynamique du bétail.

6.1 Évolution météorologique

L'analyse des conditions météorologiques sur la période d'étude permet de mieux comprendre les variations de consommation en eau observées sur l'alpage. Les données météorologiques, enregistrées entre le 23 mai et le 18 juillet, mettent en évidence **trois phases distinctes** (Fig. 65).

Evolution des températures et des précipitations du 23 mai au 18 juillet

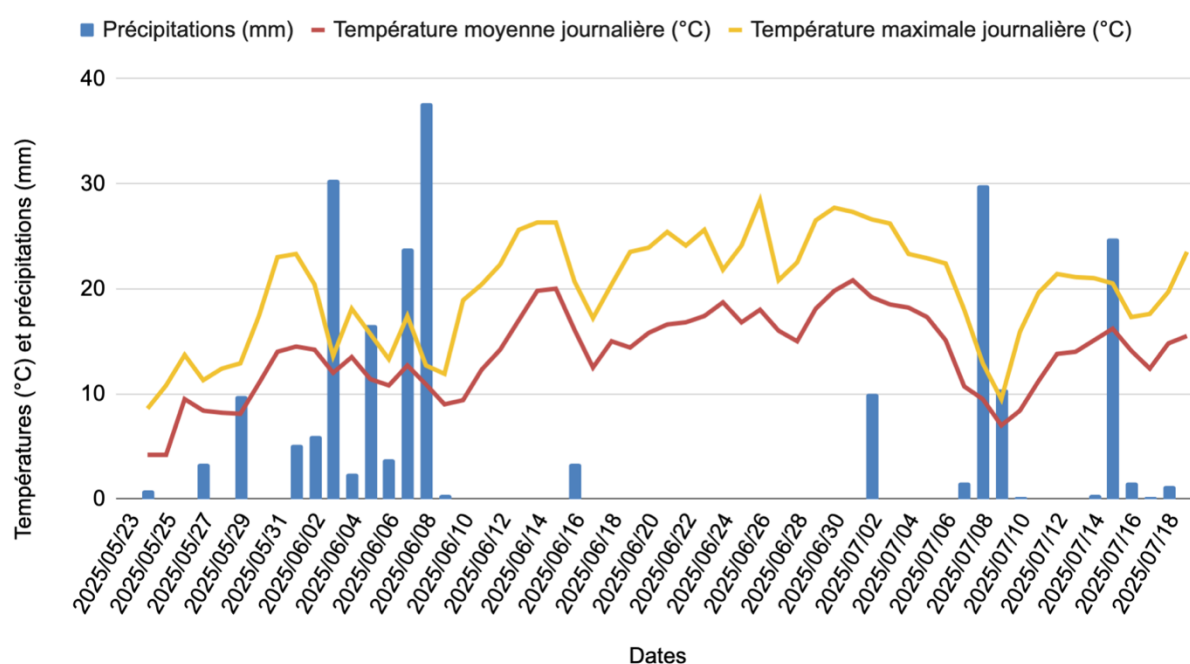


Figure 65. Évolution des températures maximales et moyennes ainsi que des précipitations à la station Agroscope des Amburnex entre le 23 mai et le 18 juillet (Roulin, 2025).

La première, du **23 mai au 9 juin**, correspond à une période relativement **fraîche**, avec des **températures moyennes journalières comprises entre 4°C et 14°C**. Ce contexte thermique modéré s'est accompagné de **précipitations fréquentes et abondantes**, notamment en début juin, où des pluies ont été enregistrées presque quotidiennement, culminant à **37 mm le 7 juin**.

À partir du **10 juin et jusqu'au 5 juillet**, une période **chaude et sèche** s'installe. Les températures moyennes journalières atteignent jusqu'à **20,8°C**, avec un pic de température

maximale à **28,4°C le 25 juin**. Ces températures élevées sont associées à un **fort déficit hydrique** : **entre le 16 et le 30 juin, aucune précipitation n'a été enregistrée**, soit 15 jours consécutifs sans pluie. Plus largement, **entre le 9 juin et le 5 juillet**, les précipitations ont été **extrêmement faibles**, à l'exception de 2 jours seulement avec quelques précipitations.

Le 6 juillet marque un **retour des précipitations**, culminant à **29,8 mm le 7 juillet**, ce qui entraîne une **baisse notable des températures**. Entre le 7 et le 9 juillet, la température moyenne chute, ne dépassant pas **9,5°C**. Les jours suivants, les températures moyennes restent modérées (**≤16°C**) et les précipitations deviennent un peu plus régulières.

En résumé, les deux mois de collecte de données se caractérisent par un **début de juin et un mois de juillet frais et arrosés**, interrompus par un **épisode de chaleur intense et de sécheresse prolongée** entre la mi-juin et le début du mois de juillet.

6.2 Consommation du bétail en alpage

D'autres résultats obtenus sur l'alpage de la Perroude de Vaud correspondent à la **consommation totale d'eau** enregistrée quotidiennement à l'aide des compteurs et des enregistreurs de données installés (Fig. 66).

Consommation totale journalière

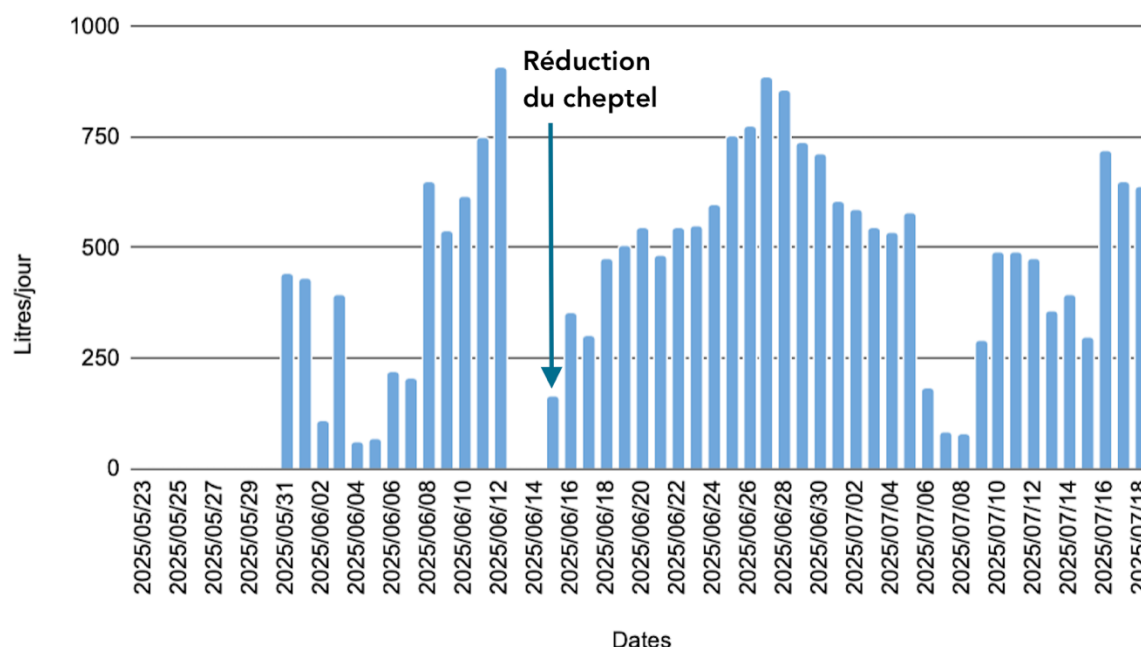


Figure 66. Consommation totale journalière d'eau du bétail à la Perroude de Vaud, de juin à juillet 2025 (Roulin, 2025)

Entre fin mai et mi-juillet, la consommation journalière totale a beaucoup varié, dépendant de nombreux facteurs identifiés. Au début de la saison, entre le **31 mai et le 12 juin**, le troupeau

comptait environ **55 têtes de bétail**, ce qui explique les volumes d'eau consommés particulièrement élevés dès les premières semaines (Fig. 66).

Ensuite, à **partir du 15 juin**⁴¹, seulement **vingt animaux** sont restés sur l'alpage : 15 vaches, 4 génisses et 1 taureau, entraînant une baisse notable de la consommation totale enregistrée. Malgré cette réduction du cheptel, une tendance générale à l'augmentation de la consommation d'eau est observée au fil des semaines. Cette tendance atteint **un pic de 886 litres le 27 juin 2025** (Fig. 66), avant de diminuer progressivement dès le début du mois de juillet, avec toutefois des fluctuations tout au long de cette période. **La consommation journalière moyenne sur la période allant du 15 juin au 18 juillet s'élève à 492 litres par jour.**

La figure 67 présente la consommation d'eau rapportée à l'unité de gros bétail (UGB), ce qui permet de standardiser les données et de neutraliser les effets liés aux variations de taille du troupeau, comme celles observées dans la figure 66. Malgré cette normalisation de la consommation, les valeurs journalières varient fortement au cours de la période de suivi, oscillant entre **2 et 75 L/UGB/jour** (Fig. 67). Cependant, en moyenne, **entre le 31 mai et le 18 juillet**, la consommation s'élève à **34 L/UGB/jour**.

Consommation journalière par UGB

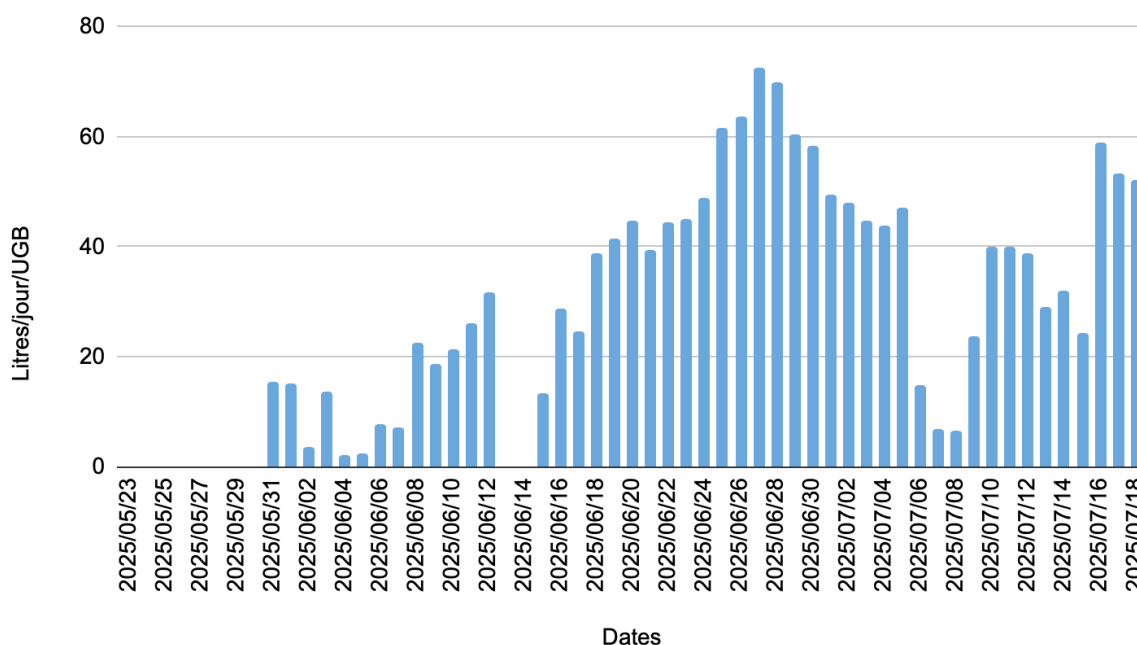


Figure 67. Consommation journalière par UGB à la Perroude de Vaud (Roulin, 2025)

Cette normalisation par UGB permet de mieux mettre en évidence les tendances réelles de consommation, indépendamment des fluctuations du cheptel. On observe ainsi plus clairement une augmentation progressive de la consommation d'eau par UGB, notamment au

⁴¹ Les données des 13 et 14 juin ont été écartées de l'analyse, car elles présentaient des valeurs anormalement élevées, inexpliquées et incohérentes avec les conditions observées. Elles n'ont donc pas été retenues dans les résultats.

cours du mois de juin, jusqu'à la fin du même mois (Fig. 67). Dès le début du mois de juillet, une diminution progressive de la consommation est observée. Une baisse marquée survient **entre les 6 et 9 juillet**, avec une **valeur minimale de seulement 7 L/UGB/jour**. Par la suite, la consommation remonte progressivement, tout en demeurant globalement inférieure aux niveaux enregistrés durant le mois de juin.

6.2.1 Variations intra-journalières de la consommation en eau

Les **variations intra-journalières de la consommation du bétail** constituent également un indicateur essentiel pour appréhender finement les dynamiques de consommation d'eau à l'échelle de l'alpage. Elles permettent non seulement d'identifier les moments de la journée où la demande en eau est la plus forte, mais également de mieux comprendre les rythmes d'activité du troupeau et leur lien avec les conditions climatiques.

La figure 68 présente la consommation horaire mesurée à la Perroude de Vaud durant la journée du **1^{er} juin 2025**. Une nette augmentation de la consommation est observée dès la fin de la matinée, avec des pics tout au long de l'après-midi, culminant à plus de **100 litres par heure à 14 heures**. La consommation diminue ensuite progressivement en soirée.

