UNIL | Université de Lausanne

Faculté des géosciences et de l'environnement
Institut de géographie et durabilité

Quantifier les usages de l'eau en territoire touristique de montagne

THÈSE DE DOCTORAT

présentée à la Faculté des géosciences et de l'environnement de l'Université de Lausanne par :

Martin CALIANNO
diplômé en Sciences de la Terre et de l'Environnement, spécialité Eau, Climat et Environnement (Université de Grenoble 1) et en Management of Hydrometeorological Hazards (University of Thessaly, Volos)

Jury :

Prof. Emmanuel REYNARD (directeur de thèse)
Institut de géographie et durabilité, Université de Lausanne,
Prof. David SAURÍ PUJOL (expert)
Departament de Geografia, Universitat Autònoma de Barcelona,
Dr. Georges-Marie SAULNIER (expert)
Chargé de recherche CNRS, EDYTEM, Université Savoie Mont Blanc,
Prof. André MUSY (expert)
Professeur honoraire EPFL,
M. Sébastien APOTHÉLOZ (expert)
Chef du Service de l'eau de la ville de Lausanne,
sous la présidence du Prof. Michel JABOYEDOFF, Université de Lausanne.

Lausanne, 2018

UNIL | Université de Lausanne

Faculté des géosciences et de l'environnement
Institut de géographie et durabilité

Quantifier les usages de l'eau en territoire touristique de montagne

THÈSE DE DOCTORAT

présentée à la Faculté des géosciences et de l'environnement de l'Université de Lausanne par :

Martin CALIANNO
diplômé en Sciences de la Terre et de l'Environnement, spécialité Eau, Climat et Environnement (Université de Grenoble 1) et en Management of Hydrometeorological Hazards (University of Thessaly, Volos)

Jury :

Prof. Emmanuel REYNARD (directeur de thèse)
Institut de géographie et durabilité, Université de Lausanne,
Prof. David SAURÍ PUJOL (expert)
Departament de Geografia, Universitat Autònoma de Barcelona,
Dr. Georges-Marie SAULNIER (expert)
Chargé de recherche CNRS, EDYTEM, Université Savoie Mont Blanc,
Prof. André MUSY (expert)
Professeur honoraire EPFL,
M. Sébastien APOTHÉLOZ (expert)
Chef du Service de l'eau de la ville de Lausanne,
sous la présidence du Prof. Michel JABOYEDOFF, Université de Lausanne.

Lausanne, 2018

UNIL | Université de Lausanne
Faculté des géosciences et de l'environnement
bâtiment Géopolis bureau 4631

IMPRIMATUR

Vu le rapport présenté par le jury d'examen, composé de

Président de la séance publique :	M. le Professeur Michel Jaboyedoff
Président du colloque :	M. le Professeur Michel Jaboyedoff
Directeur de thèse :	M. le Professeur Emmanuel Reynard
Expert externe :	M. le Professeur David Sauri Pujol
Expert externe :	M. le Professeur André Musy
Expert externe :	M. le Docteur Georges-Marie Saulnier
Expert externe :	M. Sébastien Apothéloz

Le Doyen de la Faculté des géosciences et de l'environnement autorise l'impression de la thèse de

Monsieur Martin CALIANNO

Titulaire d'un
Master en sciences de la Terre et environnement
de l'Université de Grenoble 1

intitulée

Quantifier les usages de l'eau en territoire touristique de montagne

Lausanne, le 13 juillet 2018

Pour le Doyen de la Faculté des géosciences et de l'environnement

Professeur Michel Jaboyedoff

« *Des chercheurs qui cherchent on en trouve, mais des chercheurs qui trouvent on en cherche.* »

Proverbe africain

Résumé

Les régions touristiques de montagne peuvent vivrent des épisodes de pénurie en eau sur des temps très courts (d'un jour à une semaine) en raison des fortes variations de la population temporaire durant les saisons touristiques, combinées aux ressources en eau limitées des hauts bassins versants. Puisque les bilans intégrés de l'eau effectués dans la littérature font face à un manque de données pour le volet 'usages', cette thèse a pour but d'approfondir les connaissances et les méthodes de quantification des usages de l'eau. Une clarification terminologique des termes liés aux usages de l'eau, est tout d'abord proposée, autour du concept de *cycle d'usage de l'eau*. Ensuite, une combinaison d'approches a été utilisée pour étudier le cas particuler des usages en territoire de montagne, où les demandes en eau sont très variables en temps (influence de l'occupation touristique sur les usages de l'eau potable, saisonnalités propres à l'irrigation) et en espace (occupation du sol en fonction de l'altitude, topographie, densités d'habitat). D'une part, des approches quantitatives sont menées, avec une campagne de monitoring des usages de l'eau potable et de l'irrigation dans les communes de Montana (Valais) et Megève (Haute-Savoie), via l'installation de compteurs d'eau, dataloggers et débitmètres. Ce monitoring a permis d'obtenir des observations des usages à haute résolution temporelle et spatiale. D'autre part, des approches qualitatives (observation directe sur le terrain et entretiens avec les acteurs usagers de l'eau) ont permis d'approfondir les connaissances sur les pratiques d'usages et en particulier les déterminants de la demande en eau d'irrigation. Des outils ont été developpés pour structurer les données d'usage récoltées : le *bassin d'usage* cartographie leur répartition spatiale, le *régime d'usage* formalise leurs dynamiques temporelles via des séries de données standardisées et la *densité d'usage* décrit leur intensité par rapport à leur emprise au sol. Une méthodologie simplifiée est également proposée pour modéliser les dynamiques de distribution d'eau potable d'un territoire à partir d'une typologie de régimes d'apports et des caractéristiques d'habitat. Les régimes et bassins d'usage définis à Montana et Megève ont mis en évidence des différences de saisonnalité à une échelle plus fine que les études précédentes : à l'échelle intra-communale (par bassin d'habitation, par type d'habitat), jusqu'à l'échelle de l'usager. L'importante saisonnalité des usages de l'eau dans la station touristique a ainsi pu être détaillée et quantifiée. L'atout des régimes d'usage est aussi de pouvoir standardiser les valeurs de demande en eau afin de comparer les dynamiques temporelle d'usages différents sur un même graphique. Ainsi, il est possible d'identifier les pics d'usage à courte échelle temporelle, qui ne peuvent pas être identifiés avec des méthodes à pas de temps plus grossier. Il est important de détailler ces régimes d'usage car les pénuries se produisant en zone touristique sont générées par des pics d'usage à des échelles de temps très courtes (jour, weekend, semaine). Par ailleurs, le calcul des densités d'usage a mis en évidence l'importante empreinte spatiale de l'arrosage des jardins à Montana. L'étude des pratiques d'irrigation a permis d'identifier les facteurs de décision d'arrosage des acteurs irrigants et leurs modes de fonctionnement. La connaissance de ces pratique a ensuite servi à affiner les méthodes empiriques d'estimation de l'irrigation. Ensuite, une étude comparative a mis en évidence les écarts existant entre l'estimation de l'irrigation et l'irrigation effective, observée durant les campagnes de monitoring. Dans le cas de Montana, les méthodes d'estimations utilisées dans les bilans intégrés de l'eau surestiment jusqu'à un facteur 10 les distributions réelles d'irrigation. Enfin, suite à l'expérience acquise lors de la mise en place des campagnes de mesure à Montana et Megève, des recommandations sont formulées pour le monitoring des usages de l'eau en territoire touristique de montagne.

Abstract

Mountain tourist areas may experience periods of water shortage (1 day to 1 week) due to large variations in the temporary population during the tourist seasons, combined with the limited water resources of the upper watersheds. Since the integrated water balances carried out in current research face a lack of data for the 'uses' section, this thesis aims to deepen knowledge and methods for quantifying the uses of water. A terminological clarification of the terms related to the uses of water is first proposed, around the concept of *water use cycle*. Then, a combination of approaches was used to study the particular uses in mountain territory, where the water demands are highly variable in time (influence of the tourist occupation on the uses of drinking water, irrigation seasons) and in space (land use according to the altitude, topography, habitat densities). On the one hand, quantitative approaches are chosen, with a monitoring campaign of the uses of drinking water and irrigation in the municipalities of Montana (Valais) and Megève (Haute-Savoie), with the installation of water meters, dataloggers and flowmeters. This monitoring gathered observations of water uses with high temporal and spatial resolution. On the other hand, qualitative approaches (direct observation in the field and interviews with the water users) deepend the knowledge on the practices of uses and in particular the determinants of the water demand for irrigation. Tools have been developed to structure the collected water use data: the *water use basin* maps their spatial distribution, the *water use regime* formalizes their temporal dynamics via standardized data sets and the *water use density* describes their intensity relative to their spatial footprint. A simplified methodology is also proposed to model the drinking water distribution dynamics of a territory based on a typology of water delivery regimes and habitat characteristics. The regimes and basins defined in Montana and Megève highlighted water use seasonality on a finer scale than previous studies: at the intra-municipal scale (by watershed, by type of habitat), up to the use scaler. The important seasonality of the water uses in the tourist resorts could thus be detailed and quantified. The advantage of water use regimes is also to be able to standardize the water demand values in order to compare the temporal dynamics of different uses on the same graph. Thus, it is possible to identify short time-scale usage peaks, which can not be identified with coarser scaled methods. It is important to detail these water use regimes because the shortages occurring in tourist areas are generated by peaks of use at very short time scales (day, weekend, week). In addition, the calculation of water use density underlined the important spatial footprint of garden watering in Montana. The study of irrigation practices has highlighted the decision-making factors of irrigants and their modes of operation. The knowledge of these practices allowed to refine the empirical methods irrigation estimation. Then, a comparative study highlighted the deviations between the estimation of irrigation and the actual irrigation observed during the monitoring campaigns. In the case of Montana, the estimation methods used in the integrated water balance models overestimate the actual irrigation distributions by a factor of 10. Finally, following the experience gained during the implementation of measurement campaigns in Montana and Megève, recommendations are formulated for the monitoring of water uses in mountain tourist territory.

Remerciements

Je remercie...

Mon directeur de thèse - Emmanuel Reynard, pour sa générosité, son accompagnement sans faille tout au long de ces 5 ans et sa joie de vivre valaisanne.

Le jury de thèse - David Sauri, Georges-Marie Saulnier, André Musy et Sébastien Apothéloz

Les acteurs et collaborateurs à Megève - Aude Soureillat, pour son soutien inconditionnel, Emmanuel Gannaz, pour sa bonne humeur et sa générosité en m'accompagnant sur le terrain, Sylvie Debiève, Julien Beline, Julien Branchereau et Carole Talotti.

Les acteurs et collaborateurs à Montana - José Anchel Rivodigo, Olivier Bonvin, Claude Meyrat, Bernard Cordonier, Daniel Rey (ACCM), Daniel Ré, Steeve Werren et Fabrice Strevens (Cla-Val), Sandro Barth (GWF), Jean-Daniel Rey (Cave St Michel), Stéphane Emery, Daniel Brunner (Sierre Energie).

Ma petite famille nouvellement agrandie - Manuela et Bruna.

Ma grande famille, en Belgique - Maman, Titi, Emilie, Vincent, Lucie, et tous les autres Gheur. Sans oublier les bières spéciales, les friteries et le (vrai) chocolat noir.

Ma grande famille, de l'autre côté de l'Atlantique - Andrea, Hernan, Mauro, Maripi et Pedrito.

Les amis et collègues du groupe de recherche Pol'Eau - Marianne (co-bureau, co-auteure et co-assistante !), Arnaud, Stephan, Grazi, Franck (merci pour le proverbe), Joana, Mohamed, Emna, Mélanie, Jean-Michel. Sans oublier Bernard Weissbrodt.

La famille des doctorants UNIL (team Suisse) - Jean-Baptiste, Lucien, Nic, Nathan, pour les parties de kicker.

La famille des Donkeys, pour leur énergie, leur engagement et leurs sourires - Nico, Ben, Seb, Mike, Femi, Gab, Mama G., Nath, Kiki, MagMa, Pascualito, Alexis, Sté, Ignes, Vjeran , Morain, Zoneibe, Maarten, Renske, François, et al.

Mes nouveaux co-bureaux (côté soleil) : Benoît et Christelle.

Le reste de la famille IGD - Gwen, Leah, Flo, Nipesh, Gabriel, Claire, Monica, Caro et al.

Les membres du PAT IGD (sans qui rien ne tournerait dans l'institut) - Manon, Marcia et Carole.

L'escalade (pour la détente du corps) - Julien, Guillaume, Nico, Jimmy, Max.

Les abeilles (pour la détente de l'esprit et d'une partie du coeur).

Le compteur d'eau, pour m'avoir accompagné pendant ces 5 années.