Consommation journalière : 01.06.2025

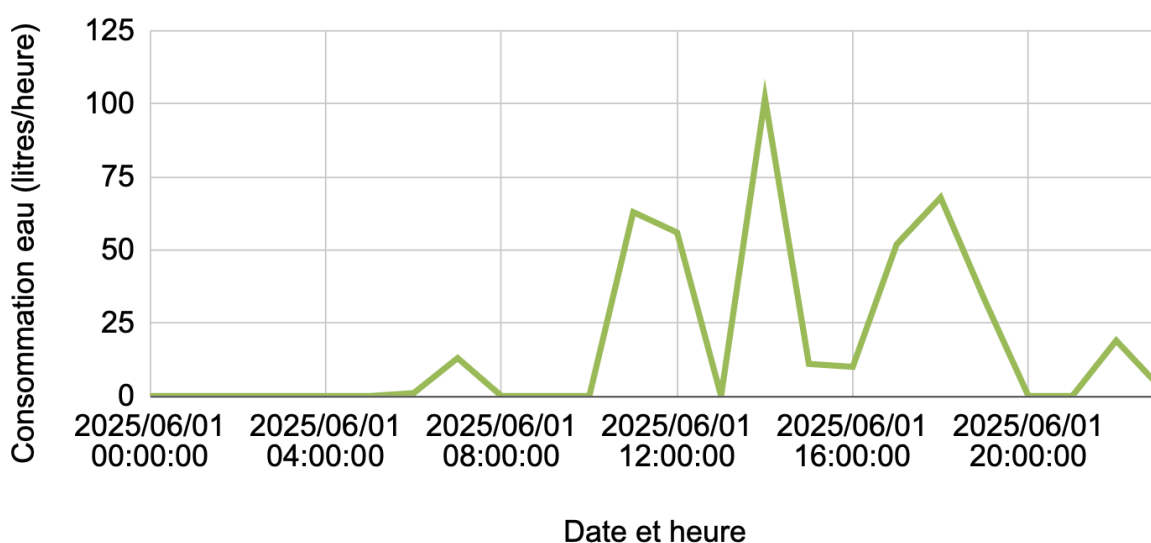


Figure 68. Consommation journalière à la Perroude de Vaud le 01.06.2025 (Roulin, 2025)

Les figures 69 et 70 montrent que cette dynamique journalière de la consommation en eau se maintient tout au long de la saison, quelle que soit la date : **l'après-midi reste systématiquement la période la plus consommatrice, malgré une consommation qui commence plus tôt dans la matinée.**

Par exemple, le 19 juin 2025 (Fig. 69), la consommation s'étend de **7h à 22h**, avec une **intensification nette dès la fin de matinée**, traduisant le rythme d'activité du troupeau. Cette répartition se retrouve également le 16 juillet 2025 (Fig. 70), la journée est marquée par des **pics de consommation particulièrement élevés dès la fin de matinée et se poursuivant dans l'après-midi et dans la soirée**, atteignant jusqu'à **156 litres par heure**.

Consommation journalière : 19.06.2025

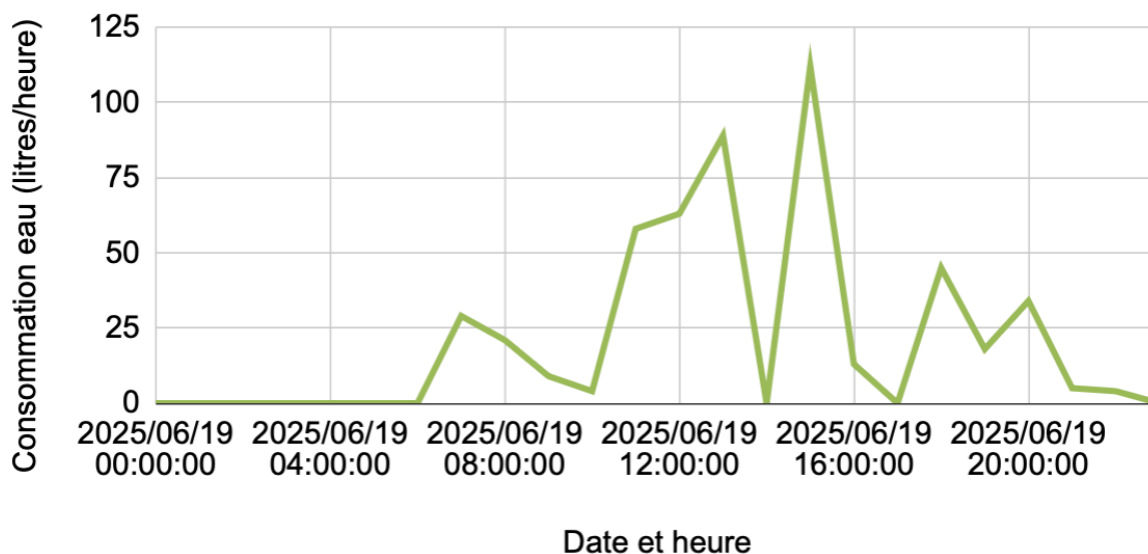


Figure 69. Consommation journalière à la Perroude de Vaud le 19.06.2025 (Roulin, 2025)

Consommation journalière : 16.07.2025

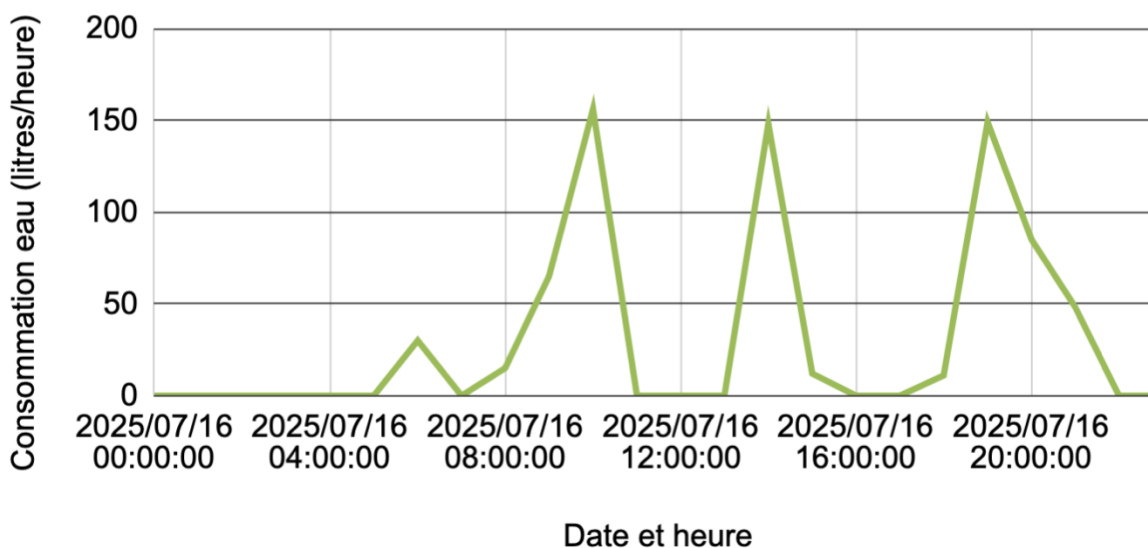


Figure 70. Consommation journalière à la Perroude de Vaud le 16.07.2025 (Roulin, 2025)

À l'inverse, **la nuit est systématiquement caractérisée par une consommation très faible, voire nulle**. Cette absence de demande reflète les rythmes d'activité du troupeau, moins présentes autour de l'abreuvoir durant les heures les plus fraîches, mais aussi la baisse des besoins hydriques nocturnes, en lien avec les températures plus modérées et l'éventuelle présence de rosée matinale qui humidifie le fourrage. Ces observations mettent en évidence l'existence de périodes de forte pression ponctuelle sur la ressource, concentrées dans le temps, en particulier lors des après-midis chauds.

6.3 Facteurs influençant la consommation d'eau en alpage

Après avoir présenté les tendances générales de la consommation en eau, cette deuxième partie s'attache à explorer les variations plus fines, en lien avec **différents facteurs susceptibles d'influencer les besoins hydriques du bétail**. Ces facteurs incluent notamment les **conditions climatiques**, soit les température et les précipitations, ainsi que le **pourcentage de matière sèche du fourrage** (Fig. 71).

Consommation journalière du bétail et facteurs déterminants

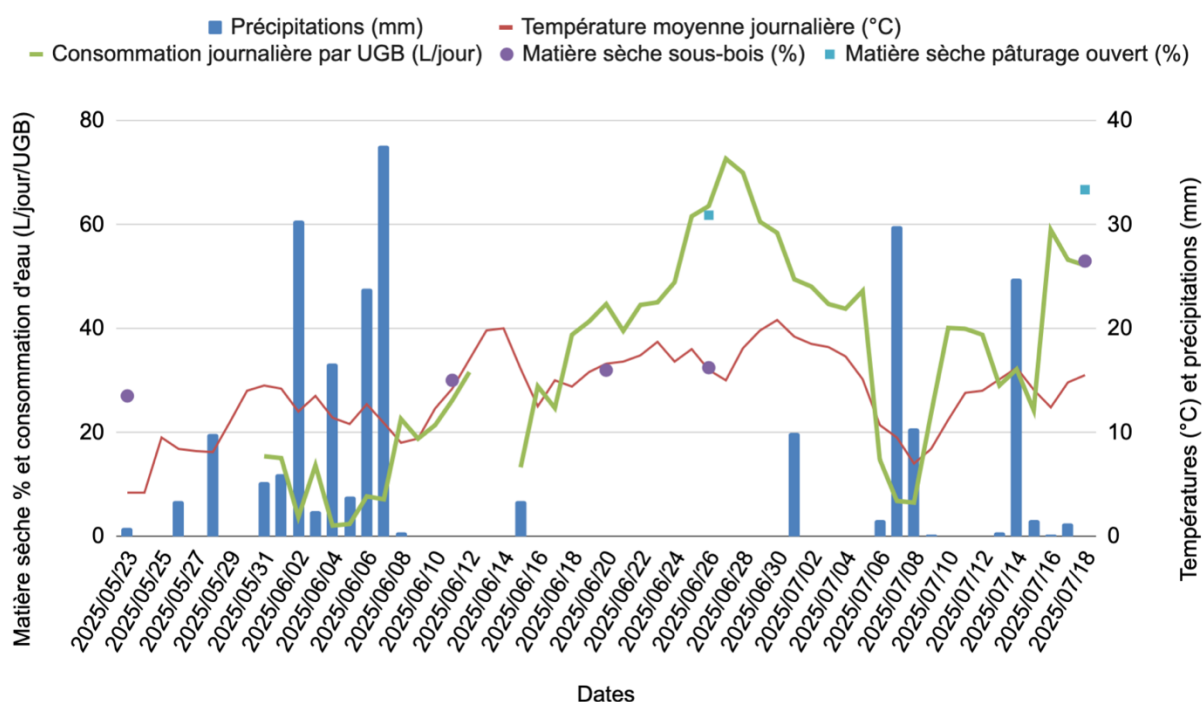


Figure 71. Consommation journalières du bétail à la Perroude de Vaud, liée avec les facteurs déterminants. Les données climatiques proviennent de la station Agrométéo des Amburnex (alt. 1321 m), située à 4,4 km de l'alpage (Roulin, 2025)

Ces résultats mettent en évidence une influence marquée des facteurs environnementaux sur la consommation en eau du bétail. En début de période, **la consommation journalière d'eau par UGB est relativement basse**, notamment le **31 mai et le 7 juin**, avec des précipitations comprises entre 5,2 et 37,6 mm par jour. Durant cette phase humide, où les pluies sont régulières, la **consommation moyenne atteint 8 L/UGB/jour**, avec une amplitude de 2 à 15 L/UGB/jour.

À partir du **10 juin et jusqu'au 5 juillet**, on observe une **forte augmentation** de la consommation, avec une **moyenne quotidienne de 45 L/UGB**, variant entre 13 et 73 L/UGB/jour. Cette période correspond à une longue séquence de sécheresse, marquée par une raréfaction des précipitations et des températures élevées. La demande en eau augmente nettement dans ce contexte.

Cependant, durant cette période, un **épisode pluvieux ponctuel** entraîne une réaction immédiate du bétail. Ainsi, le **15 juin**, avec une température moyenne journalière de 15°C, 3,4 mm de précipitations provoquent une baisse marquée de la consommation : **13 L/UGB**, contre 29 L/UGB le lendemain sans précipitations. Cette faible quantité n'a toutefois pas permis de renouveler le fourrage, ce qui explique la **reprise rapide d'une forte consommation** dès le jour suivant.

Une situation différente est observée le **1^{er} juillet** : malgré 10 mm de précipitations, la consommation ne diminue pas et reste à **49 L/UGB/jour** (603 L au total). Cet épisode pluvieux, bien que plus important que celui du 16 juin, survient en pleine période de sécheresse prolongée et avec une température moyenne de 19 °C, limitant ainsi son effet sur l'humidité du fourrage et sur les besoins hydriques du bétail.

Entre le **15 et le 28 juin**, la consommation en eau augmente fortement, passant de **25 à 75 L/UGB/jour** en l'espace de deux semaines, alors que les températures moyennes se maintiennent à des valeurs relativement élevées, entre 12,5°C et 18,8°C). Cette hausse peut s'expliquer par l'assèchement progressif du fourrage, dont la teneur en matière sèche est passée de **27 % au début du mois de juin** à environ **32,5 % à la fin du mois** dans le parc 4, où le troupeau est resté durant toute la période. Toutefois, cette valeur moyenne a été relevée dans les zones de sous-bois, alors qu'au centre du pâturage, le taux de matière sèche avoisinait plutôt **60 %**.