Table des matières

Résumé **iii**

Abstract **v**

Remerciements **vii**

1 Introduction générale **1**
1.1 Mise en contexte de la recherche 1
1.2 Problématique générale 4
1.3 Objectifs et plan de recherche 6

2 Quantifier les usages de l'eau : une clarification terminologique et conceptuelle pour lever les confusions (article 1) **9**
2.1 Introduction 10
2.2 Concepts et termes utilisés pour quantifier les usages de l'eau 12
2.2.1 Le besoin en eau 14
2.2.2 La demande en eau 14
2.2.3 La quantité d'eau effectivement employée par l'usager 15
2.2.4 La consommation 15
2.3 Clarification et articulation des notions via le cycle d'usage de l'eau 16
2.3.1 La notion d'usage de l'eau 16
2.3.2 Le concept de cycle d'usage 17
2.3.3 Les notions d'ordre immatériel, hors du système technique d'infrastructure . . . 19
2.3.4 La partie technique du cycle (mesurable) 19
2.4 Précision des termes du cycle suivant les particularités de chaque usage 22
2.4.1 Les cycles des usages de l'eau potable et d'irrigation 22
2.4.2 Le cycle des usages environnementaux de l'eau 25
2.5 Discussion et conclusion 27
2.5.1 Les différents types de confusion concernant les usages de l'eau 27
2.5.2 Intérêts et limites du cycle d'usage de l'eau en tant qu'appui terminologique . . 28

3 Cas d'étude et montage expérimental **31**
3.1 Présentation des cas d'étude 31
3.1.1 Montana 31
Introduction 31
Contexte bio-physique 32
Climat et hydrologie 36
Contexte géographique et historique 42
Usages de l'eau à Montana 45
3.1.2 Megève 51
Introduction 51
Contexte bio-physique 52
Contexte géographique et historique 57
Usages de l'eau 59
3.2 Montage expérimental 62

3.2.1 Montana . . . 63
Monitoring des usages de l'eau potable . . . 63
Monitoring de l'irrigation . . . 65
Entretiens . . . 68
3.2.2 Megève . . . 68
Monitoring des usages de l'eau potable . . . 68

4 Monitoring water use regimes and density in a tourist mountain territory (article 2) 73
4.1 Introduction . . . 74
4.2 Study area: a tourist mountain territory . . . 75
4.3 Methodology . . . 78
4.3.1 Datasets . . . 78
4.3.2 Analytic tools . . . 79
Water use regime . . . 79
Water use density . . . 80
4.4 Results and discussion . . . 80
4.4.1 Drinking water use regimes in Montana . . . 80
Regime of drinking water distribution . . . 80
Regimes of drinking water delivery . . . 80
Regimes of drinking water delivery in the tourist resort, by type of building . . . 82
4.4.2 Irrigation regimes in Montana . . . 84
Regimes of irrigation at the end-user scale (pasture and garden) . . . 84
Regimes of irrigation at the distribution scale (vineyards) . . . 85
4.4.3 Water use density of drinking water and irrigation in Montana . . . 86
In terms of gross volumes . . . 87
In terms of water use density . . . 87
4.4.4 Synthesis of water uses regimes in Montana . . . 87
4.5 Conclusion . . . 88

5 Assessing water demand seasonality in mountain tourist resorts with the water use regime approach (article 3) 91
5.1 Introduction . . . 92
5.2 Study Area: the Alpine Tourist Resort of Megève . . . 95
5.2.1 Geographic Context . . . 95
5.2.2 Water Uses . . . 96
5.2.3 The Water Use Cycle . . . 97
5.3 Methodology . . . 97
5.3.1 Municipal Drinking Water Distribution . . . 97
5.3.2 Monitoring of Drinking Water at the Delivery Scale . . . 98
5.3.3 Water Delivery Regimes and Typology . . . 99
5.3.4 The Analogous Method . . . 99
5.4 Results . . . 100
5.4.1 Municipal Drinking Water Distribution . . . 100
Dynamics . . . 100
Determinants . . . 102
5.4.2 Monitoring Sample : Drinking Water Delivery . . . 103
5.4.3 Typology of Drinking Water Delivery Regimes . . . 106
Houses (Permanent Residents) . . . 106
Houses (Temporary Residents) . . . 108
Hotels . . . 108
Apartment Blocks (Permanent Residents) . . . 108
Apartment Blocks (Temporary Residents) . . . 108
Offices . . . 109

Farms (Barns) . . . 109
5.4.4 Reconstruction of Drinking Water Distribution Dynamics Using the Analogous Method . . . 109
5.5 Discussion and Conclusion . . . 110

6 Pratiques d'irrigation : de l'usage estimé à l'usage effectif 113
6.1 Introduction . . . 113
6.1.1 Enjeux . . . 113
L'irrigation souvent estimée via des méthodes indirectes . . . 113
Une grande diversité des pratiques d'irrigation . . . 114
Quelle quantité mesurer : prélèvement, distribution ou apport ? . . . 114
6.1.2 Objectifs . . . 115
6.1.3 Approche multi-méthodes . . . 116
6.1.4 Organisation du chapitre . . . 118
6.2 Observation des pratiques d'irrigation à Montana . . . 118
6.2.1 Ressources, gestion et réseaux d'irrigation . . . 118
6.2.2 Pratiques d'irrigation des prairies . . . 123
6.2.3 Pratiques d'irrigation des vignes . . . 127
Techniques d'irrigation . . . 128
Quantités d'eau par arrosage . . . 130
Capacité de rétention des sols . . . 130
Stress hydrique et besoins en eau de la vigne . . . 135
Règles de gestion communales : calendrier et zones d'irrigation . . . 137
Différences de pratiques entre vignerons amateurs et professionnels . . . 139
Temporalité des arrosages : pratiques des vignerons . . . 141
Temporalité des arrosages : phénologie de la vigne . . . 142
6.2.4 Influence du contexte historique et économique sur les pratiques d'irrigation du vignoble à Montana . . . 144
Facteurs culturels et économiques influençant les pratiques d'irrigation . . . 145
Les profils-types d'irrigants de la vigne . . . 147
6.2.5 Pratiques d'irrigation des jardins privés . . . 148
6.2.6 Pratiques d'irrigation des espace verts publics . . . 149
6.3 Estimation des demandes en eau d'irrigation . . . 150
6.3.1 Méthodes empiriques . . . 150
Estimation des prélèvements . . . 150
Prairies : estimation empirique selon les densités d'apports d'irrigation . . . 152
Prairies : estimation empirique, modifiée selon les tours d'eau observés . . . 153
Vignes : estimation empirique, modifiée selon les tours d'eau observés . . . 153
Vignes : estimation empirique, corrigée selon les tours d'eau observés et la pédologie . . . 154
6.3.2 Simulations agro-climatiques . . . 154
Calcul du déficit hydrique de la vigne . . . 154
Calcul du besoin en eau des vignes et des prairies : modélisation CropWat . . . 157
Calcul du besoin en eau des vignes et des prairies : modélisation WEAP-MABIA 160
6.4 Observations *in-situ* de l'irrigation à Montana . . . 162
6.4.1 Apports d'irrigation : prairie . . . 162
6.4.2 Apports d'irrigation : jardin privé . . . 163
6.4.3 Distribution pour la zone du vignoble . . . 164
6.5 Synthèse : écart entre pratiques réelles et modélisation des usages . . . 171
6.5.1 Facteurs déterminant l'irrigation à Montana . . . 171
6.5.2 Comparaison des résultats obtenus par les différentes méthodes . . . 172

7 Conclusion générale **177**
7.1 Discussion générale des résultats 177
7.1.1 Retour sur l'enjeu de la terminologie des usages de l'eau 178
7.1.2 Retour sur l'enjeu des méthodes de quantification : les stratégies de monitoring . 180
Contextes des terrains étudiés et stratégies de monitoring mises en place 181
Avantages et inconvénients des stratégies de monitoring retenues 183
7.1.3 Retour sur l'enjeu des méthodes de quantification : structuration des données récoltées 188
Structurer la quantification des usages de l'eau 188
Créer des outils d'aide à la modélisation des usages 190
7.1.4 Retour sur l'enjeu des spécificités des usages de l'eau en région touristique de montagne 190
7.1.5 Retour sur l'enjeu des écarts entre l'estimation de l'usage de l'eau et usage effectif 192
7.2 Recommandations pour le monitoring des usages de l'eau en territoire touristique de montagne 194
7.2.1 Fiche-diagnostic des usages de l'eau du territoire et des infrastructures en place 194
7.2.2 Propositions de stratégies de monitoring suivant le contexte et les objectifs fixés 196
7.2.3 Données importantes à collecter pour le monitoring des usages de l'eau potable et de l'irrigation 198
7.3 Perspectives 202

Bibliographie **205**

Table des figures

1.1 Représentation systémique d'un système de gestion de l'eau, modifié d'après REYNARD (2008). 2
1.2 Organigramme du manuscript de thèse : articulation des enjeux, objectifs, chapitres et articles. 7

2.1 Étapes du cycle d'usage de l'eau (cas général d'un usage ex-situ). 18
2.2 Étapes du cycle d'usage de l'eau (cas de l'approvisionnement en eau potable). 22
2.3 Étapes du cycle d'usage de l'eau pour l'irrigation. 23
2.4 Étapes du cycle d'usage environnemental de l'eau. 26

3.1 Localisation des communes étudiées par rapport aux massifs alpins. 31
3.2 Relief autour de la commune de Montana. Source du bloc diagramme : swisstopo. . . . 33
3.3 Trois différents types d'occupation du sol à Montana suivant l'étagement altitudinal : la station touristique sur le Haut-Plateau (a), les prairies entourant le village historique (b) et le coteau avec son vignoble (c). Photographies : Martin Calianno (également pour les autres photographies du manuscript, sauf mention particulière). 34
3.4 Coupes en rive droite de la vallée du Rhône dans sa traversée du prolongement nord des massifs cristallins externes : en haut une vingtaine de kilomètres au NE de la vallée, au niveau du col du Pillon et du massif des Diablerets ; en bas pratiquement le long de la vallée, aux environs de Saint-Maurice (en aval) et du coude de Martigny (en amont). Image extraite du site web GEOL-ALP (GIDON 2018). 35
3.5 Précipitations moyennes annuelles (mm) en Suisse sur la période 1981-2010. Données MétéoSuisse. 36
3.6 Climatogramme pour la station météorologique de Sion (482 m), sur la période 1981-2010. Données MétéoSuisse. 37
3.7 Climatogramme pour la station météorologique de Montana (1427 m), sur la période 1981-2010. Données MétéoSuisse. 37
3.8 Cumuls de précipitations et températures moyennes mensuelles aux stations de Montana (1427 m) et Sion (482 m) en 2015 (a), 2016 (b) et 2017 (c). Données MétéoSuisse. 38
3.9 Ecarts par rapport à la norme 1981-2010 aux stations de Montana (1427 m) et Sion (482 m) en 2015, 2016 et 2017. Données MétéoSuisse. 39
3.10 Hydrographie, bassins versants et régimes hydrologiques de la région de Crans-Montana-Sierre. Figure extraite de BONRIPOSI (2013). Sources des données : Services des registres fonciers et de la géomatique du canton du Valais et WEINGARTNER et ASCHWANDEN (1992). 41
3.11 Contours administratifs de la région de Crans-Montana-Sierre. 42
3.12 Exemple de compteur d'eau potable domestique à Montana. Ce modèle-ci donne un index volumique avec une résolution d'un litre. 46
3.13 Exemples de systèmes d'irrigation à Montana : goutte-à-goutte (a) et aspersion de jeunes vignes (b) à Corin, aspersion du terrain de foot de Corin (c), gicleur fixe pour l'irrigation des prairies de Diogne (d,f) et gicleur mobile pour l'irrigation des prairies à Montana-Village (e). 47

3.14 Usages de l'eau *in-situ* sur le lac de la Moubra. 48
3.15 Prélèvements effectués par la commune de Montana : eaux de source et eaux de surface. 49
3.16 Relief autour de la commune de Megève. 52
3.17 Géologie de la dépression de Megève et ses bordures vues du nord. Image extraite du site GEOL-ALP (GIDON 2018). 53
3.18 La dépression de Megève, vue du nord-ouest, depuis Croise Baulet. En arrière plan, le massif du Mont Blanc. Image extraite du site GEOL-ALP (GIDON 2018). 53
3.19 Climatogramme de la station météorologique de Combloux (1183 m) sur la période 1981-2010. Données : MétéoFrance. 54
3.20 Cumuls de précipitations et températures moyennes mensuelles à la station de Megève (1080 m) en 2015 (a), 2016 (b) et 2017 (c). Données MétéoFrance. 55
3.21 Ecarts de précipitations et températures mensuelles par rapport à la moyenne 2015-2017. Données MétéoFrance. 56
3.22 Régime hydrologique à Megève : débits moyens annuels, hauteur moyenne de neige et débits réservés. Figure modifiée d'après LEROY (2015). Données : TENEVIA (2014). . . . 57
3.23 Ressources prélevées et réseau de distribution d'eau potable de Megève. 60
3.24 Calendrier des travaux de terrain effectués et des données récoltées. 63
3.25 Compteur domestique d'eau potable équipé d'une antenne radio pour la relève à distance. 64
3.26 Plan de délimitation de la prairie et du jardin retenus pour le monitoring (a). Image : (c) 2017 Google Earth. Vue de la prairie choisie pour le monitoring (b) et compteur d'eau branché sur le réseau d'irrigation, avec antenne radio pour la relève à distance des index (c). 66
3.27 Installation de monitoring sur le réseau d'irrigation en amont du vignoble : chambre de la vanne coupe-pression où est installée la sonde débitmètre. 67
3.28 Installation de monitoring sur le réseau d'irrigation en amont du vignoble : datalogger (a) et sonde débitmètre insérée dans la vanne coupe-pression (b). Photographies : avril 2015. 68
3.29 Datalogger Hobo d'intérieur dans la cave d'une maison (a) et datalogger Hobo-Station dans un regard (b). Photographies : décembre 2014. 70
3.30 Datalogger (modèle d'intérieur) protégé par une pochette plastique, provisoirement installé dans un regard suite à la panne d'un Hobo-Station (a). Ré-installation d'un logger Hobo-Station, mis à l'abri de la condensation dans une boîte en plastique (b). Bricolage inventé par le fontainier communal pour remplacer un loggeur Hobo-Station défectueux par un loggeur Hobo d'intérieur (c). 71
3.31 Regard dégagé de la neige (a) et antenne réceptrice utilisée pour la relève à distance des compteurs d'eau équipés d'émetteurs radio (b). Photographies : février 2015. 72

4.1 Water use cycle in Montana: (a) withdrawals from resource basins, (b) distribution to water use basins 77
4.2 Water use regimes in Montana (2015-2016): (a) drinking water distribution, (b) cumulative drinking water deliveries to water use basins, by category of user 81
4.3 Regimes of drinking water delivered to different categories of users in the Montana tourist resort: (a) Houses, (b) Apartment blocks, (c) Apartment blocks with businesses and hotels 83
4.4 Water use regimes in Montana (2015-2016): (a) irrigation water delivered to the pasture and garden test plots, (b) irrigation water distributed to the vineyard area. Grey bars in (b) indicate periods with missing data. 84
4.5 Summary of water use dynamics in Montana (2015-2016): (a) water use densities, (b) water use regimes 86

5.1 Location of the municipality of Megève 95

5.2 Water use cycle . . . 97
5.3 Schematic synthesis of the methodology . . . 98
5.4 Municipal drinking water distribution in Megève and explicative factors. The blank parts in drinking water distribution time series corresponds indicates periods without data. . . . 101
5.5 Schematic representation of Megève's municipal drinking water distribution dynamic . 102
5.6 Drinking water deliveries to the monitored sample . . . 105
5.7 Typology of drinking water delivery regimes with their annual mean unit values . . . 107
5.8 Modeling of drinking water distribution dynamics from the water delivery typology, using the analog method . . . 109

6.1 Outils et méthodes utilisés pour l'estimation des usages d'irrigation. . . . 117
6.2 Sortie du tunnel du Mont Lachaux (a), au niveau du répartiteur de Plans Mayens (commune de Lens). L'eau brute (visible sur l'image) et l'eau de source (mise en conduites) sont réparties entre Montana, Chermignon, Lens et Icogne. Vue du lac de la Moubra (b), où sont stockées les eaux brutes de Montana. . . . 119
6.3 Bassins d'usages de l'eau d'irrigation et réseaux d'irrigation à Montana. Les limites communales sont celles valables avant le 01.01.2017. . . . 121
6.4 Réservoir de Tsandemier (a), prise d'eau sur le torrent de Montana (b) et dessableur (c). Photographies : mai 2015. . . . 122
6.5 Mise en eau du réseau d'irrigation par le fontainier communal, au niveau des prairies. Photographie : mai 2015. . . . 123
6.6 Parcelles de pâturages non irrigués (pâturages secs) sous la ferme, en contrebas de Montana-Village. . . . 124
6.7 Arrosage des prairies et pâturages : buse d'aspersion (a) en haut de Corin (b) et installation mobile d'arrosage à Montana Village (c). Photographies : mai 2015. . . . 126
6.8 Cycles de rotation des vaches sur les pâturages (a) et des coupes des prairies de fauche (b), avec les moments d'irrigation associés. . . . 127
6.9 Vue générale du vignoble de Corin (a), irrigation par aspersion sur une parcelle de jeunes vignes (b) système d'irrigation par goutte-à-goutte (c). Photographies : juin 2016 (a,b) et juillet 2015 (c). . . . 129
6.10 Vue simplifiée des sols et des réserves utiles en eau moyennes, sous le vignoble desservi par le réseau d'irrigation de Montana. Photographies : Martin Calianno, 2016. Données pédologiques : LETESSIER et MARION 2007. . . . 132
6.11 Calendrier communal 2015 des tours d'eau d'irrigation du vignoble de Montana. . . . 138
6.12 Zones d'arrosage du vignoble irrigué par le réseau de Montana et classification des parcelles suivant le type de viticulteur (professionnel ou amateur). Cartographie : Martin Calianno. Source : Service de l'agriculture, Canton du Valais (données 2015). . . . 140
6.13 Stades phénologiques de la vignes et moments d'irrigation. Source des images (pinot noir) et des observations (chasselas) : Agroscope. Réalisation du schéma : M. Calianno. . 144
6.14 Evolution de l'irrigation du vignoble au cours du 20e siècle. . . . 147
6.15 Irrigation des jardins aux résidences Hauts de Crans : pelouses (a), vanne d'arrosage (b) et système d'arrosage sous pression (c). Photographies : juillet 2015. . . . 149
6.16 Arrosage des espaces verts publics à Corin : a) place de jeux ; b) parterre de fleurs et c) terrain de football. Photographies : juillet 2016. . . . 150
6.17 Températures moyennes journalières, précipitations et déficit hydrique (avec ET_0 selon Penman-Monteith) sur la période janvier-octobre pour les années 2015, 2016 et 2017. Données : station MétéoSuisse de Sion (altitude 482 m). . . . 156
6.18 Apports d'irrigation mesurés pour la parcelle de prairie. . . . 162
6.19 Apports d'irrigation mesurés pour le jardin privé. . . . 163

6.20 Irrigation distribuée vers la zone du vignoble en 2015, données journalières. Source des données de précipitation et température : station météorologique Agroscope de Sierre Géronde. Les précipitations et températures normales (1981-2010) sont issues de la station MétéoSuisse de Sion. 165
6.21 Irrigation distribuée vers la zone du vignoble en 2015, données horaires. Source des données de précipitation et température : station météorologique Agroscope de Sierre Géronde. 168
6.22 Irrigation distribuée vers la zone du vignoble en 2016, données horaires. Source des données de précipitation et température : station météorologique Agroscope de Sierre Géronde. 169
6.23 Irrigation distribuée vers la zone du vignoble en 2017, données horaires. Source des données de précipitation et température : station météorologique Agroscope de Sierre Géronde. 170
6.24 Facteurs déterminant le régime, l'intensité et la distribution spatiale de l'irrigation à Montana. 172
6.25 Récapitulatif des valeurs d'irrigation des prairies et du vignoble estimées et mesurées à Montana. 174

7.1 Fiche-diagnostic des usages de l'eau d'un territoire. 195
7.2 Recommandations pour le monitoring des usages de l'eau suivant différentes stratégies. 197
7.3 Schéma de mis en oeuvre du monitoring recommandé pour les usages de l'eau potable. 200
7.4 Schéma de mis en oeuvre du monitoring recommandé pour l'irrigation. 202

Liste des tableaux

2.1 Echantillon de termes utilisés dans la littérature scientifique pour désigner les notions d'usage, besoin, prélèvement distribution et consommation en eau. 13
2.2 Définition des termes retenus dans cet article pour décrire le cycle d'usage de l'eau, dans l'ordre suivant : usage (terme le plus générique), besoin et demande (notions immatérielles), prélèvement, distribution, apport, consommation et restitution (étapes du cycle technique). 21

3.1 Montana : évolution de l'exploitation agricole (1946-2008). Source des données : ARCALPIN (2010). 44
3.2 Montana : démographie et capacatié d'accueil touristique. 45
3.3 Megève : démographie et capacatié d'accueil touristique. 58
3.4 Megève : répartition des prélèvements d'eau potable par usage en 2012, 2013 et 2014. Données : BRANCHEREAU (2015). 60

5.1 Sample of buildings chosen for monitoring. 98
5.2 Evaluation of the reconstruction of drinking water distribution extrema 110

6.1 Entretiens réalisés concernant les usages d'irrigation. 116
6.2 Relation entre réserve utile des sols (RU) et irrigation effective souhaitée, d'après LETESSIER et MARION 2007. 133
6.3 Stades phénologiques de la vigne, modifié d'après BLOESCH et VIRET (2008). 143
6.4 Estimations des prélèvements en eau brute destinée à l'irrigation dans la commune de Montana. 151
6.5 Estimation des apports en eau d'irrigation pour les prairies, selon le rapport d'améliorations structurelles de Montana (ARCALPIN 2014). 152
6.6 Estimation des apports en eau d'irrigation pour les pâturages et prairies, corrigée avec les tours d'eau observés à Montana. 153
6.7 Estimation des apports en eau d'irrigation pour le vignoble, selon les observations des pratiques d'irrigation. 154
6.8 Estimation des apports en eau d'irrigation pour le vignoble, selon les observations des pratiques d'irrigation et la pédologie du vignoble. 155
6.9 Coefficients de culture utilisés pour la modélisation CropWat. 158
6.10 Paramétrisation de la modélisation CropWat. 159
6.11 Modélisation CropWat et extrapolation des volumes pour l'ensemble du vignoble de Corin. 159
6.12 Modélisation CropWat et extrapolation des volumes pour l'ensemble des prairies de Montana. 160
6.13 Modélisation WEAP-MABIA de l'irrigation des prairies et des vignes sur trois années-types pour la région de Crans-Montana-Sierre selon BONRIPOSI (2013) et extrapolation des volumes pour la commune de Montana. 161
6.14 Apports d'irrigation à la praire par tour d'arrosage et estimation de l'efficience. 163
6.15 Apports annuels d'irrigation au jardin privé. 164
6.16 Estimation des surfaces arrosées dans la zone de Corin. 164
6.17 Distributions d'irrigation vers la zone du vignoble mesurées en 2015, 2016 et 2017. . . . 166

6.18 Distributions totales d'irrigation destinées aux vignes, mesurées en 2015, 2016 et 2017. . 171
6.19 Récapitulatif des valeurs d'irrigation des prairies et du vignoble estimées et mesurées à Montana. (∼) : valeur extrapolée suite à des données manquantes. 173

7.1 Stratégies de monitoring choisies en fonction du contexte de chaque terrain. 182
7.2 Données à collecter pour le monitoring des usages de l'eau potable. 199
7.3 Données à collecter pour le monitoring de l'irrigation. 201

Chapitre 1

Introduction générale

1.1 Mise en contexte de la recherche

Considérée comme le château d'eau de l'Europe (ONDE 1953) en donnant naissance à ses plus grands fleuves, les Alpes sont généralement vues comme un territoire riche en ressources en eau. Ceci est vrai dans les grandes vallées collectant les ruissellements, mais le contexte des ressources est souvent plus délicat dans les territoires d'altitude. En effet, leur situation en tête de bassin versant n'autorise la présence que de torrents à débits faibles par rapport aux grandes rivières de vallée et leur topographie escarpée ne permet pas d'importants stockages d'eau souterraine sous forme de nappes. Des situations de pénurie peuvent même se produire lorsque ces territoires d'altitude subissent d'importants pics d'usage de l'eau liés au tourisme ou à l'agriculture. Les usages de l'eau potable et de l'irrigation dans les territoires touristiques de montagne, généralement peu documentés et apparaissant plus rarement dans le débat public en comparaion des usages de montagne tels que la production de neige artificielle ou la production hydroélectrique, méritent d'être approfondis. Leur quantification fait l'objet de ce travail de thèse.

Les usages dans le système EAU

Les usages de l'eau sont considérés comme une unité à part entière du système de gestion de l'eau, ou *système EAU* (REYNARD 2008), mise en relation avec l'hydrosystème, le système de gestion et le système socio-économique et politique (Fig. 1.1).