L'augmentation de la consommation d'eau peut donc être liée à la hausse de la matière sèche dans certaines parties de l'alpage. Elle coïncide également avec le moment où l'amodiatraire a apporté du **fourrage sec** afin de pallier le manque de régénération du fourrage naturel. Ainsi, cette hausse de consommation pourrait être attribuée conjointement à la sécheresse du pâturage et à l'apport complémentaire de fourrage sec, malgré la présence de sous-bois dans le parc.

À partir du 6 juillet, la consommation chute brutalement, atteignant **7 L/UGB/jour le 7 juillet**. Cette baisse coïncide avec une diminution notable des températures (moyenne de 9,5 °C) et un retour marqué des précipitations (29,8 mm le 7 juillet). Les pluies enregistrées sur quatre jours consécutifs, du **6 au 9 juillet**, entraînent une consommation moyenne réduite à **13 L/UGB/jour**.

Dès le 10 juillet, la consommation repart progressivement à la hausse, avec une moyenne avoisinant celle observée durant la période sèche : **40 L/UGB/jour**. Cela peut s'expliquer par le fait que les vaches étant restées dans les mêmes parcs, l'épisode pluvieux du 6 au 9 juillet n'a pas suffi à relancer la pousse de la végétation : la régénération du fourrage a été trop faible, et le taux de matière sèche du fourrage semble avoir eu un impact plus marqué sur la consommation en eau que les précipitations régulières observée durant ces quelques jours.

En résumé, trois situations principales se distinguent. Les **périodes pluvieuses** prolongées se caractérisent par des **températures basses et une consommation d'eau faible et stable**. Les **périodes sèches prolongées** sont, quant à elles, associées à des **températures plus élevées et**

à une **consommation moyenne plus importante**, même si certaines anomalies peuvent apparaître. Enfin, les **épisodes de pluies intenses mais isolées** entraînent une **forte variabilité journalière** et une **réactivité rapide de la consommation** mais n'ont que **peu d'impact sur le moyen terme**.

6.3.1 Variabilité intra-journalière et facteurs déterminants

La **variabilité intra-journalière** de la consommation d'eau peut également être analysée en relation avec les précipitations et les températures. Deux journées pluvieuses, à un mois d'écart, le 7 juin et le 7 juillet, illustrent bien cette relation. Le 7 juin, la température moyenne était de **10,9°C** et les précipitations ont atteint **37,6 mm**, alors que le 7 juillet, la température moyenne était de **9,5°C** avec **29,8 mm** de précipitations. La consommation d'eau ce jour-là était de **7 L/UGB**, identique à celle du 7 juin. Les deux journées présentent un profil relativement similaire, avec des précipitations importantes, des températures moyennes proches et une consommation par UGB comparable. Cependant, la répartition de la consommation au cours de la journée diffère.

Le **7 juin** (Fig. 72), aucune consommation d'eau par le bétail n'est observée avant 17h, car les précipitations survenues durant la nuit ont humidifié l'herbe, réduisant ainsi le besoin en eau du bétail le matin et pendant une grande partie de l'après-midi. Un pic de consommation apparaît en fin de journée entre 20h et 23h, avec **84 L consommés en une heure à 21h**. Le nombre de têtes de bétail étant encore de 55 sur l'alpage à cette date, la consommation reste donc relativement faible au regard du nombre d'animaux, l'humidité de l'herbe ayant en

Consommation journalière : 07.06.2025

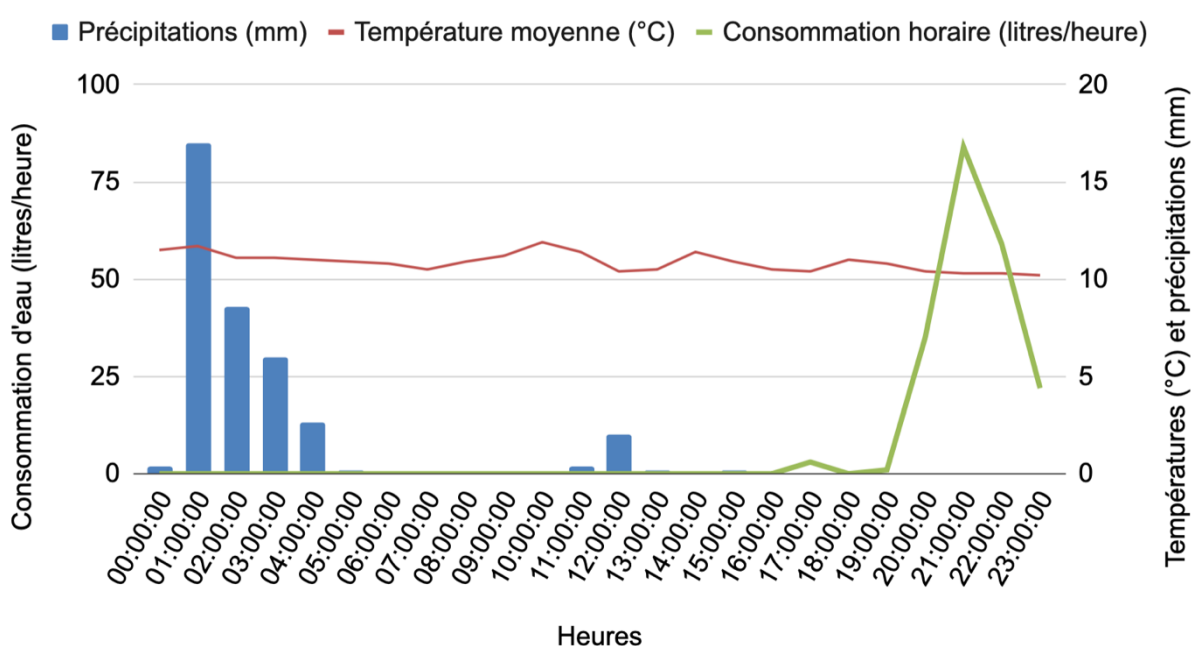


Figure 72. Consommation du bétail à la Perroude de Vaud le 07.06.2025, liée avec la température moyenne et les précipitations. Les données climatiques proviennent de la station Agroscope des Amburnex (alt. 1321 m), située à 4,4 km de l'alpage (Roulin, 2025)

grande partie compensé leurs besoins en eau via l'abreuvement. En effet, la quantité importante de précipitations et la courte durée de l'événement pluvieux font penser à **un orage, un épisode météorologique intense**. Un événement pluviométrique notable peut ainsi influencer fortement la consommation d'eau, en la retardant au cours de la journée et en diminuant considérablement les quantités consommées.

Le **7 juillet** (Fig. 73), les précipitations étaient moins intenses et mieux réparties sur la journée, ce qui a entraîné deux pics de consommation principaux à **9h et 12h**, correspondant notamment aux interruptions de pluie. Ces pics coïncident également avec les maxima de température, **10,9°C et 11,9°C**. Dans ce cas, la consommation d'eau dépend à la fois de la répartition des précipitations et des variations de température au cours de la journée.

Consommation journalière : 07.07.2025

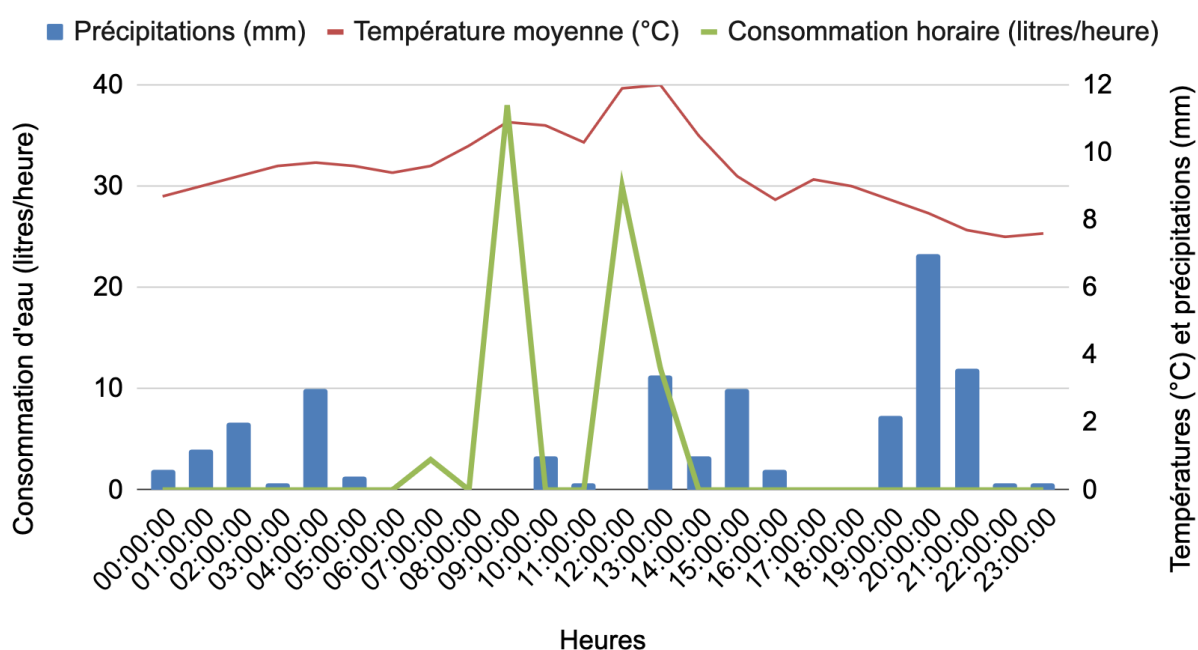


Figure 73. Consommation du bétail à la Perroude de Vaud le 07.07.2025, liée avec la température moyenne et les précipitations. Les données climatiques proviennent de la station Agroscope des Amburnex (alt. 1321 m), située à 4,4 km de l'alpage (Roulin, 2025)

Contrairement aux journées du 7 juin et du 7 juillet, le **30 juin** (Fig. 74) a été marqué par une **sécheresse importante et l'absence totale de précipitations**, avec une température maximale atteignant 27,3 °C. Ce profil confirme que la nuit demeure la période creuse, sans consommation d'eau par le bétail. Cependant, il apparaît que les températures influencent fortement la consommation lorsque les précipitations sont inexistantes. Lors de cette journée très chaude, l'abreuvement commence plus tôt le matin, dès 7 h, et se poursuit jusqu'en fin de soirée, vers 21 h, avec des pics marqués.

Consommation journalière : 30.06.20265

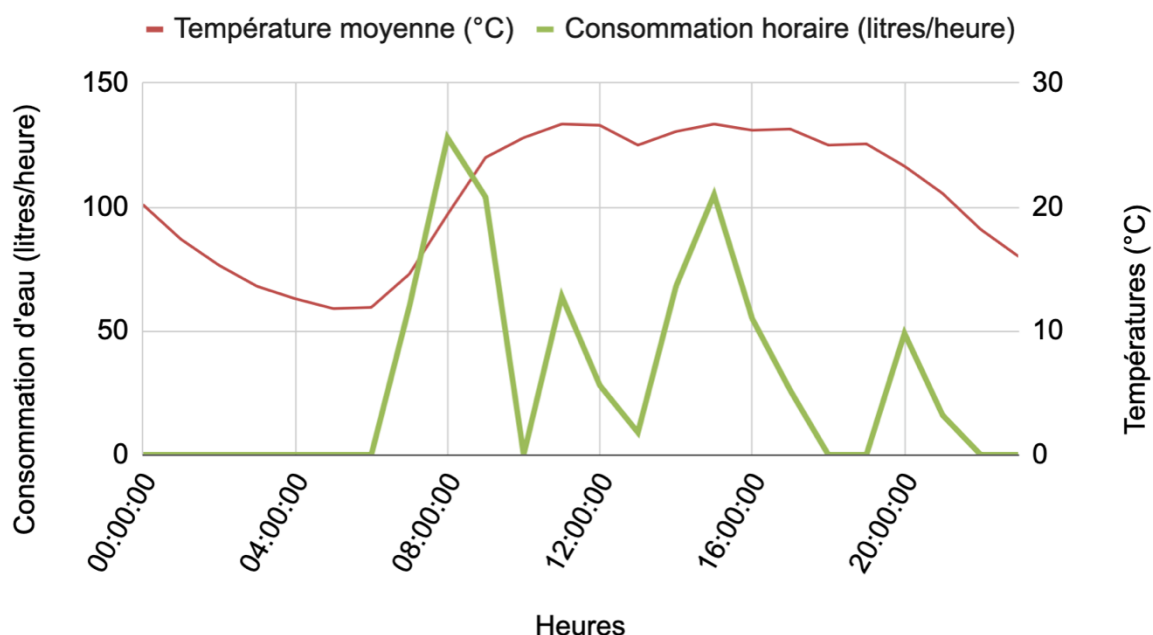


Figure 74. Consommation du bétail à la Perroude de Vaud le 30.06.2025, liée avec la température moyenne. Les données climatiques proviennent de la station Agroscope des Amburnex (alt. 1321 m), située à 4,4 km de l'alpage (Roulin, 2025)

En conclusion, la répartition intra-journalière de la consommation d'eau par le bétail est fortement influencée par **l'humidité du fourrage et les précipitations**. Les journées pluvieuses peuvent entraîner une faible consommation lorsque l'herbe est déjà humidifiée, tandis que les interruptions de pluie et les variations de température génèrent des pics de consommation.