L'hydrosystème est le pôle 'naturel' du système EAU, aussi appelé *grand cycle de l'eau* (ERHARD-CASSEGRAIN et MARGAT 1983), et inclut comme élements l'atmosphère, les précipitations, les eaux souterraines, l'eau des sols et de la biomasse, les eaux de surface, les mers et océans. Les eaux de ces éléments constituent les *ressources* hydriques, potentiellement prélevables et utilisables par l'homme (MUSY et al. 2014). Dans le système EAU, l'hydrosystème est la toile de fond bio-physique sur laquelle viennent se greffer d'autres systèmes produits par l'homme (REYNARD 2000b). Le système socio-économique et politique est caractérisé par les activités humaines de production et de services et par les structures administratives et politiques qui conditionnent le développement des activités économiques et sociales, tout comme les interventions sur le système naturel (REYNARD 2000b). Le système des usages est le pôle 'humain' du système EAU. Il comprend toutes les utilisations faites de l'eau, essentiellement par l'homme (eau potable, moyen de production, énergie, loisirs, navigation, ...) mais aussi par la faune et la flore (milieu vital). A ces usages de l'eau sont associées des pratiques et habitudes qui sont propres aux acteurs, *usagers* de l'eau. L'eau en tant qu'élément du paysage perçu par l'homme est également considéré comme un usage. Enfin, le système de gestion assure le lien entre le système des usages et l'hydrosystème. Il comprend un pôle matériel (le système technique : réseaux, réservoirs, compteurs) et un pôle de régulation (le système institutionnel : les politiques publiques, le droit et la gestion administrative).

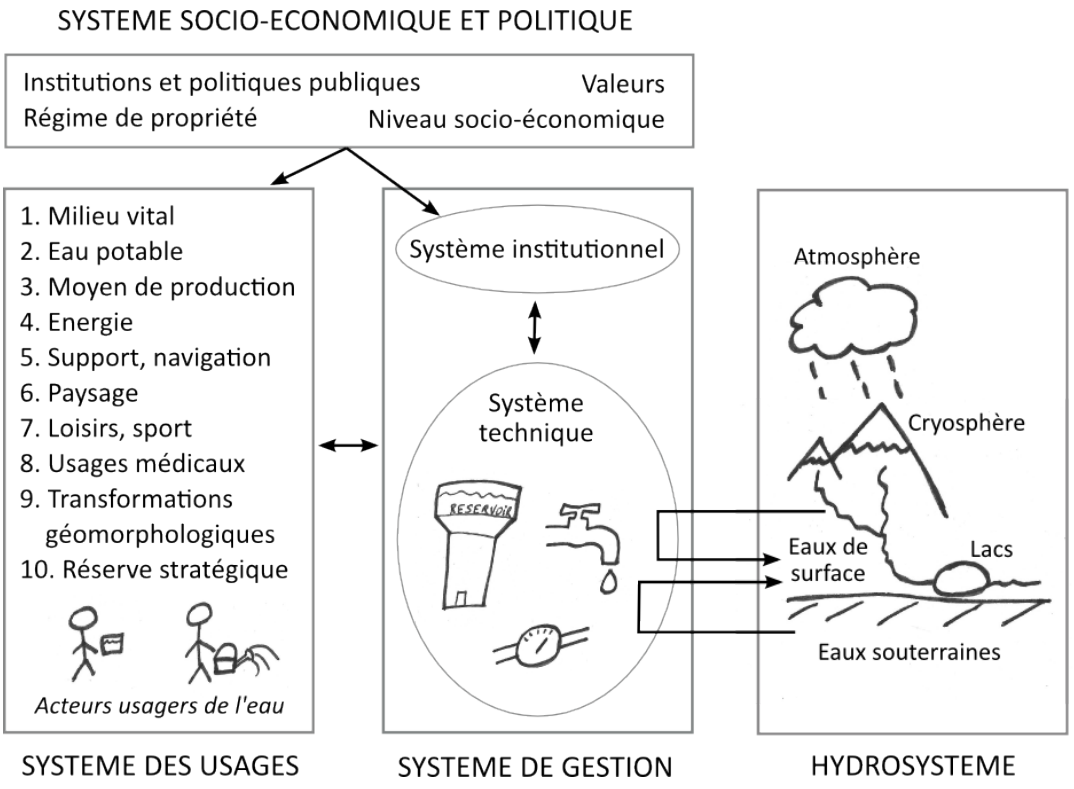


FIGURE 1.1 – Représentation systémique d'un système de gestion de l'eau, modifié d'après REYNARD (2008).

Dans ce travail de thèse, c'est le pôle des usages (la demande) qui est étudié, en opposition aux ressources en eau (l'offre), qui est le pôle le plus documenté dans la littérature hydrologique (SHIKLOMANOV 1998 ; VÖRÖSMARTY 2000 ; BENISTON et STOFFEL 2013). C'est donc le *cycle influencé* de l'eau, ou *petit cycle* de l'eau, qui est au coeur de cette recherche, en parallèle au *grand cycle* de l'eau (l'hydrosystème naturel) (BUCHS 2012). Dans le cadre du système EAU, le cycle influencé de l'eau, qui est défini dans ce travail comme le *cycle d'usage de l'eau*, inclut le système des usages et le système technique (compteurs d'eau, réseaux) du système de gestion. Dans ce travail, les usages sont documentés en utilisant le système technique comme objet d'investigation. En effet, les usages de l'eau sont relativement bien étudiés dans la littérature scientifique pour ce qui est des questions d'organisation institutionnelle et de gouvernance (BRÉTHAUT 2012 ; BUCHS 2016 ; MUNIZ-MIRANDA 2017), des approches économiques (MONTGINOUL 1998 ; BABEL et al. 2007 ; BARRAQUÉ et al. 2011 ; BUCHS et PETIT 2015), de l'aspect patrimonial de l'usage (REYNARD 2000b), des conflits d'usage (AGUILERA-KLINK et al. 2000 ; MILLINGTON 2018), de l'analyse des déterminants de la demande (MONTGINOUL 2013 ; ROMANO et al. 2016), des interactions avec la sphère sociale et politique (SWYNGEDOUW 2009 ; LINTON et BUDDS 2014) et des question de qualité l'eau (MILANO et al. 2017). Ces approches des usages au sein du système EAU ne sont pas directement abordées ici. A contrario, les études visant à quantifier les usages sont beaucoup moins nombreuses, voire inexistantes. C'est pourquoi dans cette thèse, la documentation des usages de l'eau est effectuée sous l'angle quantitatif : l'usage est défini et étudié sous l'angle des volumes employés.

Au vu de son positionnement dans le système EAU, la question des usages se trouve à cheval entre sciences naturelles et sciences humaines, avec un ancrage temporel et spatial : il s'agit donc d'un objet géographique. C'est toutefois le volet quantitatif qui tient le rôle principal dans ce travail (en termes de volumes d'eau, de données statistiques, de mesures techniques, de dataloggers). C'est également un sujet directement lié aux aspects humains, car ce sont les acteurs usagers de l'eau qui effectuent la demande. Toute une série de facteurs sociétaux entrent donc en jeu et influent sur les volumes d'eau utilisés, leur saisonalité et leur répartition spatiale. Ces facteurs explicatifs sont appelés les *déterminants* de la demande (CORBELLA et PUJOL 2009 ; MONTGINOUL 2013).

Les usages dans la gestion intégrée de l'eau

Depuis les années 2000, la gouvernance du système EAU a été formalisée selon le paradigme de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE). Le principe de la GIRE est de favoriser une gouvernance concertée et à toutes les échelles de gestion (MUNIZ-MIRANDA 2017). C'est un « *processus qui favorise le développement coordonné de l'eau, du territoire et des ressources associées, afin de maximiser d'une manière équitable le bien-être économique et social, sans compromettre la pérennité des écosystèmes vitaux* » (GWP 2000). La GIRE intègre de manière *horizontale* les ressources (l'offre), les usages (les acteurs demandeurs) et les organes de gestion (les acteurs de la gouvernance) et de manière *verticale* les différentes échelles de gestion : locale, régionale, nationale et internationale (REYNARD 2000b). Dans ce travail, je préfère utiliser le terme de Gestion Intégrée de l'Eau (GIE), afin de ne pas mettre en avant le pôle des ressources vis-à-vis du pôle des usages. Par rapport à l'intégration horizontale, comme précisé précédemment, c'est le pôle des usages qui est étudié dans ce travail. Du point de vue vertical, les usages sont traités principalement au niveau de l'échelle locale, jusqu'à l'échelle de l'usager.

La volonté d'intégration des échelles et des systèmes ressources-usages-gestion a également poussé les recherches scientifiques à développer des modèles intégrés confrontant la disponibilité des ressources en eau avec les demandes, aux échelles globales (FALKENMARK et WIDSTRAND 1992 ; ALCAMO et al. 2003 ; WADA et al. 2011), nationales (CHARLTON et ARNELL 2011 ; SCHÄDLER et al. 2012 ; BLANC et SCHÄDLER 2013) et régionales (KÖPLIN et al. 2012 ; MILANO et al. 2012, 2015) et à l'échelle du bassin versant (MILANO et al. 2013a ; FABRE et al. 2015 ; COLLET et al. 2015). Ces modèles intégrés ont pour objectif d'évaluer l'état hydrique d'un territoire (en faisant des bilans ressources-demandes) et de donner des indicateurs de stress hydrique permettant d'identifier les possibles situations de pénurie. Ce type de modèle, principalement développé dans le domaine des sciences naturelles, présente une base solide en ce qui concerne l'estimation des ressources hydriques, mais présente généralement des modules d'estimation de la demande relativement peu détaillés. C'est pourquoi certaines recherches s'attachent à développer d'avantage l'estimation du pôle des usages (GROUILLET et al. 2015 ; LEROY 2015).

Par ailleurs, dans le contexte actuel où l'attention est fortement portée sur les changements globaux, ces bilans ressources-demandes permettent aisément de produire des projections sur l'état hydrique d'un territoire en modélisant les effets possibles des changements climatiques et socio-économiques sur les ressources et demandes (MILANO et al. 2013a, 2015 ; FABRE et al. 2016 ; GUERMAZI et al. 2018). A ce sujet, RINAUDO 2015 passe en revue les méthodes existantes de projection de la demande.

Les usages de l'eau en territoire touristique de montagne

Les régions de montagne offrent un environnement particulier dans lequel s'inscrivent les usages de l'eau. Le contexte de ces territoires, situés en tête de bassin versant, avec des régimes hydrologiques propres et présentant une topographie escarpée, peut limiter l'accès aux ressources et engendre une structuration amont-aval des usages très marquée. Certains usages y sont propres, comme la production de neige artificielle (MAGNIER 2013 ; PACCARD 2010) ou d'hydroélectricité (MARNEZY 2008 ; SCHÄDLER et al. 2012). Plusieurs études ont été consacrées aux territoires de montagne pour en faire des bilans ressources-demandes à l'échelle régionale (KLUG et al. 2012 ; CHARNAY 2010) ou sur l'ensemble de la chaîne alpine (SAULNIER et al. 2011).

Le contexte des régions touristiques induit aussi des implications importantes pour les usages de l'eau. La concentration de l'habitat et des équipements dans une station touristique influe sur les volumes d'eau potable distribués et les variations de population temporaire engendrent de fortes saisonnalités de la demande (REYNARD 2000b, 2001). Divers travaux ont abordé la quantification des usages de l'eau en région touristique côtière (GOSSLING 2002 ; RICO-AMOROS et al. 2009) et alpine (VANHAM et al. 2011 ; REYNARD et BONRIPOSI 2012 ; BONRIPOSI 2013 ; LEROY 2015).

La thématique de cette thèse a été construite à partir des questions restées ouvertes suite aux travaux de REYNARD (2000a,b, 2001) portant sur la gestion des ressources en eau dans les stations touristiques de montagne, avec les cas de Crans-Montana et Nendaz (Valais). Le projet MontanAqua qui a

suivi (WEINGARTNER et al. 2010) s'est focalisé sur la région de Crans-Montana-Sierre pour en effectuer un bilan actuel et futur des ressources, des demandes et de la gestion de l'eau en fonction de divers scénarios climatiques et socio-économiques (BONRIPOSI 2013 ; REYNARD et al. 2014). Une des principales conclusions de ce projet est qu'à l'horizon 2050, l'impact des choix socio-économiques concernant le développement de la région (et donc des usages de l'eau) devrait être plus important que l'impact des changements climatiques (REYNARD et al. 2014). Un autre constat concernait le manque de données et de connaissances relatives aux usages de l'eau (REYNARD 2014).

L'objectif général de cette thèse est d'améliorer les connaissances relatives aux usages de l'eau potable et à l'irrigation. Du point de vue opérationnel, cette connaissance est importante pour dimensionner les installations à renouveler ou à construire et pour aider les communes à mieux gérer la ressource et les éventuels conflits entre les différents usages. Pour réaliser cet objectif, deux cas d'étude ont été choisis : les communes touristiques alpines de Montana[1] (Valais) et Megève (Haute-Savoie). Puisque cette thèse a débuté avant 2017, le découpage administratif initial a été conservé.