De plus, en l'absence de précipitations, ce sont **les températures, notamment en après-midi**, qui influencent la consommation en l'augmentant durant la période la plus chaude de la journée. Ainsi, pour comprendre la consommation quotidienne, il est essentiel de considérer non seulement les quantités totales de précipitations et les températures moyennes, mais également leur répartition horaire.

7. Discussion

Cette discussion vise à interpréter les résultats obtenus à travers le protocole de suivi mis en place sur l'alpage de la Perroude de Vaud, en les replaçant dans le cadre plus large de la problématique de départ : comment les **conditions climatiques** et les **pratiques pastorales** influencent-elles la disponibilité et la consommation d'eau dans les alpages du Jura vaudois ?

À partir de cette question, la discussion s'organise en deux volets complémentaires. Le premier volet explore l'influence des conditions climatiques sur la dynamique hydrique de l'alpage. Il s'appuie notamment sur **l'analyse des facteurs environnementaux et de la végétation**, tout en confrontant les résultats obtenus à la Perroude de Vaud avec ceux issus de la littérature scientifique concernant la consommation d'eau par le bétail.

Le second volet se concentre sur **le rôle des pratiques pastorales**, en examinant les choix de gestion du troupeau et le mode de production de l'exploitation. Cette double approche permet de mieux comprendre les interactions entre les pressions climatiques, les caractéristiques du milieu et les décisions de gestion, dans un contexte de changement global affectant directement les ressources en eau en milieu montagnard.

Les résultats obtenus en termes de consommation d'eau du bétail sont ensuite **comparés aux données de la littérature**. Enfin, différents **types d'adaptation** observés à la Perroude de Vaud sont analysés, en mettant en lumière leurs impacts sur la consommation hydrique.

7.1 L'influence des conditions climatiques sur la consommation d'eau du bétail en alpage

Les résultats, issus de données concrètes sur la consommation d'eau du bétail en conditions d'alpage, montrent que les conditions climatiques et environnementales jouent un rôle central dans la dynamique de consommation hydrique, en particulier durant la période estivale, marquée par une forte variabilité des paramètres climatiques.

Conformément à la littérature examinée, les **épisodes de forte chaleur** entraînent une **augmentation significative de la consommation d'eau du bétail**, comme cela a été observé durant la seconde moitié du mois de juin sur l'alpage de la Perroude de Vaud. Cette tendance se traduit par une **corrélation positive** ($r = 0,70$) entre le nombre de litres d'eau consommés par UGB et la température maximale journalière, comme le soulignent également Ménard et al. (2012).

Au-delà de l'effet de la température, la **teneur en matière sèche du fourrage** influence aussi fortement les besoins en eau du bétail. Selon Stockdale et King (1983), les bovins nourris exclusivement à l'herbe couvrent environ 28 % de leurs besoins hydriques via l'abreuvement, le reste provenant de l'eau contenue dans le fourrage frais. Ce ratio s'applique particulièrement

en alpage, où le bétail pâture essentiellement de l'herbe fraîche sans apport alimentaire extérieur.

À la Perroude de Vaud, il a été observé que plus le fourrage est sec, plus les animaux augmentent leur consommation d'eau pour compenser ce déficit, conformément aux résultats d'Olkowski (2009). La **corrélation très forte** ($r = 0,89$) entre la consommation d'eau par UGB et la teneur en matière sèche souligne l'importance de cette dernière dans la **régulation de la consommation d'eau** et dans **l'estimation des besoins hydriques**, comme le montrent également Holter (1992). Cette proportion varie en fonction de la qualité du fourrage, des conditions climatiques, du niveau d'activité des animaux et de leur production laitière, ce qui met en évidence la nécessité d'intégrer ces variations locales pour affiner l'estimation des besoins hydriques.

Sur l'alpage de la Perroude de Vaud, le phénomène de l'assèchement du fourrage est particulièrement marqué dans les **milieux ouverts du pâturage**, contrairement au sous-bois encore vert malgré l'épisode sec de juin. Cela s'explique par les caractéristiques des prairies locales : prairies maigres, sols peu épais et forte infiltration, rendant la disponibilité en eau du fourrage très sensible aux conditions météorologiques. De plus, **l'apport de fourrage extérieur** par l'amodiateur peut renforcer cette relation, car le bétail reçoit alors un fourrage plus sec (environ 90% de matière sèche), ce qui incite les animaux à augmenter leur consommation d'eau d'abreuvement.

La **réduction des précipitations estivales** a également des conséquences majeures sur la gestion de la ressource en eau. La **corrélation négative modérée** ($r = -0,52$) observée entre la consommation d'eau par tête et les précipitations indique que, lors de périodes pluvieuses, le bétail boit moins, probablement parce qu'il obtient une part plus importante de son eau via une alimentation plus humide, comme le soulignent Boudon et al. (2013). En période de sécheresse, la **diminution de l'humidité naturelle** contenue dans l'herbe entraîne une **augmentation de la consommation d'eau d'abreuvement**.

La forte variabilité des précipitations, notamment liée à des événements extrêmes, influence également l'équilibre entre disponibilité et demande en eau (Zwicke et al., 2013). L'événement orageux du 7 juin 2025 (Fig. 68) illustre bien ce phénomène : l'eau apportée par cet épisode pluvieux intense a retardé la consommation d'eau en fin de journée, car l'humidité contenue dans l'herbe restait suffisante pour le bétail pendant la majeure partie de la journée, réduisant ainsi de manière significative la consommation d'eau consommée par le bétail (7 L/UGB/jour).

Dans ce contexte, le **changement climatique** - marqué par des étés plus longs, plus chauds et plus secs - pourrait accentuer ces dynamiques, en aggravant à la fois le **dessèchement du fourrage** et le **stress hydrique des animaux**, rendant ainsi l'accès à l'eau d'abreuvement encore plus crucial pour le maintien du bien-être et des performances du bétail.

En résumé, cette étude confirme que les conditions climatiques agissent simultanément sur **l'offre** (disponibilité de la ressource) et sur la **demande** (consommation animale), en interagissant notamment à travers des facteurs tels que la température, la pluviométrie ou la

qualité du fourrage. Cette double influence met en évidence la complexité de la gestion de l'eau en alpage, et souligne la nécessité d'intégrer ces paramètres dans les stratégies de gestion durable.

7.2 Le rôle des pratiques pastorales dans la gestion de l'eau

Les résultats obtenus dans ce travail mettent également en évidence l'**importance capitale des pratiques pastorales** dans la dynamique de consommation et de gestion de l'eau en alpage. Loin d'être un facteur secondaire, la gestion du troupeau et des infrastructures hydrauliques apparaît comme un levier central, influençant à la fois la demande en eau du bétail et la pression exercée sur les ressources disponibles.

Sur l'alpage de la Perroude de Vaud, plusieurs caractéristiques spécifiques du troupeau ont contribué à une consommation modérée d'eau. Le cheptel est composé de **vaches Grises rhétiques**, une **race rustique**, de plus petite taille et mieux adaptée aux conditions de sécheresse que les races laitières conventionnelles. Cette adaptation morphologique et physiologique se traduit par des **besoins hydriques réduits**, comme en témoignent les mesures réalisées durant le suivi : la consommation moyenne s'élève à **34 litres par UGB et par jour**⁴², une valeur relativement basse au regard des données issues de la littérature⁴³. Ce niveau de consommation s'explique également par le type de production : il s'agit de **vaches allaitantes**, dont les besoins en eau sont nettement inférieurs à ceux des vaches laitières, en l'absence de production laitière intensive.

Durant la période prise en compte dans ce travail pour l'alpage de la Perroude de Vaud, un certain nombre de vaches étaient en gestation. Dès la fin juillet, période non couverte par les données analysées ici, ces vaches ont mis bas et ont commencé à allaiter leurs veaux, ce qui a pu entraîner une augmentation supplémentaire de leur consommation en eau. Comme le démontre Luke (1987), le stade physiologique des animaux influence significativement l'évolution de leur consommation au cours de la saison. Selon Ménard et al. (2012), l'entrée progressive des vaches en gestation, puis en allaitement, s'accompagne d'une augmentation des besoins hydriques, phénomène d'autant plus marqué lorsque les conditions climatiques sont chaudes et sèches.

Les **pratiques de gestion** des parcs influencent de manière significative la consommation en eau du bétail. En début de saison, les animaux changeaient de parc environ chaque semaine, en fonction de la disponibilité et de la qualité du fourrage, ce qui permettait une exploitation relativement équilibrée des pâtures. Toutefois, à partir de la mi-juin, le troupeau est resté **plusieurs semaines dans le parc B4**, un espace relativement vaste, caractérisé par une forte

⁴² Ce chiffre doit être interprété avec précaution, car il repose sur seulement deux mois de mesures. De plus, au moment de la rédaction de ce mémoire, l'alpage connaît une vague de chaleur, qui fera très probablement augmenter la consommation d'eau du bétail.

⁴³ GDS Réseau 3M'. (s. d.). *Bovins – Qualité de l'eau – Abreuvement*. Dernière consultation le 23 juillet 2025, à l'adresse https://gdsreseau3m.com/?page_id=1373

présence de sous-bois. Selon l'amodiataire, ces zones nécessitent une pression de pâture importante afin de limiter la recolonisation forestière et de maintenir les surfaces pâturables ouvertes (Gallandat et al., 1995 ; Gallandat et Gillet, 1999 ; Humbert, F.-L., 2025, comm. pers.).

La présence prolongée du bétail dans ce parc, combinée à la période de sécheresse survenue dès la mi-juin, a conduit à une **pression de pâture accrue dans les zones boisées** (Humbert, F.-L., 2025, comm. pers.). Cette concentration du bétail sur un même secteur pendant une période prolongée a également entraîné une pression accrue sur les ressources hydriques localisées. Dans le cas présent, cela n'a pas posé de problème, car les ressources en eau disponibles étaient suffisantes pour répondre à cette demande prolongée.

En complément de la végétation de sous-bois pâturable, le bétail a également bénéficié d'un **apport en fourrage**. Selon l'amodiataire, cet apport était idéal mais pas indispensable, même dans le contexte de l'herbage très sec observé dès la fin juin (Humbert, F.-L., 2025, comm. pers.). Le fourrage distribué provenait principalement de stocks dits "ratés", c'est-à-dire des réserves qui auraient pourri avant l'automne si elles n'avaient pas été utilisées, représentant environ 1000 kg de matière sèche (MS) (Humbert, F.-L., 2025, comm. pers.).

Toutefois, cet apport n'a pas été jugé très conséquent par l'amodiataire : les animaux ont majoritairement continué à privilégier la végétation disponible dans les sous-bois. Par ailleurs, la quantité supplémentaire de matière sèche apportée étant relativement faible, elle ne devrait pas avoir entraîné une augmentation significative de la consommation en eau du bétail (Humbert, F.-L., 2025, comm. pers.).

La **configuration des infrastructures hydrauliques** joue également un rôle déterminant dans le comportement du bétail (Buttler, Spiegelberger et al., 2012). Chaque parc de l'alpage étant **équipé d'un seul bassin**, le troupeau tend à se concentrer autour du point d'eau, en particulier lors des pics de chaleur. Cette configuration explique en partie la dynamique de déplacement des animaux au cours de la journée, avec des **pics de consommation** observés lorsque les vaches se déplacent généralement en groupe pour s'abreuver simultanément.

Cette organisation spatiale **limite les déplacements** du bétail sur l'ensemble de la surface du parc. En période chaude, les animaux cherchent en effet à minimiser leurs déplacements pour économiser leur énergie. Il en résulte une concentration spatiale du troupeau autour du point d'abreuvement, entraînant plusieurs effets indésirables : piétinement intense, surexploitation localisée du couvert végétal à proximité des bassins, tandis que d'autres parties du parc sont peu fréquentées voire abandonnées, favorisant ainsi la reprise forestière (Gallandat et al., 1995 ; Gallandat et Gillet, 1999).

Ce phénomène est particulièrement visible dans le parc B1, selon l'amodiataire. Dans ce cas, le point d'eau étant situé à l'extrémité du parc, et la forme du parc étant allongée, les déplacements du bétail vers le fond du parc sont relativement rares, ce qui **favorise l'embroussaillage** de cette zone. Pour pallier cela, l'amodiataire installe parfois une bossette (distribution ponctuelle d'eau) au fond du parc afin d'attirer les animaux et encourager le pâturage de ces zones peu utilisées. Il procède également, lorsqu'il le juge

nécessaire, à un débroussaillage manuel (Humbert, F.-L., 2025, comm. pers.). Cette tendance à l'abandon de certaines sections de l'alpage n'est toutefois pas observée dans les autres parcs, soit parce que ceux-ci sont de taille plus réduite, soit parce que le bassin y est installé de manière centrale, favorisant une utilisation plus homogène de l'espace (Humbert, F.-L., 2025, comm. pers.).

Par ailleurs, cette configuration limite la répartition spatiale de la consommation d'eau, ce qui peut accentuer le **stress hydrique localisé**, surtout en période de sécheresse. La disponibilité d'un unique point d'eau peut également intensifier la **compétition entre les animaux**. L'amodiatraire de la Perroude de Vaud a observé que, lorsque le bétail était pressé de venir boire, les vaches pouvaient renverser les bassins en plastique, se battant parfois pour l'accès à l'eau (Humbert, F.-L., 2025, comm. pers.). Ce comportement, combiné au fait que les vaches boivent souvent en groupe et simultanément, entraîne une vidange rapide des bassins d'environ 300 litres. Ces derniers, du fait de leur légèreté, sont donc facilement déplacés voire renversés par le bétail. Ce phénomène peut ainsi limiter localement la disponibilité en eau, notamment en cas de problèmes de remplissage du bassin unique dans le parc.

Enfin, la **demande globale en eau à l'échelle de l'alpage reste relativement faible** comparée à des systèmes d'élevage plus intensifs. L'absence de transformation laitière sur place - notamment la fabrication de fromage - ainsi que l'absence de personnel permanent au chalet, rendue possible par le type de troupeau composant l'exploitation, limitent les besoins en eau pour les usages domestiques et le nettoyage du matériel.

Ces observations soulignent que la gestion pastorale, tant dans ses dimensions pratiques que dans l'organisation des infrastructures, constitue un levier essentiel pour comprendre et anticiper les dynamiques de consommation d'eau en alpage. Elles mettent également en lumière la nécessité d'adapter les modèles d'estimation de la consommation aux spécificités des systèmes extensifs de montagne, qui s'écartent souvent des standards des élevages intensifs de plaine.

7.3 Comparaison avec les modèles existants

Ces observations de terrain permettent également d'évaluer la pertinence des modèles théoriques existants, tels que celui proposé par Cardot et al. (2008), qui estime la consommation journalière en eau d'un bovin en fonction de plusieurs paramètres (chapitre 5.1). Pour appliquer ce modèle, les données suivantes ont été retenues : une ingestion moyenne de **7 kg⁴⁴ de matière sèche par jour**, selon Boessinger (2010), et **une production**

⁴⁴ Le choix de retenir une consommation moyenne de **7 kg de matière sèche (MS) par jour et par bovin** s'explique par le fait qu'au moment de l'observation, les vaches de l'alpage de la Perroude de Vaud étaient encore en période de gestation et non en phase de lactation. Or, la consommation de matière sèche tend à augmenter dès le début de la lactation. La valeur retenue correspond par ailleurs aux besoins moyens des vaches d'Hérens, dont le gabarit et le poids sont proches de ceux des Grises rhétiques.

laitière nulle, les vaches étant en gestation et donc en phase de tarissement, ce qui signifie qu'elles ne produisent pas de lait.

Comme la formule de Cardot et al. (2008) permet d'estimer la consommation d'eau pour une UGB, correspondant à une vache laitière, la cohérence de la comparaison a été assurée en lissant l'ensemble des données sur cette base de 1 UGB (AGRIDEA, 2023). Cette approche permet d'obtenir des valeurs comparables et indépendantes des variations liées au type précis d'animal ou à son stade physiologique. Il convient néanmoins de rappeler que ces consommations peuvent fluctuer en fonction des conditions environnementales, des pratiques pastorales et du type de bétail, introduisant ainsi une marge d'incertitude dans l'interprétation des résultats. Dans le cas présent, la confrontation entre les données mesurées sur le terrain et les valeurs estimées par le modèle montre des différences notables.

Les résultats obtenus montrent que la formule de Cardot et al. (2008) ne reproduit pas fidèlement les consommations d'eau mesurées à la Perroude de Vaud. De manière générale, elle tend à **sous-estimer de façon notable la consommation en eau d'un UGB**, ce qui peut conduire à une appréciation incomplète des besoins réels en eau du bétail en alpage.

Les résultats de l'analyse des données révèle également que le modèle ne rend pas pleinement compte de l'effet de la température, en particulier lors des pics thermiques, qui ressortent fortement dans les mesures de terrain mais apparaissent très atténués dans les estimations théoriques. Cette différence peut s'expliquer par le fait que l'équation utilise uniquement la température minimale journalière, ce qui limite sa sensibilité aux variations rapides et extrêmes des conditions météorologiques.

Ainsi, bien que le modèle intègre des paramètres physiologiques et environnementaux essentiels, il ne reflète pas totalement la réalité observée sur le terrain, notamment dans des contextes climatiques contrastés comme ceux rencontrés à la Perroude de Vaud. Ces limites rappellent l'importance de calibrer et d'adapter l'outil aux spécificités locales afin d'améliorer la précision des estimations et d'éviter des sous-évaluations susceptibles d'impacter la planification de l'approvisionnement en eau.

7.4 Stratégies d'adaptation

La gestion durable des alpages face aux contraintes climatiques croissantes, notamment la sécheresse et les fortes chaleurs, impose la mise en œuvre de **stratégies d'adaptation variées**. Celles-ci visent à optimiser l'utilisation des ressources en eau et la préservation du couvert fourrager, tout en maintenant la performance pastorale. Toutefois, les mesures d'adaptation adoptées en contexte de crise sont très variables et dépendent des caractéristiques propres à chaque alpage, telles que les infrastructures en place, la surface disponible, le type d'exploitation ou encore la composition du troupeau (Reynard et al., 2024).

Par ailleurs, l'analyse climatique a mis en évidence l'existence de plusieurs profils d'années sèches, influençant différemment l'adaptation des exploitants selon la durée et l'intensité des

périodes de sécheresse. Bien que la typologie des sécheresses constitue un facteur déterminant dans les choix d'adaptation, elle reste difficile à anticiper. L'étude de l'alpage de la Perroude de Vaud permet d'illustrer concrètement la manière dont certaines pratiques peuvent répondre à ces défis dans un contexte montagnard marqué par une forte variabilité climatique.

Selon Reynard et al. (2024), la **répartition temporelle des périodes de pâturage naturel** (PN) constitue un levier important pour faire face aux sécheresses estivales. La hausse des températures influence la durée possible d'estivage, rendant envisageable une montée plus précoce et/ou une descente plus tardive du bétail, ce qui permettrait de réduire la charge sur les mois les plus chauds (juillet et août). À la Perroude de Vaud, en 2025, le troupeau est monté dès la fin mai, facilité par une couverture neigeuse faible qui a permis un accès précoce aux pâturages (Humbert, F.-L., 2025, comm. pers.). Si cette décision n'avait pas pour objectif explicite de constituer une mesure d'adaptation climatique, elle peut néanmoins contribuer, dans certaines situations, à limiter la pression sur l'alpage en valorisant plus tôt les ressources fourragères disponibles, avant les pics de chaleur de l'été et les déficits de précipitations attendus, tout en réduisant la consommation de fourrage en plaine. Une telle stratégie est d'ailleurs mentionnée comme mesure d'adaptation potentielle par Schneider et Feller (2024).

La **gestion des parcelles** a également été ajustée de manière souple, en fonction de la repousse du fourrage, particulièrement affectée lors de périodes prolongées de déficit de précipitations. À la Perroude de Vaud, les enjeux liés à l'eau **concernent principalement le fourrage**, car l'alpage dispose d'infrastructures hydriques qui assurent un bon apport en eau pour l'abreuvement du bétail (Humbert, F.-L., 21 septembre 2023⁴⁵). Cela implique que la **rotation entre les parcs doit être rapide** pour éviter une surcharge du pâturage et préserver la capacité de régénération des prairies, une condition également déterminante pour la productivité des années suivantes (Reynard et al., 2024). En 2025, l'apport de fourrage complémentaire, combiné au pâturage dans les sous-bois, a permis à l'amodiatrice de maintenir le troupeau plusieurs semaines dans un même parc. Cette stratégie a eu pour effet de laisser aux autres zones un temps de repousse plus long, favorisant ainsi une meilleure répartition dans le temps de la pression pastorale (Humbert, F.-L., 2025, comm. pers.).

Par ailleurs, cette gestion a également favorisé une utilisation accrue de la **végétation du sous-bois** pâturables, souvent moins exploitées dans les pratiques traditionnelles. Le pâturage en sous-bois représente une stratégie d'adaptation émergente, permettant non seulement de diversifier les ressources fourragères disponibles, mais aussi d'améliorer le confort thermique du bétail en période de fortes chaleurs, grâce à l'ombrage offert par les arbres. Cette approche contribue ainsi à une gestion plus résiliente et multifonctionnelle des espaces pastoraux face au changement climatique.

⁴⁵ Entretien avec François-Lionel Humbert, amodiatrice de la Perroude de Vaud, réalisé le 21 septembre 2023 dans le cadre de l'étude de Reynard et al. (2024).

Dans les situations extrêmes, lorsque le pâturage ne suffit plus à couvrir les besoins alimentaires du troupeau, un **apport complémentaire en fourrage** sec devient nécessaire. Cette pratique permet de compenser la baisse de qualité et de quantité du fourrage naturel, tout en préservant le sol d'une dégradation excessive due à une pression de pâture trop importante. À la Perroude de Vaud, l'amodiatrice a souligné que ce type d'apport est surtout pratiqué **en fin de saison**, lorsque le fourrage peine à se régénérer. Dans ces cas, et lorsque les quantités distribuées sont importantes, la consommation en eau du bétail peut s'en trouver augmentée (Humbert, F.-L., 2025, comm. pers.). Cependant, cette stratégie présente plusieurs limites. Elle génère des coûts supplémentaires, mobilise des ressources hivernales en fourrage destinées normalement à l'affouragement en étable, et entraîne une hausse de la consommation en eau, en raison de l'alimentation plus riche en matière sèche (Reynard et al., 2024).

Le **choix des races animales** constitue un autre levier important d'adaptation. Comme le rappellent Schneider et Feller (2024), certaines races rustiques sont mieux adaptées aux conditions montagnardes et ont des besoins hydriques moindres. C'est le cas des vaches Grises rhétiques présentes à la Perroude de Vaud, qui sont robustes, adaptées aux reliefs, et moins exigeantes en eau que des races laitières plus productives. Cette adéquation entre les caractéristiques du troupeau et les conditions locales illustre l'importance d'une adaptation fine des pratiques d'élevage (Humbert, F.-L., 21 septembre 2023 ; Reynard et al., 2024).

Au-delà de ces ajustements ponctuels, des **adaptations structurelles** apparaissent nécessaires pour garantir la durabilité des alpages dans un contexte de changement climatique. Cela inclut notamment l'augmentation des capacités de stockage d'eau, par l'installation de citernes de plus grand volume ou la création d'étangs permettant de stocker des quantités d'eau plus importantes. Il s'agit aussi d'optimiser la distribution spatiale des points d'eau, en multipliant les bassins pour éviter la surconcentration du bétail autour d'un unique point d'abreuvement. La récupération des eaux de pluie et de fonte de neige, ainsi que le raccordement aux réseaux publics lorsque cela est possible, figurent également parmi les options à considérer.

Le protocole de suivi de la consommation d'eau développé et mis en œuvre dans le cadre de ce mémoire, notamment sur le site de la Perroude de Vaud, constitue un outil précieux pour analyser ces dynamiques. Il offre une base empirique solide pour documenter les réponses mises en place face aux pressions climatiques et pour envisager des solutions transférables à d'autres alpages confrontés à des défis similaires dans le cadre du changement global.

8. Conclusion et perspectives

Ce chapitre de conclusion revient d'abord sur les **principaux résultats** obtenus en lien avec la question de recherche. Il propose ensuite une **discussion des limites et des enseignements** majeurs issus de ce projet et de cette étude, avant de s'ouvrir sur des **pistes de réflexion** et d'action pour les recherches et pratiques futures.

8.1 Conclusion

Ce travail met en évidence que la gestion de l'eau dans les alpages du Jura vaudois résulte d'**interactions complexes** entre les conditions climatiques, les pratiques pastorales et les décisions liées à l'exploitation. Les déterminants sont nombreux et interdépendants, et influencent de manière significative la consommation en eau du bétail. Cette dynamique a pu être observée notamment à travers l'analyse des alpages du Bucley/Pré d'Etoy et de la Perroude de Vaud. Au-delà de leur situation géographique et de leur hydrogéologie, et bien que leurs ressources dépendent principalement des précipitations, les pratiques pastorales et la gestion de l'exploitation diffèrent grandement : infrastructures hydrauliques, type de production (laitière ou allaitante), transformation du lait sur place ou non, type de bétail et sensibilité de ce dernier à la sécheresse.

Le **contexte climatique jurassien** s'est également révélé être un facteur déterminant de la demande en eau, avec des évolutions significatives telles que l'augmentation des températures et la prolongation des périodes de sécheresse et de déficit de précipitations. Ces déterminants ont permis de mieux comprendre les pressions externes et internes auxquelles est soumise la gestion de l'eau dans les alpages étudiés, notamment en lien avec le remplissage des stocks d'eau et l'utilisation de l'eau pendant la période estivale, tant pour les besoins de l'alpage que pour ceux de la végétation pâturée.

Concernant la mise en place du dispositif de suivi, les premières expériences sur l'alpage du Bucley/Pré d'Etoy ont permis d'**identifier les points forts et les limites de la méthodologie** envisagée. Cette phase exploratoire a été précieuse pour anticiper les difficultés et a constitué une base solide pour le premier test du protocole sur l'alpage de la Perroude de Vaud. La mise en œuvre du protocole à la Perroude de Vaud a permis de collecter les premières données sur la consommation d'eau.