1.2 Problématique générale

La problématique de la quantification des usages de l'eau en territoire de montagne est déclinée en quatre enjeux.

Enjeu 1 : la terminologie des usages de l'eau

Un premier constat soulevé à la lecture de la littérature scientifique en lien avec la gestion de l'eau porte sur les nombreuses incohérences dans l'emploi des termes relatifs aux usages de l'eau. Les auteurs utilisent des termes différents pour désigner l'usage de l'eau : consommation, demande, besoin. Les usages sont tantôt estimés par les prélèvements, la distribution dans les réseaux ou les utilisations faites par l'usager. Ces différentes manières d'aborder le sujet de l'usage, en désignant des quantités d'eau différentes ou en utilisant plusieurs termes pour désigner le même objet, apportent des confusions lorsqu'il s'agit d'analyser les usages sous l'angle quantitatif : il n'est pas toujours facile de savoir à quel volume d'eau correspond chaque terme.

Enjeu 2 : la disponibilité des données d'usage et les méthodes de quantification (monitoring)

Un constat soulevé suite au projet MontanAqua et dans les travaux de modélisation intégrée de l'eau est le manque de données disponibles concernant le pôle des usages. Un autre problème vient également du fait que les données utilisées sont souvent approximées, ou produites à partir de valeurs moyennes. Ce contexte rend difficile la construction d'une image des usages de l'eau qui soit fidèle à la réalité, notamment dans les régions touristiques, où la population fluctue fortement au cours de l'année. Ce problème est d'autant plus aigu que ces séries de données d'usages approximées servent de base pour le pôle 'usages' des modèles de prévision.

Concernant l'irrigation, il existe peu de mesures directes. Par ailleurs, les données disponibles pour les réseaux d'eau potable à l'échelle de l'usager sont souvent de résolution temporelle insuffisante car elles se basent sur les facturations annuelles. Des valeurs approchées ou valeurs indirectes (estimations, proxis) sont alors régulièrement employées en prenant des valeurs unitaires moyennes en litres par jour et par habitant, et en les multipliant simplement par le nombre de jours considérés et par la population de la zone étudiée. Le désavantage de l'utilisation des valeurs moyennes est qu'elles ne rendent pas compte de la diversité des usages du territoire étudié, alors que ces usages particuliers peuvent engendrer des effets de saisonalités dans les séries temporelles d'usages. De la même manière, les périodes de forte intensité de la demande (pics d'usage) ne sont de cette manière pas représentées, alors que ce sont elles qui sont généralement responsables des événements de pénurie sur les temps courts. Du point de vue de la résolution spatiale, les données d'usage à l'échelle locale ou de l'usager

[1] Depuis janvier 2017, Montana a fusionné avec les communes de Chermignon, Randogne et Mollens pour former la nouvelle commune de Crans-Montana.

sont rares. Les données disponibles sont souvent à des échelles trop grandes pour pouvoir différencier des classes d'usages ou des comportements spécifiques au niveau de l'usager.

Par rapport aux ressources hydriques, les usages de l'eau apparaissent donc comme moins bien connus, que ce soit dans la recherche scientifique ou dans la pratique des gestionnaires. Est-ce dû à une approche tournée vers l'infrastructure ? Cela vient-il du fait qu'une situation de manque de ressources soit plus facile à solutionner par la recherche de nouvelles ressources, plutôt que par des politiques d'incitation au changement des pratiques ? Dans le contexte des travaux de modélisation intégrée, l'approche par la demande est donc de plus en plus développée, afin de reproduire plus fidèlement les volumes d'eau utilisés et leur dynamique.

Enjeu 3 : les spécificités des usages de l'eau en région touristique de montagne

Les usages de l'eau potable et l'irrigation ont leurs spécificités propres en termes de pratiques et de saisonalités, liées au contexte des régions de montagne et des stations touristiques.

D'une part, la topographie et les différences d'altitude jouent un rôle important dans les relations amont-aval entre usages. A l'inverse des territoires de plaine, après utilisation, l'eau ne peut généralement pas être réutilisée pour un autre usage dans la même zone car si elle n'est pas stockée elle sera restituée plus en aval et rendue non disponible. Du point de vue de la ressource, les hauts bassins versants jouent un rôle dans la disponibilité temporelle de l'eau en lien avec les régimes hydrologiques glaciaires qui comportent des étiages prononcés en hiver et les régimes nivo-pluviaux qui ont un étiage en fin d'été. La topographie et la configuration des versants ont également pour conséquence que les zones où sont effectuées les usages peuvent être déconnectés des bassins versants contenant les ressources disponibles.

D'autre part, les régions touristiques apportent des enjeux liés à la saisonalité des usages de l'eau potable et à leur concentration spatiale. Ceci est dû aux importantes variations de la population présente dans les stations touristiques, souvent densément urbanisées par rapport aux villages montagnards traditionnels. Ces variations induisent des pics de demande en eau potable durant les hautes saisons touristiques, en hiver et en été. Ces pics sont souvent intenses et peuvent causer des épisodes de pénurie en eau potable sur des périodes de temps court (quelques jours). L'irrigation est pour sa part également saisonière par nature. Aux variations saisonières il faut aussi ajouter les variations inter-annuelles qui font que chaque année est un millésime différent pour les usages de l'eau potable touristique, qui dépendent de l'enneigement en hiver et du beau temps en été, et pour l'irrigation, qui dépend elle aussi des conditions météorologiques.

A la problématique de la saisonalité des usages de l'eau potable viennent se greffer les enjeux du manque de données, car les données concernant l'occupation des stations touristiques (visiteurs journaliers, touristes et résidents secondaires) sont difficiles à obtenir. Il n'est donc souvent pas possible d'estimer les usages de l'eau potable en croisant des valeurs moyennes unitaires avec les données de population. Il apparaît donc difficile de représenter la variabilité temporelle et spatiale des demandes en eau dans les territoires de montagne, où les usages touristiques de l'eau potable et l'irrigation ont une saisonalité marquée.

Enjeu 4 : les écarts entre l'estimation de l'usage de l'eau et l'usage effectif

Le dernier enjeu est lié à la question de l'écart existant entre les résultats produits par les méthodes d'estimation et les usages effectifs, liés aux pratiques observées sur le terrain. Au vu du manque de données obervées pour les usages, il existe peu de moyens d'évaluer la capacité des modèles d'estimation à reproduire les usages de l'eau et leur variabilité. En d'autres termes, il manque un moyen de validation et de calibration de ces méthodes d'estimation. Cette validation devrait passer par une stratégie de monitoring adaptée aux usages de l'eau, permettant d'obtenir des données à échelles temporelle et spatiale suffisantes. Il est égalemenent nécessaire d'approfondir les connaissances sur les pratiques des acteurs usagers de l'eau potable et de l'irrigation, afin d'expliquer et justifier les données mesurées. Le désavantage des méthodes d'estimation étant qu'elles généralisent les processus et lissent les variabilités, une connaissance détaillée des pratiques d'usage permettrait de les améliorer. Ces pratiques sont délicates à estimer car elles dépendent de facteurs humains et individuels : chaque usager à sa propre habitude et prend sa propre décision d'utiliser l'eau. D'autres sources d'erreur des méthodes d'estimation viennent aussi du fait que les données d'usage utilisées proviennent d'étapes différentes du cycle d'usage de l'eau et désignent des quantités d'eau qui ne peuvent être comparées entre elles.

1.3 Objectifs et plan de recherche

Cette thèse *par articles* est construite sur un mode 'hybride', c'est-à-dire qu'elle est composée d'articles publiés (chaque article étant sous la forme d'un chapitre), entre lesquels s'intercalent certains chapitres

complémentaires. Elle est également polyglotte, puisque sur les trois articles publiés, deux sont écrits en anglais et ont été inclus tels quels dans le manuscrit, alors que les autres chapitres sont rédigés en français.

Pour répondre aux enjeux développés dans la section précédente, huit objectifs ont été définis. L'articulation des enjeux avec les objectifs est illustrée dans un organigramme (Fig. 1.2), qui reprend également l'organisation des chapitres de la thèse et des articles associés.

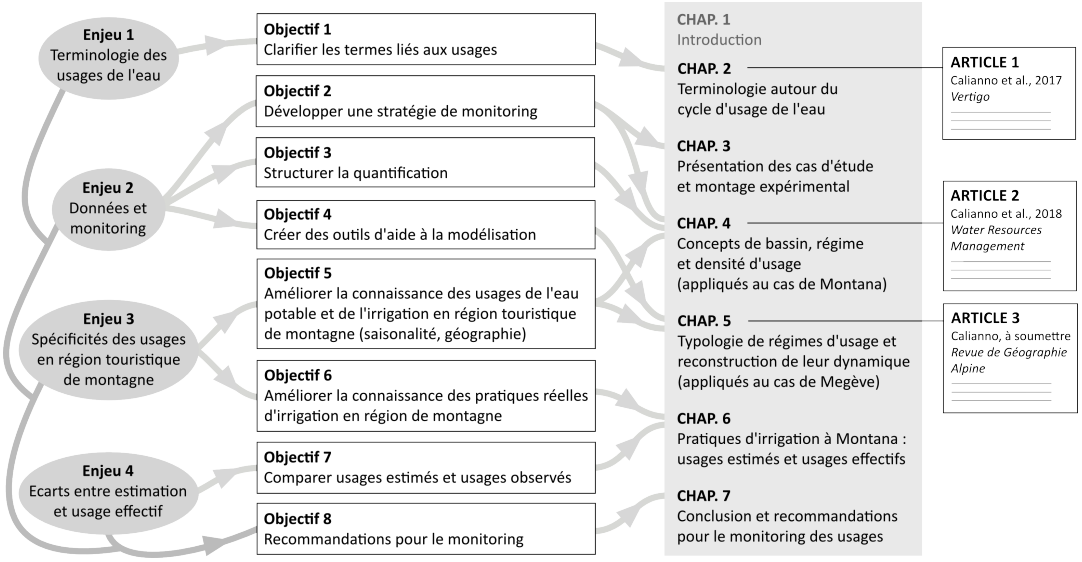


FIGURE 1.2 – Organigramme du manuscript de thèse : articulation des enjeux, objectifs, chapitres et articles.

Objectif 1 : Définir les termes liés à l'usage de l'eau

En réponse au premier enjeu concernant le flou terminologique, le premier objectif est de proposer une clarification des termes liés aux usages de l'eau. Dans un premier temps, une revue de littérature fait le point des termes utilisés et de leur signification, suivie d'une proposition de terminologie des usages de l'eau. Chaque terme (besoin, demande, distribution, apport, usage, prélèvement) est défini et articulé autour du concept de **cycle d'usage de l'eau**. Ensuite, des cycles spécifiques sont développés pour certains usages particuliers de l'eau : les usages de l'eau potable, l'irrigation et les usages environnementaux.

Objectif 2 : Développer une stratégie de monitoring des usages

En réponse à l'enjeu du manque d'observations directes des usages de l'eau, cet objectif vise à développer un mode opératoire pour la collecte des données d'usages de l'eau *in-situ* et à fine échelle temporelle et spatiale, dans le cas des territoires touristiques de montagne. Les usages de l'eau potable et l'irrigation sont choisis pour effectuer un monitoring des distributions (à l'échelle communale) et des apports (à l'échelle de l'usager). Du point de vue temporel, les mesures sont faites aux pas de temps journaliers et hebdomadaires. C'est en confrontant le contexte institutionnel et infrastructurel avec les moyens techniques de mesure disponibles qu'une stratégie de monitoring est développée pour chacun des cas d'étude (Megève et Montana).

Objectif 3 : Structurer la quantification des usages de l'eau

Une fois les séries de données d'usage récoltées, un cadre conceptuel et des outils sont proposés pour une structuration de la quantification des usages à l'échelle locale. Pour cela, trois concepts sont définis : le **bassin d'usage** (la répartition dans l'espace), la **densité d'usage** (l'intensité relative à l'emprise spatiale) et le **régime d'usage** (la dynamique saisonière).

Objectif 4 : Créer des outils d'aide à la modélisation des usages

Pour le cas des usages de l'eau potable en station touristique de montagne, une typologie de régimes d'usage a été définie à Megève, en fonction du type d'habitat (individuel, collectif), du mode de résidence (secondaire, permanente) et selon certains usages spécifiques (bureaux, hôtels, fermes). Cette typologie permet une **reconstruction des dynamiques de distribution** d'eau potable à l'échelle municipale, en utilisant ces régimes types comme patrons de la dynamique spatiale des différentes catégories d'usage.