Malgré la limitation de la période d'observation aux deux premiers mois de la saison d'estivage pour des raisons de calendrier académique, les résultats obtenus confirment que la consommation d'eau du bétail est **fortement influencée par les facteurs environnementaux**, en particulier la température, la disponibilité en eau liée aux précipitations et la qualité du fourrage, qui varie au cours de la saison. Les périodes de forte chaleur et de sécheresse entraînent une augmentation notable des besoins en eau, accentuée par la baisse progressive de la qualité hydrique du fourrage.

Par ailleurs, les **pratiques pastorales** constituent également des déterminants majeurs de la consommation d'eau. La composition du troupeau, la gestion spatiale des parcs et l'organisation des infrastructures d'abreuvement modulent à la fois la demande en eau et la pression exercée sur les ressources. L'étude a montré que certains choix de gestion, tels que le maintien prolongé du bétail dans certaines zones ou l'apport de fourrage complémentaire, peuvent entraîner des variations significatives de la consommation, tandis que la configuration des points d'eau influence le comportement animal et la répartition spatiale de l'eau consommée.

Enfin, ce travail souligne que la gestion durable de l'eau en alpage nécessite une **approche intégrée**, prenant en compte à la fois les conditions climatiques, les caractéristiques écologiques et les décisions humaines. Dans un contexte de changement climatique marqué par des étés plus longs et plus secs, il devient essentiel d'adapter les pratiques pastorales et d'optimiser les infrastructures hydrauliques pour garantir le bien-être des animaux et la pérennité des systèmes d'élevage montagnards.

Ces conclusions ouvrent ainsi des perspectives concrètes pour améliorer la gestion de l'eau dans les alpages du Jura vaudois, en conciliant exigences environnementales et besoins pastoraux, et constituent une base précieuse pour des suivis futurs et des stratégies d'adaptation aux défis climatiques à venir.

8.2 Limites et enseignements

Ce travail de suivi de la consommation en eau sur l'alpage de la Perroude de Vaud a permis de collecter des données précieuses, mais plusieurs limites importantes doivent être soulignées.

La phase de test menée sur l'alpage de la Perroude de Vaud présente des **limites en termes de représentativité** : les résultats obtenus s'inscrivent dans un contexte local particulier et ne sauraient être généralisés à l'ensemble des alpages jurassiens, voire suisses. De plus, l'étude repose sur une seule saison d'observation, elle-même incomplète, sans prise en compte de la variabilité interannuelle ni des évolutions possibles des pratiques pastorales (effectif du troupeau, fréquence de rotation), ce qui limite la portée et la possibilité de généraliser les conclusions.

Sur le **plan technique**, certaines lacunes persistent. Sur l'alpage de la Perroude de Vaud, la consommation du bassin B1 n'a pas été mesurée, créant une lacune dans la base de données. Par ailleurs, les données météorologiques proviennent d'une station relativement éloignée, ce qui réduit la précision, notamment lors d'épisodes orageux très localisés.

Enfin, la **consommation liée aux infrastructures annexes** telles que la fromagerie ou le chalet n'a pas été prise en compte, ce qui limite la compréhension globale des besoins hydriques. De plus, ce dispositif de suivi mériterait d'être complété par un suivi plus précis et régulier de la végétation, notamment afin de déterminer avec davantage de précision le pourcentage de matière sèche du fourrage.

Il est également important de souligner qu'après l'arrêt du suivi ayant permis les résultats présentés dans ce mémoire, un **dysfonctionnement** est survenu sur l'une des installations hydrauliques de la Perroude de Vaud. Une fuite au niveau d'un bassin, causée par la rupture d'une jointure sur un compteur d'eau, a entraîné la vidange quasi complète des deux citernes de l'alpage. Cette situation a nécessité l'intervention d'un camion-citerne pour réapprovisionner le site en eau, engendrant des coûts très importants et présentant un risque potentiel pour le bétail en cas de manque d'eau prolongé.

Cette expérience a également mis en évidence l'importance de la **protection du matériel de mesure**. En effet, ce bassin était le seul qui n'avait pas pu être installé avec l'exploitant, ce qui pourrait expliquer que le compteur ait été insuffisamment protégé, le bassin pas correctement ancré et que le tuyau se soit détaché, possiblement sous l'action des animaux. Ce point souligne la valeur de l'expérience et de la connaissance du troupeau par l'exploitant, qui sont essentielles pour anticiper ce type de problème et adapter la mise en place du dispositif de suivi.

Cette panne a perturbé la suite des mesures jusqu'à la fin de la saison, car le compteur a dû être retiré du bassin B2. Il ne restait donc plus que les bassins B3 et B4 équipés avec le matériel de suivi, limitant la continuité et la représentativité des données collectées.

Cet incident met en lumière la **vulnérabilité des systèmes hydrauliques**, même lorsqu'ils sont appuyés par une planification rigoureuse et une bonne connaissance des besoins et des contraintes du site. Il illustre le fait que des défaillances techniques ou des aléas imprévisibles peuvent survenir à tout moment, perturbant le bon déroulement d'un protocole de suivi ou compromettant temporairement l'alimentation en eau du bétail.

Malgré ces contraintes, la **simplicité et la fiabilité du dispositif**, couplées à l'**implication active de l'amodiateur**, ont facilité la collecte régulière des données et leur interprétation. Ce travail a permis de mettre en lumière des liens pertinents entre consommation d'eau, conditions environnementales et pratiques pastorales. Il a aussi démontré la faisabilité d'un suivi hydrique en contexte montagnard, un domaine encore peu exploré dans la littérature scientifique.

Les résultats obtenus fournissent une base précieuse pour anticiper et accompagner une gestion plus durable des ressources en eau en alpage face aux effets du changement climatique. Ils soulignent toutefois la nécessité d'étendre le nombre de sites de suivi et d'améliorer les méthodologies ainsi que les équipements de mesure, afin de renforcer la robustesse et la précision des analyses.

8.3 Perspectives

Sur la base de ce travail et de ses résultats, plusieurs pistes s'ouvrent pour le développement futur de ce dispositif de suivi. La première consiste à **appliquer cette méthodologie à d'autres alpages** aux profils et modes de production variés, afin d'évaluer l'impact de la diversité des contextes environnementaux et pastoraux sur la consommation d'eau. Cette perspective est

d'autant plus pertinente dans le cadre du projet de recherche Alp'eau, qui prévoit d'étendre le protocole à **un autre alpage du Jura vaudois** ainsi qu'à **deux alpages situés dans les Préalpes**, où les pratiques et les conditions sont différentes. Cela permettra notamment de mieux cerner les besoins spécifiques des alpages laitiers, dont la consommation en eau est généralement plus élevée.

Une autre perspective importante concerne l'intégration de la **consommation liée aux chalets d'alpage et aux fromageries** dans l'analyse. Ces infrastructures jouent un rôle clé dans les besoins hydriques totaux et leur prise en compte permettrait d'affiner considérablement l'évaluation des ressources nécessaires. De plus, il y aurait également un intérêt à intégrer les données sur la qualité de l'eau, en complément de la quantité consommée, pour avoir une vision plus globale de la gestion hydrique.

Enfin, une ouverture vers les **usages touristiques** des alpages pourrait également enrichir les analyses. Ces activités, souvent saisonnières mais à forte fréquentation, génèrent des consommations en eau spécifiques qui mériteraient d'être incluses dans les futurs suivis.

En conclusion, ce travail apporte une contribution précieuse à la compréhension des dynamiques de consommation d'eau dans les alpages, un enjeu crucial face aux défis posés par le changement climatique et l'évolution des pratiques pastorales. Au-delà des résultats spécifiques obtenus, il ouvre la voie à une meilleure intégration de la gestion de l'eau dans l'aménagement durable des territoires de montagne. En renforçant la collaboration entre scientifiques, gestionnaires et acteurs locaux, ce type d'étude constitue une étape essentielle pour préserver la résilience des alpages et assurer la survie des activités pastorales qui en dépendent.

9. Bibliographie

- Académies suisses des sciences. (2017). *L'eau en Suisse* (2e éd.). Swiss Academies Factsheets, 12(3). [https://scnat.ch/fr/uuid/i/77552ce9-fef2-5183-b96f-8eed4b6b7e12-Leau en Suisse](https://scnat.ch/fr/uuid/i/77552ce9-fef2-5183-b96f-8eed4b6b7e12-Leau_en_Suisse)
- AGRIDEA. (2023). *Contributions fédérales 2023 - Production laitière et élevage*. Lausanne : AGRIDEA. https://www.agridea.ch/fileadmin/AGRIDEA/Theme/Production_animales/Production_laitiere_et_elevage/1.11_contributions_federales23.pdf
- Appuhamy, J. A. D. R. N., Judy, J. V., Kebreab, E., & Kononoff, P. J. (2016). Prediction of drinking water intake by dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 99(9), 7191-7205. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-10950>
- Arbués, F., García-Valiñas, M. Á., & Martínez-Españeira, R. (2003). Estimation of residential water demand : A state-of-the-art review. *Journal of Socio-Economics*, 32, 81–102. [https://doi.org/10.1016/S1053-5357\(03\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S1053-5357(03)00005-2)
- Aubert, D. (1938). Les glaciers quaternaires d'un bassin fermé : la vallée de Joux (canton de Vaud). *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles*, 60, 117-127. <https://www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=bsv-002%3A1937%3A60%3A%3A127>
- Aubert, D. (1943). *Monographie géologique de la Vallée de Joux (Jura vaudois)* [Thèse de doctorat, Université de Lausanne]. Beiträge zur geologischen Karte der Schweiz, Nouvelle série, 78. A. Francke. https://www.histoirevalleedejoux.ch/articles/40_monographie_geologique_de_la_vallee_de_joux_par_daniel_aubert_1943
- Aubert, D. (1951). Le décrochement de Pontarlier et l'orogénèse du Jura. *Mémoires de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles*, 121, 93-152. <https://www.e-periodica.ch/digbib/view?lang=en&pid=msv-001%3A1958%3A12%3A%3A103>
- Aubert, D. (1953). La tectonique du Mont d'Or (Jura vaudois) et le décrochement de Vallorbe-Pontarlier. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 46, 175-186. <https://www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=egh-001:1953:46::183>
- Aubert D., Badoux H., Lavanchy Y. (1979). La carte structurale et les sources du Jura vaudois. *Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat.* 356(74), 333-343. <https://www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=bsv-002%3A1978%3A74%3A%3A344>
- Bichet, V., & Campy, M. (2008). *Montagnes du Jura : Géologie et paysages*. Besançon : Néo-Éditions.
- Boessinger, M., Emmenegger, J., Chassot, A., & Morel, I. (2010). Ingestion de fourrage et évolution du poids de vaches allaitantes suitées. *Recherche agronomique suisse*, 1(6), 222-227. <https://ira.agroscope.ch/fr-CH/publication/21708>
- Boudon, A., Khelil, H., Ménard, J.-L., Brunschwig, P., & Faverdin, P. (2013). Les besoins en eau d'abreuvement des bovins laitiers : déterminismes physiologiques et quantification. *INRA Productions Animales*, 26(3), 249-262. <https://hal.science/hal-01210449>
- Brunner, M. I., Gurung, S., Zappa, M., & Stähli, M. (2019). Future shifts in extreme flow regimes in Alpine regions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(11), 4471-4489. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4471-2019>
- Buttler, A., Gavazov, K., Peringer, A., Siehoff, S., Mariotte, P., Wettstein, J. B., Chételat, J., Huber, R., Gillet, F., & Spiegelberger, T. (2012). Conservation des pâturages boisés du Jura : défis climatiques et agro-politiques. *Recherche Agronomique Suisse*, 3(7-8), 346-353. <https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:4225>

- Buttler, A., Spiegelberger, T., Chételat, J., Kalbermatten, M., Lannas, K., Peringer, A., Wettstein, J.-B., & Gillet, F. (2012). Évolution récente et future des paysages sylvo-pastoraux du Jura vaudois. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 163(12), 469-480. <https://doi.org/10.3188/szf.2012.0469>
- Cardot, V., Le Roux, Y., & Jurjan, S. (2008). Drinking behavior of lactating dairy cows and prediction of their water intake. *Journal of Dairy Science*, 91(6), 2257-2264. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0204>
- Carozzi, A. (1948). *Étude stratigraphique et micrographique du Purbeckien du Jura suisse* (Thèse de doctorat, Université de Genève). Université de Genève. <https://www.e-periodica.ch/digbib/view?lang=fr&pid=ads-002%3A1948%3A1%3A%3A216>
- Colombié, C., & Rameil, N. (2007). Tethyan-to-boreal correlation in the Kimmeridgian using high-resolution sequence stratigraphy (Vocontian Basin, Swiss Jura, Boulonnais, Dorset). *International Journal of Earth Sciences*, 96(3), 567-591. <https://doi.org/10.1007/s00531-006-0117-3>
- Cominola, A., Preiss, L., Thyer, M., Beal, C. D., Rossi, F., Morgenroth, E., Stewart, R. A., & Ajami, N. K. (2023). The determinants of household water consumption : A review and assessment framework for research and practice. *npj Clean Water*, 6(1), 11. <https://doi.org/10.1038/s41545-022-00208-8>
- Croci-Maspoli, M., Scherrer, S., Schlegel, T., & Zubler, E. (2014). *Scénarios climatiques Suisse - un aperçu régional* (Rapport technique n° 243, 36 p.). MétéoSuisse. <https://www.meteosuisse.admin.ch/services-et-publications/publications/rapports-et-bulletins/2014/scenarios-climatiques-suisse---un-apercu-regional.html>
- Enay, R., Contini, D., & Boullier, A. (1988). Le Séquanien-type de Franche-Comté (Oxfordien supérieur) : Datations et corrélations nouvelles, conséquences sur la paléogéographie et l'évolution du Jura et régions voisines. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 81(2), 317–350. <https://doi.org/10.5169/seals-166182>
- European Environment Agency. (2024). *European climate risk assessment: Executive summary* (EEA Report 01/2024). <https://doi.org/10.2800/204249>
- Gallandat, J. D., Gillet, F., Havlicek, E., & Perrenoud, A. (1995). *Typologie et systématique phyto-écologiques des pâturages boisés du Jura suisse* (Rapport final de mandat, Offices fédéraux et cantonaux). Laboratoire d'écologie végétale, Université de Neuchâtel. https://www.researchgate.net/publication/233773165_Typologie_et_systemique_phyto-ecologique_des_paturages_boisees_du_Jura_Suisse
- Gallandat, J.-D., & Gillet, F. (1999). Le pâturage boisé jurassien. *Société neuchâteloise des sciences naturelles*, 122, 5-25. https://www.researchgate.net/publication/37457607_Le_paturage_boise_jurassien
- Gavazov, K., Peringer, A., Buttler, A., Gillet, F., & Spiegelberger, T. (2013). Dynamics of forage production in pasture-woodlands of the Swiss Jura Mountains under projected climate change scenarios. *Ecology and Society*, 18(1). <https://doi.org/10.5751/ES-04974-180138>
- Herzog, F., & Seidl, I. (2018). Swiss alpine summer farming: Current status and future development under climate change. *The Rangeland Journal*, 40(5), 501-511. <https://doi.org/10.1071/RJ18031>
- Holter, J. B., Hayes, H. H., & Urban, W. E., Jr. (1992). Water partitioning and intake prediction in dry and lactating Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 75(6), 1472-1479. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(92\)77904-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(92)77904-1)
- Hugger, P. (1975). *Le Jura vaudois : La vie à l'alpage*. Lausanne : Éditions 24 Heures.

- INRA. (1988). *Alimentation des bovins, ovins et caprins*. Paris, France : INRA Éditions. https://wiki.tripleperformance.fr/images/fr/2/20/Alimentations_des_caprins%2C_ovins%2C_bovins.pdf
- IPCC. (2023). Sections. In H. Lee & J. Romero (Eds.), *Climate Change 2023 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 35-115). IPCC. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf
- Jacob, T. (2009). *Apport de la gravimétrie et de l'inclinométrie à l'hydrologie karstique* [Mémoire, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc]. Géophysique [physics.geo-ph]. <https://theses.hal.science/tel-00404851/>
- Joly, D. (2015). *Étude de la vulnérabilité de la forêt du Parc du Haut Jura vis-à-vis du changement climatique* [Rapport de recherche]. Parc naturel régional du Haut-Jura. <https://hal.science/hal-01187070>
- Khelil-Arfa, H., Boudon, A., Maxin, G., & Faverdin, P. (2012). Prediction of water intake and excretion flows in Holstein dairy cows under thermoneutral conditions. *Animal*, 6(10), 1662–1676. <https://doi.org/10.1017/S175173111200047X>
- Lenoir, J. R. M. H., & Gégout, J.-C. (2010). La remontée de la distribution altitudinale des espèces végétales forestières tempérées en lien avec le réchauffement climatique récent. *Revue forestière française*, 62(3-4), 465–476. <https://doi.org/10.4267/2042/38961>
- Lombard, A., & Falconnier, A. (1933). Le Virgulien et la stratigraphie du Portlandien de la région du col du Marchairuz (Jura vaudois). *Archives des sciences physiques et naturelles*, 15, 105-126. <https://doi.org/10.5169/seals-740607>
- Luke, G. J. (1987). *Consumption of water by livestock* (Report No. 60). Department of Primary Industries and Regional Development, Western Australia. <https://library.dpir.wa.gov.au/rmtr/54>
- Mangin, A. (1975). *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques* [Thèse de doctorat, Université de Dijon]. HAL. <https://hal.science/tel-01575806>
- Marthaler, M. (2001). *Le Cervin est-il africain ? Une histoire géologique entre les Alpes et notre planète* (Édition 2014).
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, pp. 179–183). American Meteorological Society. https://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Relationship_Drought_Frequency_Duration_Time_Scales_1993.pdf
- Meisser, M., Deléglise, C., Stévenin, L., & Mosimann, E. (2015). Évènements de sécheresse : caractérisation et effets sur les services agronomiques des prairies. *Recherche Agronomique Suisse*, 6(9), 400–407. https://www.agrarforschungschweiz.ch/wp-content/uploads/pdf_archive/2015_09_f_2101.pdf
- Meisser, M., Vitra, A., Stévenin, L., Mosimann, E., Mariotte, P., & Buttler, A. (2018). Impact of drought on the functioning of grassland systems. *Agrarforschung Schweiz*, 9, 82–91. <https://www.agrarforschungschweiz.ch/en/2018/03/impact-of-drought-on-the-functioning-of-grassland-systems/>
- Ménard, J.-L., Lepesme, M., Brunschwig, P., Coutant, S., Fulbert, L., Huneau, T., Libeau, J., Lowagie, S., Magniere, J. P., Nicoud, M., Piroux, D., & Boudon, A. (2012). Évaluation de la consommation en eau en élevage bovins laitiers et mise au point d'un référentiel simplifié de l'abreuvement des

vaches, génisses et veaux après sevrage. *Renc. Rech. Rum.*, 19, 173–176. <https://hal.science/hal-01210339v1>

- Milano, M., Reynard, E., Bosshard, N., & Weingartner, R. (2016). In light of seasonal climatic and anthropogenic changes, is the Vaud canton (Switzerland) vulnerable to water stress by the medium-term ? *La Houille Blanche*, (5), 17–24. <https://doi.org/10.1051/lhb/2016045>
- Milano, M., Reynard, E., Köplin, N., & Weingartner, R. (2015). Climatic and anthropogenic changes in Western Switzerland: Impacts on water stress. *Science of The Total Environment*, 536, 12–24. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.049>
- Montanum Sàrl. (2023). *Alpage de la Commune de Le Vaud, La Perroude du Vaud, Plan de gestion intégrée (PGI)*.
- Mosimann, E., Casarico, L., Roulin, L., Delille, H., Chieze, B., & Brunel, M. (2025, avril). *Alpages sous la loupe : Suivi de la végétation des alpages et des pratiques pastorales face au réchauffement climatique. Méthode des « Alpages sentinelles » – Rapport 2022–2024*. Montanum Sàrl & Parc Jura vaudois.
- OFEV (Éd.). (2021). *Effets des changements climatiques sur les eaux suisses. Hydrologie, écologie et gestion des eaux* (Connaissance de l'environnement, 2101, 134 p.). Office fédéral de l'environnement. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/eaux/publications/publications-eaux/effets-des-changements-climatiques-sur-les-eaux-suisses.html>
- Office fédéral de l'agriculture (OFAG). (2020). *Les améliorations structurelles dans l'espace rural : Vue d'ensemble* (No d'art. 730.003.F). <https://backend.blw.admin.ch/fileservice/sdweb-docs-prod-blwch-files/files/2024/10/08/2daf3c84-4357-4415-ac13-b6781e79c62e.pdf>
- Olkowski, A. A. (2009). *La qualité de l'eau d'abreuvement du bétail : Guide de terrain relatif aux bovins, aux chevaux, à la volaille et aux porcs* (1^{re} éd.). Agriculture et Agroalimentaire Canada. https://www.agrireseau.net/bovinsboucherie/documents/Field%20guide%20animal%20wq_fr%20-%20Qualité%20eau.pdf
- Quarfli, L., & Chehma, A. (2014). *Impact de la nature du régime, des quantités d'eau consommées et des conditions climatiques (température) sur les performances des vaches laitières dans la région de Ghardaïa*. *Revue des BioRessources*, 4(4).
- Palomo, I. (2017). Climate change impacts on ecosystem services in high mountain areas : A literature review. *Mountain Research and Development*, 37(2), 179–187. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-16-00110.1>
- Peringer, A., Siehoff, S., Chételat, J., Spiegelberger, T., Buttler, A., & Gillet, F. (2013). Past and future landscape dynamics in pasture-woodlands of the Swiss Jura Mountains under climate change. *Ecology and Society*, 18(3). <https://www.jstor.org/stable/26269345>
- Perrin, J. (2004). La source karstique de la Lionne (L'Abbaye, Jura vaudois). *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles*, 89, 99–112. https://www.researchgate.net/publication/264859033_Perrin_J_2004_La_source_karstique_de_la_lionne_L'abbaye_jura_vaudois_Bulletin_De_La_Societe_Vaudoise_Des_Sciences_Naturelles_89_1-2_99-112
- Quantin, A. (1958). Description géographique de la région étudiée. *Bulletin de la Société Botanique de France*, 105 (suppl. 2), 3-8. <https://www.tandfonline.com/toc/tabg17/105/sup2>
- Reynard E. (2024). Agricultural landscapes - Tangible and intangible values of cultural landscapes. In : Pina H., Martins F., Vargas K. (Eds.). *The overarching issues on the European area. Moving*

- towards efficient societies and sustainable ecosystems. Porto, Faculdade de Letras da Universidade do Porto, 89-103. <https://doi.org/10.21747/978-989-9082-88-5/ovea7>
- Reynard, E., & Schoeneich, P. (2021). Structural and karstic landscapes of the Joux Valley (Southwestern Jura). In E. Reynard (Ed.), *Landscapes and landforms of Switzerland* (World Geomorphological Landscapes, pp. 97-110). https://doi.org/10.1007/978-3-030-43203-4_7
 - Reynard, E., Angiolini, L., Grosjean, C., Milano, M., Emery, D., & Theler, D. (2024). *Quelle stratégie territoriale pour l’approvisionnement en eau d’une micro-région d’estivage ?* Sion, Sierre : Centre interdisciplinaire de recherche sur la montagne, géau environnements (sur mandat du Parc Jura vaudois).
 - Rollier, L. (1903). Le plissement de la chaîne du Jura. *Annales de Géographie*, 12(66), 403–410. <http://www.jstor.org/stable/23438529>
 - Sautier, J.-L. (2009). *Aménagement des alpages : Les ouvrages du génie rural, guide pratique, complément au “Manuel d’économie alpestre et pacagère”*. AGRIDEA.
 - Schneider, M., & Feller, M. (2024). Klimawandel : Herausforderung für die Alpwirtschaft. *Montagna*, 6, 8-9. <https://www.bfh.ch/dam/jcr:9479fcc8-4275-448a-b855-41e4d3a3c6e5/montagna-6-2024-alp-klimawandel.pdf>
 - Sérès, C. (2010). Changement climatique et agriculture d’élevage en zone de montagne : Premiers éléments de réflexion. *Le Courrier de l’environnement de l’INRA*, 58, 21-36. <https://hal.science/hal-01197060/file/C58Seres.pdf>
 - SFEA. (2023, 16 février). *Consommation d’eau sur les alpages, Sans eau rien ne va plus !* Cours d’hiver de la SFEA. Direction des institutions, de l’agriculture et des forêts (DIAF), Grangeneuve, État de Fribourg. https://grangeneuve_conseil.ch/phocadownload/20230216_Consommation_eau_alpages_cours_hiver_SFEA.pdf
 - Stockdale, C. R., & King, K. R. (1983). A note on some of the factors that affect the water consumption of lactating dairy cows at pasture. *Animal Production*, 36(2), 303-306. <https://doi.org/10.1017/S135772980001375>
 - Technical Report CH2018. (2018). *CH2018 – Climate scenarios for Switzerland* [Rapport technique]. National Centre for Climate Services, Zurich. <https://www.nccs.admin.ch/nccs/en/home/climate-change-and-impacts/swiss-climate-change-scenarios/technical-report.html>
 - Van Loon, A. F., & Van Lanen, H. A. J. (2012). A process based typology of hydrological drought. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(7), 1915-1946. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1915-2012>
 - Vitasse, Y., Wohlgemuth, T., & Rigling, A. (2023). Les forêts face aux sécheresses et canicules : Causes de dépérissements, facteurs aggravants et différences de sensibilité entre les espèces. *Revue forestière française*, 74(2), 121-132. https://www.researchgate.net/publication/371827154_Les_forets_face_aux_secheresses_et_canicules_causes_de_deperissements_facteurs_aggravants_et_differences_de_sensibilite_entre_les_especes
 - Viviroli, D., Archer, D. R., Buytaert, W., Fowler, H. J., Greenwood, G. B., Hamlet, A. F., Huang, Y., Koboltschnig, G., Litaor, M. I., López-Moreno, J. I., Lorentz, S., Schädler, B., Schreier, H., Schwaiger, K., Vuille, M., & Woods, R. (2011). Climate change and mountain water resources: Overview and recommendations for research, management and policy. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2), 471-504. <https://doi.org/10.5194/hess-15-471-2011>

- Wildberger, A., & Preiswerk, C. (1997). *Karst und Höhlen der Schweiz*. Speleo Projects.
- Zwicke, M., Alessio, G. A., Thiery, L., Falcimagne, R., Baumont, R., Rossignol, N., Soussana, J.-F., & Picon-Cochard, C. (2013). Lasting effects of climate disturbance on perennial grassland above-ground biomass production under two cutting frequencies. *Global Change Biology*, 19(11), 3435–3448. <https://doi.org/10.1111/gcb.12317>