Objectif 5 : Améliorer la connaissance sur la saisonalité et la spatialité des usages alpins

En réponse à l'enjeu de la spécificité des usages de l'eau en territoire touristique de montagne, cet objectif vise à documenter les **dynamiques saisonières** et la **répartition spatiale** des usages de l'eau potable et de l'irrigation, dans les communes de Montana et Megève. Ce point est en réalité l'application à des cas réels de la stratégie de monitoring et des concepts de quantification des usages.

Objectif 6 : Améliorer la connaissance sur les pratiques d'irrigation en montagne

L'enjeu du manque de connaissance des usages d'irrigation a également mis en évidence le manque de connaissance des pratiques mises en oeuvre par les usagers irrigants sur le terrain. C'est pourquoi cet objectif vise à documenter les **pratiques effectives** des acteurs de l'irrigation en montagne (à Montana) et utiliser ces informations pour améliorer les méthodes d'estimation de l'irrigation.

Objectif 7 : Confronter les méthodes d'estimation de l'irrigation aux pratiques effectives

Pour répondre à l'enjeu de l'écart entre les demandes en eau produites par des méthodes d'estimation et les demandes effectives, les mesures *in-situ* de l'irrigation effectuées à Montana lors du monitoring sont utilisées pour effectuer un travail de **validation** des différentes outils d'estimation de l'irrigation. Les méthodes testées sont : l'utilisation de données de prélèvements, les méthodes empiriques (utilisant des valeurs unitaires moyennes) et les modèles agro-climatiques CropWat (de la FAO) et WEAP-MABIA.

Objectif 8 : Proposer des recommandations pour le monitoring des usages

Ce dernier objectif vise à combler les lacunes méthodologiques concernant la quantification des usages de l'eau en territoire touristique de montagne. En confrontant le contexte des réseaux de distribution (eau potable, irrigation) de ces territoires, les moyens techniques de mesure disponibles et l'expérience pratique acquise lors des campagnes de terrain, une série de **recommandations pour le monitoring** des usages est proposée.

La structure du manuscrit est organisée comme suit (Fig. 1.2). Le chapitre 2 est le premier article de cette thèse, publié dans la revue *Vertigo* (CALIANNO et al. 2017). Il propose une clarification terminologique des usages de l'eau autour du concept de cycle d'usage et se positionne dans la thèse en tant qu'état de l'art de la littérature et comme partie théorique générale. Ensuite, le chapitre 3 présente les cas d'étude (Montana et Megève) et le montage expérimental mis en place. Les résultats obtenus lors des campagnes de monitoring des usages effectuées dans les cas d'étude sont présentés dans le chapitre 4 (article 2, publié dans la revue *Water Resources Management* ; CALIANNO et al. 2018) et le chapitre 5 (article 3, à soumettre à la *Revue de Géographie Alpine* ; CALIANNO à soumettre). Dans le chapitre 4 sont définis les concepts de bassin, densité et régime d'usage, appliqués au cas de Montana. Le chapitre 5 approfondit le concept de régime d'usage en mettant en évidence une typologie de régimes des usages de l'eau potable domestique et en développant une méthode de reconstruction de la saisonalité de la distribution de l'eau potable. Le chapitre 6 développe la question des pratiques d'irrigation sur la base du cas de Montana, en décrivant ces pratiques et en les utilisant pour améliorer les méthodes d'estimation de l'irrigation. Ces méthodes sont ensuite comparées aux mesures *in-situ* obtenues durant la campagne de monitoring. Enfin, le chapitre 7 conclut en proposant des recommandations pour le monitoring des usages de l'eau en territoire touristique de montagne. Il est prévu de valoriser ces recommandations sous la forme d'une publication destinée aux praticiens de l'eau, qui sera poposée à *Aqua & Gaz*, la revue de la Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux (SSIGE).

Chapitre 2

Quantifier les usages de l'eau : une clarification terminologique et conceptuelle pour lever les confusions (article 1)

Martin Calianno* : Assistant doctorant, Institut de géographie et durabilité, Université de Lausanne, Bâtiment Géopolis, 1015 Lausanne, Suisse, courriel : Martin.Calianno@unil.ch
Emmanuel Reynard : Professeur, Institut de géographie et durabilité, Université de Lausanne, Bâtiment Géopolis, 1015 Lausanne, Suisse, courriel : Emmanuel.Reynard@unil.ch
Marianne Milano : Première assistante, Institut de géographie et durabilité, Université de Lausanne, Bâtiment Géopolis, 1015 Lausanne, Suisse, courriel : Marianne.Milano@unil.ch
Arnaud Buchs : Maître de conférences, UMR LISST-Dynamiques Rurales (CNRS-EHESS-ENSFEA), Université Toulouse Jean Jaurès, 5 allées A. Machado, 31058 Toulouse, France, courriel : arnaud.buchs@univ-tlse2.fr

Mise en contexte de l'article dans la thèse

Cet article est la première publication de la thèse. Il discute la terminologie des usages de l'eau en faisant un état des lieux de la littérature, et constitue de cette manière la partie théorique de la thèse. L'article a été écrit à quatre mains : il est le fruit de longues discussions et argumentations autours des termes des usages de l'eau entre les quatre auteurs, qui sont de spécialités diverses : Emmanuel est géographe et géomorphologue, Marianne Milano est hydrologue, Arnaud Buchs est économiste et moi-même, formé en géologie. Les quatre auteurs ont contribué à part égale à la réflexion ainsi qu'à la rédaction : les définitions ont été obtenues à la suite d'un compromis arraché entre les visions de nos quatre disciplines.

Référence complète de l'article :

M. Calianno, E. Reynard, M. Milano et A. Buchs (2017). "Quantifier les usages de l'eau : une clarification terminologique et conceptuelle pour lever les confusions", VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement (en ligne), Volume 17, Numéro 1, mai 2017. URL : http ://journals.openedition.org/vertigo/18442 ; DOI : 10.4000/vertigo.18442.

Résumé

Cet article met en évidence les confusions existantes relatives aux termes employés dans les travaux sur les usages de l'eau : besoins, demandes, apports, consommation, prélèvements. Nous proposons un cadre terminologique adapté aux enjeux de la quantification de ces termes, nécessaire au suivi de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE). Une revue de la littérature permet d'abord d'identifier les termes synonymes de l'usage de l'eau et leurs diverses interprétations. Ensuite une proposition de terminologie est élaborée autour du concept du cycle d'usage de l'eau, dont la schématisation permet d'illustrer les particularités de chaque terme. Les résultats montrent que les confusions apparaissent principalement au niveau de l'usage même de l'eau, pour lequel les termes associés (besoin, demande, apport et consommation) sont souvent mobilisés de manière imprécise, voire indifférenciée. Les nuances permettant de distinguer ces notions sont décrites via un schéma général de cycle d'usage de l'eau, dont la demande est le moteur principal. Les particularités propres à certains usages sont ensuite schématisées : approvisionnement en eau potable (AEP), irrigation et usages environnementaux. Cette réflexion a été menée conjointement par un géologue, un géographe, une hydrologue et un économiste, ce qui permet d'entretenir le débat sur la terminologie des usages de l'eau et de proposer un essai de synthèse, tel un préalable nécessaire à toute recherche interdisciplinaire sur les « usages de l'eau ».

2.1 Introduction

Des stratégies nationales et locales de gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) ont été mises en place depuis plusieurs décennies (BISWAS 2008 ; GWP 2000) et font encore aujourd'hui l'objet d'une attention particulière, comme en témoignent les Objectifs du millénaire pour le développement actualisés récemment par les Objectifs de développement durable (UNWWAP 2015). Ces stratégies se focalisent notamment sur les usages de l'eau et la sécurité hydrique, avec pour objet la conciliation des objectifs environnementaux, sociétaux et de décentralisation de la gouvernance[1]. Des approches orientées sur la demande en eau (GROUILLET et al. 2015) viennent ainsi compléter les approches classiques de gouvernance de l'eau centrées sur la gestion des ressources et contribuent ainsi à l'effort d'intégration des volets anthropique et naturel dans la gestion de l'eau.

Un des maillons essentiels de la GIRE est le monitoring et la quantification de l'état des eaux, pour permettre le suivi du processus de gestion (AGENDA21 2011). Dans ce cadre, les recherches récentes sur la gestion intégrée de l'eau et la sécurité hydrique offrent un état des lieux du système *EAU* actuel et proposent des scénarios d'évolutions futures possibles de l'offre, de la demande et de leur gestion selon plusieurs scénarios climatiques et anthropiques. Diverses études ont été réalisées à l'échelle globale (ALCAMO et al. 2007 ; PFISTER et al. 2009 ; VÖRÖSMARTY et al. 2010 ; GOSLING et ARNELL 2013), à l'échelle nationale (CHARLTON et ARNELL 2011) et à l'échelle régionale, notamment dans le bassin méditerranéen (MILANO et al. 2012, 2013a,b ; COLLET et al. 2015 ; FABRE et al. 2015, 2016) et dans les Alpes (BENISTON et STOFFEL 2013 ; REYNARD et al. 2014 ; LEROY 2015 ; MILANO et al. 2015 ; SAUQUET 2015).

[1] Rien qu'à propos de la sécurité hydrique, 418 publications académiques ont été recensées sur la période 1990-2010, dont plus de 50 % entre 2005 et 2010 (BAKKER 2012 ; COOK et BAKKER 2012).

L'un des constats récurrents de ces travaux relève le manque de données sur la situation actuelle et passée des utilisations de l'eau. En outre, les informations sont généralement fournies à l'échelle communale et annuelle. Ceci empêche une quantification détaillée des demandes en eau, de leurs variations dans l'espace et dans le temps (FUHRER et JASPER 2012 ; GROUILLET et al. 2015), ainsi que de leurs variations selon le type d'usage. Pour pallier ce manque de données, les principaux usages peuvent être estimés en utilisant des indicateurs unitaires (par exemple en litres par jour et par habitant), moyennés sur de longues périodes et quantifiés de manière indirecte (RINAUDO 2013). Toutefois, il apparaît nécessaire d'améliorer les connaissances sur l'utilisation actuelle et passée de l'eau, en tenant compte de la saisonnalité et des variabilités interannuelles (WADA et al. 2011) ainsi que des variabilités spatiales et de la diversité des pratiques individuelles des usagers au sein même de chaque catégorie d'usage. Dans le domaine de la gestion de l'eau, des efforts sont déjà entrepris pour modéliser les demandes en eau en tenant compte de l'évolution de la population (GROUILLET et al. 2015) et de la concentration de l'habitat (VANHAM et al. 2011).

Or, avant de quantifier des usages de l'eau, il paraît nécessaire de bien définir ce que l'on souhaite mesurer. À quel moment mesurer l'usage de l'eau : au niveau du prélèvement, de l'utilisation ou des rejets ? Lorsqu'un usager utilise une certaine quantité d'eau, est-ce un prélèvement, une consommation, une demande ou un besoin ? Quantifier l'objet « eau » et ses utilisations demande donc une terminologie qui associe sans ambiguïté les mots utilisés et les quantités à mesurer. Pourtant, les différents champs de recherche s'intéressant à la gestion intégrée de l'eau n'appréhendent pas nécessairement les mêmes objets sous des dénominations pourtant similaires. Ainsi, les termes « consommation », « usage », « prélèvement », « dérivation », « extraction », « utilisation », « approvisionnement » et « demande » s'emploient sans pour autant être clairement définis (KOHLI et al. 2012). Prenons l'exemple de la consommation : dans le cas de l'approvisionnement en eau potable (AEP), elle fait parfois référence à une quantité d'eau sortant du système (c'est-à-dire la part d'eau non restituée à l'environnement) ou, le plus souvent, désigne le volume d'eau apporté aux usagers. Outre les problèmes de traduction, ces ambiguïtés sont notamment liées à la pluralité des approches, l'étude des usages de l'eau occupant un domaine au croisement de différentes disciplines (sciences humaines et sociales, sciences naturelles, sciences de l'ingénieur) qui ont leurs terminologies propres. De plus, les usages de l'eau sont traités par des milieux professionnels (presse, politiques publiques) et des acteurs de l'eau (gestionnaires, ONGs) hors de la recherche académique qui adoptent parfois leur propre terminologie. Dans les deux cas, les ambiguïtés et confusions sont bien souvent entretenues par la mobilisation des termes dans des acceptions trop génériques, ce qui génère une certaine confusion sur la signification des chiffres qui leur sont associés (WEISSBRODT 2014). Or lorsqu'il s'agit de prendre des actions concrètes pour la gestion de l'eau, il est indispensable de se mettre d'accord sur les quantités d'eau associées à chaque terme.

Sur la base de ces constats, cette recherche postule que la quantification des usages de l'eau nécessite un travail en amont afin de clarifier les notions et les termes utilisés. A la suite de plusieurs travaux (ERHARD-CASSEGRAIN et MARGAT 1983 ; ARBUÉS et al. 2003 ; KOHLI et al. 2012 ; RINAUDO 2013), cet article a pour objectif de proposer une délimitation et une caractérisation des différentes catégories d'analyse pour une clarification terminologique des termes associés aux usages de l'eau. Un second objectif est de mener cette réflexion en intégrant les points de vue de la géographie (au sens large), de l'hydrologie et de l'économie. Cet effort de clarification terminologique et conceptuelle est un préalable nécessaire pour

une recherche interdisciplinaire, souvent indispensable pour appréhender la complexité des enjeux liés à l'eau. Pour ce faire, nous avons choisi de partir d'un point de vue hydro-centré, orienté sciences naturelles et gestion, où l'objectif est d'obtenir une évaluation du stress hydrique dans laquelle les ressources en eau disponibles sont mises en regard des usages.

Dans la première partie de ce texte, une revue critique de la littérature consacrée aux usages de l'eau permet de mettre en évidence la profusion de significations associées à des termes similaires ainsi que les confusions qu'elles induisent. La deuxième partie propose un consensus pour la définition de ces termes dans le cadre de la GIRE, via une articulation autour du schéma de *cycle d'usage de l'eau*. Enfin, la troisième partie aborde certains cycles d'usage particuliers (approvisionnement en eau potable, irrigation et usages environnementaux) pour faire ressortir les nuances terminologiques qui leur sont associées.

2.2 Concepts et termes utilisés pour quantifier les usages de l'eau

L'objectif de cette première partie est de réaliser un état des lieux des pratiques terminologiques et de mettre en évidence les incohérences et les confusions existantes. Les différents termes associés aux usages de l'eau rencontrés dans la littérature ont été identifiés et classés selon le concept auquel les auteurs renvoient : le prélèvement (du milieu naturel), l'usage (eau employée par l'usager), la consommation (eau ne retournant pas au milieu prélevé), la distribution et le besoin (Tableau 2.1).

La lecture du tableau permet de mettre en évidence trois cas de figure : (i) plusieurs concepts renvoient à des termes différents ; c'est le cas pour besoin, prélèvement, consommation et plus particulièrement encore pour l'usage, qui est décrit par neuf termes distincts ; (ii) seul le concept de distribution est associé à un seul et même terme ; (iii) un même terme renvoie à des processus différents ; c'est le cas de la consommation.

Il en découle une première confusion : les termes de consommation, demande et usage sont utilisés comme synonymes pour désigner l'emploi d'eau par l'homme, alors qu'ils désignent des quantités d'eau différentes dans le cadre de la gestion intégrée de l'eau. La deuxième confusion vient de la différence d'interprétation du terme *consommation* : soit il réfère à l'utilisation de l'eau, soit il désigne la quantité d'eau non retournée au milieu naturel (ou non réutilisable). En revanche, les termes de besoin et de prélèvement ne semblent pas prêter à confusion puisqu'ils ne couvrent qu'une seule notion. On remarque également l'utilisation des qualificatifs *net* et *brut* pour préciser certains termes, lorsqu'un bilan de matière est effectué. Ces compléments rendent difficile l'interprétation des termes à la lecture de différents auteurs.

Sur la base de ces premiers constats, nous proposons un tour d'horizon plus détaillé des différents termes utilisés par les auteurs pour désigner le besoin en eau, la demande en eau, la quantité d'eau effectivement employée par l'usager et la consommation.

CONCEPTS	Termes utilisés dans la littérature	Auteurs
USAGE volume d'eau employé par l'usager	Consommation [consumption]	FALKENMARK et WIDSTRAND 1992 ; ZHOU et al. 2002 CORBELLA et PUJOL 2009 ; BARRAQUÉ et al. 2011 HOEKSTRA et al. 2011 ; VANHAM et al. 2011 ; FREIBURGHAUS 2012 KLUG et al. 2012 ; BEAL et al. 2013 ; BLANC et SCHÄDLER 2013 RINAUDO 2013 ; REYNARD et al. 2014 ; ARBUÉS et al. 2003
	Demande [demand]	FALKENMARK et WIDSTRAND 1992 ; ZHOU et al. 2002 BABEL et al. 2007 ; CORBELLA et PUJOL 2009 ; HOEKSTRA et al. 2011 VANHAM et al. 2011 ; WADA et al. 2011 ; KLUG et al. 2012 BEAL et al. 2013 ; RINAUDO 2013 ; REYNARD et al. 2014 GROUILLET et al. 2015 ; MILANO et al. 2015 ; ARBUÉS et al. 2003
	Demande brute	WADA et al. 2011
	Utilisation	ERHARD-CASSEGRAIN et MARGAT 1983 ; KOHLI et al. 2012
	Usage [use]	ERHARD-CASSEGRAIN et MARGAT 1983 ; BABEL et al. 2007 FALKENMARK et WIDSTRAND 1992 ; HOEKSTRA et al. 2011 CORBELLA et PUJOL 2009 ; VANHAM et al. 2011
	Application	BURT et al. 1997 ; HOWELL 2003
	Demande d'approvisionnement	ERHARD-CASSEGRAIN et MARGAT 1983
	Livraison [delivery]	TEMPLIN et al. 1999 ; FREIBURGHAUS 2012
BESOIN	Besoin [need]	DOORENBOS et PRUITT 1977 ; FALKENMARK et WIDSTRAND 1992 ERHARD-CASSEGRAIN et MARGAT 1983 ; BURT et al. 1997 HOWELL 2003 ; BONRIPOSI 2013 ; REYNARD et al. 2014 GROUILLET et al. 2015 ; MILANO et al. 2015
	Besoin [requirement]	TEMPLIN et al. 1999 ; ALLEN et al. 1998 ; HOEKSTRA et al. 2011 FUHRER et JASPER 2012 ; GROUILLET et al. 2015 ; MILANO et al. 2015
	Besoin théorique [theorical requirement]	TEMPLIN et al. 1999
	Usage effectif [beneficial use]	BURT et al. 1997 ; HOWELL 2003
PRÉLÈVEMENT eau prélevée du milieu	Prélèvement [withdrawal]	TEMPLIN et al. 1999 ; HOEKSTRA et al. 2011 ; WADA et al. 2011 KOHLI et al. 2012 ; GROUILLET et al. 2015
	Prélèvement brut	BUCHS 2016
	Demande de prélèvement	ERHARD-CASSEGRAIN et MARGAT 1983
	Captage	FREIBURGHAUS 2012
	Eau dérivée [diverted water]	HOWELL 2003
DISTRIBUTION eau distribuée via un réseau	Distribution [supply]	ERHARD-CASSEGRAIN et MARGAT 1983 ; TEMPLIN et al. 1999 ZHOU et al. 2002 ; BARRAQUÉ et al. 2011 ; FREIBURGHAUS 2012 KLUG et al. 2012
CONSOMMATION eau ne retournant pas au milieu prélevé	Consommation [consumption]	BURT et al. 1997 ; BUCHS 2016 ; CALIANNO et al. 2014 GIVONE 2000 ; TEMPLIN et al. 1999 ; KOHLI et al. 2012
	Usage consommateur [consumptive use]	BURT et al. 1997 ; TEMPLIN et al. 1999 KOHLI et al. 2012
	Prélèvement net	BUCHS 2016
	Demande nette	WADA et al. 2011

TABLEAU 2.1 – Echantillon de termes utilisés dans la littérature scientifique pour désigner les notions d'usage, besoin, prélèvement distribution et consommation en eau.

2.2.1 Le besoin en eau

En économie, le besoin en eau est défini comme la quantité d'eau qu'un usager demanderait en dehors de toute contrainte physique ou économique pour maximiser son utilité ou sa santé (ZOUNGRANA 2003)[2]. Ainsi, le besoin en eau fait référence à un désir, un idéal souvent matérialisé par des normes (FALKENMARK et WIDSTRAND 1992 ; GLEICK 1996 ; HOWARD et BARTRAM 2003). La conception des systèmes d'approvisionnement en eau potable s'appuie notamment sur cette perception d'idéal « standardisé », en définissant le besoin comme une quantité d'eau qui devrait être allouée par habitant et fixée par les pouvoirs publics ou le planificateur. Dans le même ordre d'idée, BARBIER et MONTGINOUL (2013) citent la norme française INSEE de 120 m^3 pour un foyer de 2 adultes et 2 enfants, fixée comme « consommation annuelle de référence ».

Dans le cas de l'usage de l'eau pour l'irrigation, le besoin en eau peut se référer au besoin en eau *total* des plantes pour une croissance optimale : humidité du sol, précipitations et apport supplémentaire en eau par les pratiques d'irrigation (BURT et al. 1997 ; HOWELL 2003 ; WADA et al. 2011 ; BONRIPOSI 2013) ou au besoin net qui ne concerne que l'eau apportée par l'irrigation. À ce titre, les modèles agronomiques distinguent les besoins en eau d'irrigation et l'évapotranspiration de la plante (HOWELL 2003 ; GROUILLET et al. 2015). Cette dernière est une approximation couramment utilisée pour estimer le besoin en eau total des plantes (ALLEN et al. 1998). Ces exemples montrent que le besoin est une notion contingente, relative et d'ordre abstrait, qui ne peut être associée à une quantité d'eau tangible et mesurable : pour l'eau potable, le besoin est matérialisé par des normes alors que pour l'irrigation, il est matérialisé par des modèles empiriques.

2.2.2 La demande en eau

D'un point de vue économique, la demande associe une quantité (volume) à un prix (MONTGINOUL 1998). Dans une acception plus générique, la demande peut être définie comme le volume d'eau requis par les usagers pour satisfaire leurs besoins (WADA et al. 2011), ou en d'autres termes, la matérialisation des besoins en eau exprimés par les usagers (ERHARD-CASSEGRAIN et MARGAT 1983). Elle est représentée par une fonction statistique dépendant de diverses contraintes notamment physiques, économiques ou sociales. Ce n'est donc pas un volume tangible, qui est mesurable au niveau de l'usager, mais une estimation de la requête en eau de l'usager, qui est confrontée à l'offre en eau, elle-même soumise à des contraintes : quantité, qualité, prix et modalités techniques pour que l'offre soit réellement disponible.

En hydrologie, la demande en eau est une valeur que l'on cherche à déterminer pour permettre une estimation des volumes d'eau effectivement utilisés dans le bassin versant afin d'évaluer le stress hydrique sur un territoire donné (FUHRER et JASPER 2012 ; MILANO et al. 2012 ; COLLET et al. 2015).

[2]La notion de besoin est contingente et relative. Comme en témoigne la définition canonique de l'économie proposée par ROBBINS (1935), la notion de besoin est au cœur de l'approche standard en économie qui postule des ressources limitées pour la satisfaction de besoins illimités, d'où la nécessité de comportements stratégiques pour l'allocation des ressources.

2.2.3 La quantité d'eau effectivement employée par l'usager

Comme le montre le Tableau 2.1, l'usage est la notion qui suscite le plus d'interprétations distinctes. Dans le dictionnaire de la commission de terminologie du Comité national français des sciences hydrologiques, MARGAT et COTTEZ (1995) distinguent deux notions relatives à l'emploi d'eau : premièrement, l'*usage* de l'eau en tant que concept technique, c'est-à-dire l'action d'appliquer des fonctions de l'eau pour obtenir un effet voulu : « ce qu'on en fait, comment on la modifie » ; deuxièmement, l'*utilisation* de l'eau en tant que concept économique, c'est-à-dire l'objectif visé par l'usage : « pour quoi est-elle utile ». La Directive-cadre européenne sur l'eau (Directive 2000/60/CE modifiée par la Directive 2008/32/CE) définit quant à elle l'utilisation de l'eau comme « les services liés à l'utilisation de l'eau ainsi que toute autre activité (...) susceptible d'influer de manière sensible sur l'état des eaux ».

2.2.4 La consommation

En économie, la réalisation de la demande à un moment donné est classiquement considérée comme étant une *consommation* (l'eau est effectivement utilisée). Pour tous les biens et services, l'acte de consommation se décline de deux manières : d'une part, la consommation finale (la consommation vise directement la satisfaction d'un besoin) ; d'autre part, la consommation intermédiaire (le bien ou le service vise la production d'un autre bien ou service) (BEITONE et al. 1995). Pour l'eau, cette déclinaison peut être spécifiée de la manière suivante : lorsque l'eau est utilisée en tant que telle on parle de consommation finale (c'est le cas par exemple de l'eau de boisson) ; lorsque l'eau est utilisée de manière à être un facteur de production d'un autre bien, on parle de consommation intermédiaire (c'est le cas lorsque l'eau fait partie des intrants d'un processus industriel ou agricole). Dans les deux cas, il y a altération et/ou disparition (ne serait-ce que temporairement et/ou géographiquement) du bien « eau ».