10. Webographie

- Agridea. (2016). *Contributions d'estivage*. Programme national de protection des troupeaux. Consulté le 13 août 2025, à l'adresse <https://www.protectiondestroupeaux.ch/fr/programme-national-de-protection-des-troupeaux/couts-et-financement/contributions-destivage/>
- Agrometeo. (s.d.). *Agrometeo*. Dernière consultation le 13 août 2025, à l'adresse <https://www.agrometeo.ch>
- Bakrona Zürich AG. (s.d.). *Electronic switch pulse input adapter – 1 meter sensor*. Consulté le 18 février 2025, à l'adresse <https://bakrona-zuerich.ch/electronic-switch-pulse-input-adapter-1-meter-sensor-s-ucc-m001>
- Bakrona Zürich AG. (s.d.). *HOBO State Data Logger*. Consulté le 18 février 2025, à l'adresse <https://bakrona-zuerich.ch/hobo-state-data-logger-ux90-001>
- Confédération Suisse. (s.d.-a). *Atlas hydrologique de la Suisse, Hydromaps*. Consulté le 14 août 2024, à l'adresse <https://atlashydrologique.ch>
- Confédération Suisse. (s.d.-b). National Centre for Climate Services (NCCS). Consulté le 22 mai 2025, à l'adresse <https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/regions/grandes-regions/jura/le-climat-actuel.html>
- Confédération Suisse, Office fédéral de la culture. (2023, 5 décembre). *La saison d'alpage inscrite au patrimoine culturel immatériel de l'UNESCO*. Consulté le 30 mai 2025, à l'adresse <https://www.admin.ch/gov/fr/accueil/documentation/communiques.msg-id-99168.html>
- CONICET. (n.d.). *About the CONICET*. Consulté le 21 juillet 2025, à l'adresse <https://www.conicet.gov.ar/about-the-conicet/?lan=en>
- État de Vaud. (s.d.). *Contributions et aides financières agricoles*. Consulté le 2 septembre 2025, à l'adresse <https://www.vd.ch/economie/agriculture-et-viticulture/contributions-et-aides-financieres-agricoles>
- Eurostat. (s.d.). *Statistics explained*. Consulté le 16 janvier 2025, à l'adresse [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Livestock_unit_\(LSU\)/fr](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Livestock_unit_(LSU)/fr)
- GDS Réseau 3M'. (s.d.). *Bovins – Qualité de l'eau – Abreuvement*. Dernière consultation le 23 juillet 2025, à l'adresse https://gdsreseau3m.com/?page_id=1373
- GDS Réseau 3M'. (s.d.). *Porcins – Services d'hygiène – Qualité de l'eau*. Consulté le 24 juin 2025, à l'adresse https://gdsreseau3m.com/?page_id=1621
- Haesen, E., & Mettler, D. (2023, 26 novembre). Formes propriétaires et juridiques des exploitations d'estivage. *Agripedia*. <https://themes.agripedia.ch/fr/economie-alpestre-formes-proprietaires-et-juridiques/>
- Larousse. (s.d.). *Amodiataire*. In *Dictionnaire français*. Consulté le 21 juillet 2025, à l'adresse <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/amodiataire/2968#:~:text=1.,d'une%20mine%20est%20amodiée>
- Maddalena. (2022). *Compteurs manuels* [Brochure PDF]. Consulté le 18 février 2025, à l'adresse https://cdn.store-factory.com/www.compteur-energie.com/media/Maddalena-CD-ONE-TRP-2022_compteur-energie_com.pdf
- MétéoSuisse. (2022, janvier). *Nouvelles valeurs normales du climat pour la période 1991–2020*. Consulté le 27 juin 2025, à l'adresse

<https://www.meteosuisse.admin.ch/portrait/medias/communiques-de-presse/2022/01/nouvelles-valeurs-normales-du-climat-pour-la-periode-1991-2020.html>

- MétéoSuisse. (s.d.). *Changement climatique en Suisse*. Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse. Consulté le 14 août 2024, à l'adresse <https://www.meteosuisse.admin.ch/climat/changement-climatique.html>
- MétéoSuisse. (s.d.). *Réseau de mesures automatiques MétéoSuisse*. Consulté le 16 janvier 2025, à l'adresse <https://www.meteosuisse.admin.ch/meteo/systemes-de-mesure/stations-au-sol/reseau-de-mesures-automatiques.html>
- Mutterkuh Schweiz. (s.d.). *Grise rhétique*. Consulté le 24 juin 2025, à l'adresse <https://www.mutterkuh.ch/races-bovines-a-viande/grise-rhetique.html>
- National Centre for Climate Services (NCCS). (2023). *Scénarios climatiques CH2018*. Consulté le 14 août 2024, à l'adresse <https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/le-nccs/themes-prioritaires/scenarios-climatiques-ch2018.html>
- Office fédéral de l'environnement (OFEV). (2025). *La sécheresse : monitoring, prévisions et alertes*. Consulté le 23 juillet 2025, à l'adresse <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/eaux/evenements-extremes/la-secheresse-monitoring-previsions-et-alertes.html>
- Office fédéral de l'environnement (OFEV) et Centre national de la recherche sur le climat (NCCS). *Projections climatiques pour la région du Jura*. Consulté le 23 juillet 2025, à l'adresse <https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/regions/grandes-regions/jura.html>
- Office fédéral de l'environnement (OFEV) et Centre national de la recherche sur le climat (NCCS). *Projections climatiques pour le canton de Vaud*. Consulté le 23 juillet 2025, à l'adresse <https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/regions/cantons/vaud.html#766300646>
- ProSpecieRara. (s.d.). *Vache grise rhétique – Portrait de race*. Dernière consultation le 23 juillet 2025, à l'adresse <https://www.prospecierara.ch/fr/animaux/portraits-de-races/bovins/vache-grise-rhetique>
- Swiss Domotique. (s.d.). *Gianola, compteurs d'eau froide à impulsion*. Consulté le 18 février 2025, à l'adresse <https://shop.swiss-domotique.ch/fr/accessoires/981-gioanola-compteur-d-eau-froide-a-impulsion.html>
- Swissherdbook. (s.d.). *Holstein / Red Holstein*. Swissherdbook. Consulté le 24 juin 2025, à l'adresse <https://www.swissherdbook.ch/fr/races-du-herd-book/holstein/-red-holstein>
- TRM Schweiz. (s.d.). *Wasser in der Nahrung des Pferdes*. Consulté le 24 juin 2025, à l'adresse <https://trm-schweiz.ch/article/knownledges/378?locale=fr>

11. Annexes

I. Conditions de propriété et d'exploitation de l'alpage du Bucley

LOCALISATION				
Commune territoriale	L'Abbaye		Zone de production	Estivage
N° de parcelle	563		Altitude	1'433 m
Coordonnées du chalet	2'513'935	1'163'609		
PROPRIETAIRE				
Nom	Commune de L'Abbaye			
Municipal en charge	M. Patrick Berktold			
Adresse	Rte. De l'Hôtel de Ville 14 1344 L'Abbaye			
Téléphone	079 812 48 39			
Email	patrick.berktold@labbaye.ch			
SERVICE DES FORÊTS				
Inspecteur des forêts	M. Jan-Matti Keller - 11 ^{ème} arrondissement Centre d'exploitation des forêts cantonales Tribillet 33, 1348 Le Brassus			
Garde forestier	Mme. América Croisier -Groupement du Mollendruz Rte. De l'Epine 6 1148 Mont-la-Ville			
EXPLOITANT				
Nom et prénom	M. Cédric Rochat			
Adresse	Chez le Brigadier 2 1347 Le Solliat			
Téléphone	079 437 50 91			
Email	sylvibroyage@sevjnet.ch			
N° d'exploitation	VD5872.3131			
DESCRIPTIF DE L'ALPAGE				
N° d'estivage	E5871.0221		Type de bétail	Nombre
Surface pâturable	83,2 ha		Vaches laitières	70
Charge usuelle actuelle	45.6 PN		Porcs	60
Durée de pâture	120 jours			
Production	Gruyère alpage AOP			

II. Conditions de propriété et d'exploitation de l'alpage du Pré d'Etoy

LOCALISATION				
Commune territoriale	L'Abbaye		Zone de production	Estivage
N° de parcelle	561		Altitude	1'490 m
Coordonnées du chalet	2'513'670	1'162'116		
PROPRIETAIRE				
Nom	Commune de L'Abbaye			
Municipal en charge	M. Patrick Berktold			
Adresse	Rte. De l'Hôtel de Ville 14 1344 L'Abbaye			
Téléphone	079 812 48 39			
Email	patrick.berktold@labbaye.ch			
SERVICE DES FORÊTS				
Inspecteur des forêts	M. Jan-Matti Keller - 11 ^{ème} arrondissement Centre d'exploitation des forêts cantonales Tribillet 33, 1348 Le Brassus			
Garde forestier	Mme. América Croisier -Groupement du Mollendruz Rte. De l'Epine 6 1148 Mont-la-Ville			
EXPLOITANT				
Nom et prénom	M. Cédric Rochat			
Adresse	Chez le Brigadier 2 1347 Le Solliat			
Téléphone	079 437 50 91			
Email	sylvibroyage@sevjnet.ch			
N° d'exploitation	VD5872.3131			
DESCRIPTIF DE L'ALPAGE				
N° d'estivage	E5871.0222		Type de bétail	Nombre
Surface pâturable	85 ha	Avec le Bucley	Vaches laitières	70
Charge usuelle actuelle	92,3 PN			
Durée de pâture	120 jours			
Production	Lait pour gruyère alpage (Fabriqué au Bucley)			

III. Conditions de propriété et d'exploitation de l'alpage de la Perroude de Vaud

PROPRIETAIRE			
Nom et prénom	Commune de Le Vaud		
Municipal en charge	M. Sébastien Humbert		
Adresse	Grand Rue 4 - 1261 Le Vaud		
Téléphone	079 754 75 66		
E-mail	sebastien.humbert@levaud.ch		
SERVICE DES FORÊTS			
Inspecteur des forêts	M. Benjamin Jaquier - 14ème arrondissement		
Téléphone	079 353 42 89		
E-mail	benjamin.jaquier@vd.ch		
Garde forestier	M. Maxime Schumacher		
Téléphone	079 725 30 85		
E-mail	maxime.schumacher@agfors.ch		
DESCRIPTIF DE L'ALPAGE			
Commune territoriale	Marchissy	N° d'estivage	E 5430.0092
Parcelle cadastrale	2	Surface pâturable	40.4 ha
Coordonnées du chalet	2 505 213 / 1 151 267	Altitude	1380 m
Charge usuelle	24.73 PN	Durée	130 jours
Animaux - production	Vaches allaitantes - viande - élevage		
EXPLOITANT			
Nom et prénom	M. François-Lionel Humbert		
Adresse	Rue Verte 5 - 1261 Le vaud		
Téléphone et e-mail	079 940 45 26 - flhumbert@gmail.com		
N° d'exploitation	VD 5731.3001	Mode d'exploitation	Bio Suisse

IV. Panneau informatif installé à la Perroude de Vaud

Projet de recherche ALPEAU

Quelle est la consommation d'eau d'une vache ?

Vache laitière : 70 litres / jour
Vache allaitante : 55 litres / jour
Génisse (+2 ans) : 40 litres / jour
Génisse (1-2 ans) : 25 litres / jour
Veau allaité : 10 litres / jour (Source : Agridea)

Ces valeurs moyennes sont mesurées en étable,
avec une alimentation sèche (foin).

En alpage, la consommation réelle dépend :

- de la température ambiante
- de l'humidité de l'herbe
- de la production de lait.



S'il pleut ou s'il y a beaucoup de rosée, il est possible que la vache ne boive pas du tout !
Si l'herbe est sèche et par fortes chaleurs, une vache boit jusqu'à **150 litres par jour**.
Par ailleurs, une vache laitière consomme plus de 100 kg d'herbe fraîche par jour.

Alpage du Bucley, été 2022



Alpage du Bucley, été 2023



Photographies : Montanum Sarl

Objectifs du projet ALPEAU

- Les ressources en eau étant limitées dans le Jura vaudois, il est important de savoir comment varie la consommation en eau des vaches dans les conditions réelles d'alpage.
- Des compteurs d'eau sont installés sur les abreuvoirs pour mesurer la consommation en eau du troupeau en continu, durant la saison d'estivage.

Pour tous renseignements : emmanuel.reynard@unil.ch

V. Prix matériel

Tableau 21. Prix matériel pour la mise en place du protocole de suivi sur l'alpage du Bucley

Localisation	Matériel	Prix à l'unité (CHF)	Quantité	Total
Chalet et fromagerie	1 compteur manuel	Environ 30.-	1	30
Bétail	6 compteurs à impulsion	79.90	6	479.40
Bétail	3 enregistreurs de données	349	3	1 047
Câbles	6 câbles (1 câble par compteur)	124	6	744
Total				2 270.40

Tableau 22. Prix matériel pour la mise en place du protocole de suivi sur l'alpage de la Perroude de Vaud

Localisation	Matériel	Prix à l'unité (CHF)	Quantité	Total
Bétail	3 compteurs à impulsion	79.90	3	239.70
Bétail	3 enregistreurs de données	349	3	1 047
Câbles	3 câbles (1 câble par compteur)	124	3	372
Total				552.90