Dans le cas de l'eau potable, l'Office fédéral suisse de la statistique (OFS 2016) définit la consommation comme « la quantité d'eau fournie par les services communaux des eaux aux ménages, à l'industrie et à l'artisanat. Sont aussi prises en compte les fontaines publiques et les pertes dues à des fuites ». Dans leur étude sur l'eau domestique, BARBIER et MONTGINOUL (2013) utilisent également ce terme pour désigner la quantité d'eau utilisée : « selon les dernières données du Commissariat général au développement durable, un Français consommait en moyenne 151 litres d'eau par jour en 2008 (...) ». Dès lors, il apparaît que les quantités d'eau potable employées par les usagers sont fréquemment associées au terme de *consommation*. C'est le cas à la fois dans les médias, pour les gestionnaires (FREIBURGHAUS 2012), sur les factures d'eau des opérateurs et dans la littérature scientifique (FALKENMARK et WIDSTRAND 1992 ; CORBELLA et PUJOL 2009 ; BARRAQUÉ et al. 2011 ; BLANC et SCHÄDLER 2013 ; MONTGINOUL 2013 ; REYNARD et al. 2014).

En hydrologie, le terme de consommation renvoie lui aussi à la notion de disparition, d'altération ; par contre il ne renvoie pas au bien produit, mais à la quantité d'eau elle-même, en tant qu'élément rendu indisponible pour le cycle de l'eau dit naturel. C'est donc le milieu naturel qui sert de système de référence : si l'eau sort du système et n'est plus disponible pour le cycle de l'eau, il y a *consommation*, c'est-à-dire perte nette pour le système. L'emploi effectif d'eau par l'usager sera donc généralement décrit en hydrologie par le terme d'*usage* ou de *demande* en eau, ce qui porte à confusion par rapport à la terminologie en

économie. Afin de décrire d'une autre manière la demande en eau potable en fonction de sa restitution au milieu naturel, certains auteurs raisonnent en termes de caractère *net* ou *brut*. Par exemple, WADA et al. (2011) et BUCHS (2016) parlent de *demande brute* pour décrire l'entièreté de l'eau requise par les usagers (= la consommation des économistes) et de *demande nette* pour désigner la part de la demande brute qui est non restituée au milieu (= la consommation des hydrologues). Selon KOHLI et al. (2012), une consommation entraîne une diminution importante de la qualité ou de la quantité de l'eau restituée. La consommation renvoie dans ce cas à une sortie quantitative du système et/ou une altération qualitative. Une contamination diminue les fonctions potentielles de l'eau qui, même en étant restituée dans le même système, ne peut plus satisfaire certains autres usagers.

La variabilité terminologique dépend également du type d'usage. Les usages liés à l'eau potable se retrouvent aussi sous plusieurs termes différents : le *besoin en eau urbain* (MILANO et al. 2015), la *demande en eau urbaine* (GROUILLET et al. 2015) ou encore la *livraison d'eau publique* [*public water delivery*] (TEMPLIN et al. 1999). Dans le cas de l'irrigation, la plante n'est pas un usager à proprement parler ; l'expression de la demande est formulée par l'irrigant selon les conditions climatiques et les stratégies socio-économiques (par exemple l'application d'un stress hydrique pour favoriser la formation de sucres ou bien encore dépendant du prix de l'eau) qui lui sont propres. WADA et al. (2011) parlent ainsi de *demande en eau nette* et HOWELL (2003) d'*application* d'eau à la plante pour désigner la quantité d'eau apportée aux cultures tandis qu'ALLEN et al. (1998), TEMPLIN et al. (1999) et FUHRER et JASPER (2012) utilisent la dénomination de *besoin d'irrigation* [*irrigation requirement*] pour désigner la part d'eau qui devrait être demandée par l'irrigant s'il souhaite une croissance optimale de ses cultures. ERHARD-CASSEGRAIN et MARGAT (1983) parlent dans ce cas de *demandes agricoles*.

Cette analyse terminologique a montré que la multitude de termes rencontrés pour désigner l'emploi d'eau (besoin, demande, usage) et les différences d'interprétation du terme *consommation* amènent de la confusion et nécessitent une clarification des catégories liées à l'usage de l'eau.

2.3 Clarification et articulation des notions via le cycle d'usage de l'eau

Dans cette partie, nous proposons des définitions concises et applicables aux différents usages. Les termes portant à confusion sont repris et classés autour de schémas conceptuels ordonnant les notions suivant une logique systémique et dynamique : le cycle d'usage de l'eau. Nous redéfinissons d'abord la notion d'usage, puis nous décrivons un cas simple (le cycle d'usage *ex-situ*), avant de présenter trois cas d'usages particuliers : l'approvisionnement en eau potable (AEP), l'irrigation et les usages environnementaux.

2.3.1 La notion d'usage de l'eau

Comme indiqué précédemment, ERHARD-CASSEGRAIN et MARGAT (1983) différencient l'usage de l'eau comme l'acte de mise en application des fonctions de l'eau pour obtenir un effet voulu (remplir un objectif, satisfaire des besoins) et l'utilisation de l'eau, qui se définit par rapport aux objectifs visés. Par exemple, l'acte d'abreuvement (usage) permet de remplir un objectif pour l'alimentation humaine et donc une utilité domestique (utilisation).

L'usage n'est ainsi pas vu comme une quantité d'eau, mais selon la nature de l'action de l'on souhaite accomplir, ce qui permet de le classer en catégories. Dans cet article, nous adoptons une vision simplifiée, sans faire de distinction entre usage et utilisation. Nous parlons de l'usage comme une catégorie d'emploi d'eau, classée selon l'objectif voulu. L'irrigation, l'abreuvement d'élevages, l'usage domestique, municipal et commercial, la production industrielle, de neige artificielle ou d'hydroélectricité sont ainsi des usages de l'eau. Des usages associés à des fonctions particulières de l'eau peuvent également être considérés, tels que la fonction de support pour la navigation, l'extraction de graviers ou les loisirs aquatiques, de milieu vital pour les espèces (usage « environnemental »), de transformation géomorphologique des paysages ou encore de support à un paysage (REYNARD 2000a, 2001 ; BONRIPOSI 2013 ; MUSY et al. 2014). Nous retrouvons donc la distinction proposée par PUECH et BOISSON (1995) entre « eau ressource » (ressource d'allocation pour la satisfaction de besoins) et « eau milieu » (milieu de vie, fournissant des services, également pour les êtres humains), distinction qui renvoie plus fondamentalement à une évolution de l'articulation société/eau en faveur d'une approche où l'hydrosystème n'est plus considéré comme déconnecté de la sphère sociale des usages (GHIOTTI 2007).

En outre, nous distinguons les usages *ex-situ* [*off-stream*], qui détournent l'eau du milieu naturel et dans lesquels les actions de prélèvement et de restitution sont séparées dans l'espace et dans le temps, des usages *in-situ* [*in-stream*], qui ne détournent pas l'eau du milieu naturel, mais utilisent sur place certaines fonctions de l'eau (REYNARD 2000a ; KOHLI et al. 2012).

2.3.2 Le concept de cycle d'usage

Pour représenter le cycle d'usage de l'eau ex-situ, les transferts d'eau associés à un usage sont représentés à l'aide de diagrammes de flux, depuis le prélèvement jusqu'à la restitution, suivant le modèle d'ERHARD-CASSEGRAIN et MARGAT (1983). Ces schémas de flux représentent ce que nous appelons le « cycle technique » de l'usage de l'eau, schématisant par des flèches les infrastructures où transitent les volumes d'eau (Fig. 2.1). Deux entités sont également distinguées : le système de ressources, c'est-à-dire les réserves d'eau disponible d'un point de vue technique et économique dans le milieu naturel (qui est une part du cycle de l'eau) et le système d'usages, parfois appelé petit cycle de l'eau (ONEMA 2017), qui prélève dans le système de ressource pour acheminer l'eau jusqu'à l'usager et au-delà.

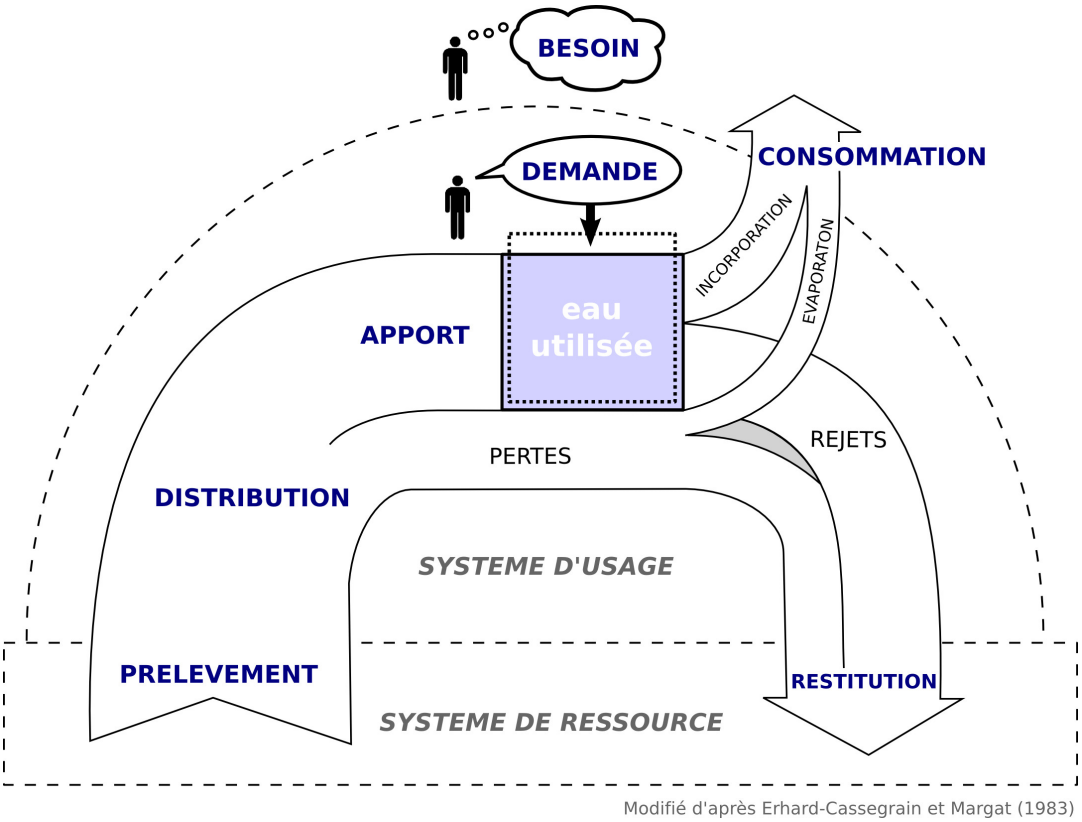


FIGURE 2.1 – Étapes du cycle d'usage de l'eau (cas général d'un usage ex-situ).

Nous ajoutons, dans ces diagrammes, les relations de cause à effet exercées par les besoins et les demandes en eau sur le cycle technique, ces termes étant considérés comme externes à ce cycle. Nous distinguons ainsi les notions « tangibles » et « mesurables » associées au système d'infrastructure (prélèvements, réalisation de la demande, consommations, restitutions) aux notions « abstraites » associées à l'élément déclencheur de l'usage de l'eau (besoin et demande). La demande en eau est néanmoins la notion centrale du raisonnement, le moteur du cycle d'usage. En concrétisant le besoin, elle actionne le cycle technique, sans pour autant être une quantité d'eau que l'on peut mesurer à divers endroits de son infrastructure (au captage, dans les réservoirs [variations de hauteur d'eau], dans les canalisations, etc.).

Cette méthode permet de décrire et recadrer la terminologie des usages de l'eau suivant une représentation systémique (via des entités organisées suivant des liens d'interaction) et dynamique (les quantités d'eau évoluant dans le temps et dans l'espace au cours du cycle). Les termes utilisés pour chaque étape du cycle d'usage de l'eau sont ainsi spécifiques à ces étapes et aux quantités correspondantes. L'objectif de cette représentation sous forme de cycle est aussi de séparer les notions théoriques des notions matérielles et mesurables. La définition de systèmes permet en outre d'éviter des termes composés de qualificatifs « net » ou « brut », portant à confusion.

2.3.3 Les notions d'ordre immatériel, hors du système technique d'infrastructure

Nous retenons la définition d'ERHARD-CASSEGRAIN et MARGAT (1983), qui désignent les besoins comme les volumes d'eau théoriquement nécessaires aux différents usages correspondant à l'entretien des activités humaines ainsi qu'au fonctionnement des processus naturels. Ils renvoient donc à la nécessité de remplir l'objectif prévu par l'usage de l'eau et sont contingents au contexte propre à l'usager : enjeux économiques, environnementaux, politiques, réglementaires, culturels. Le besoin est ainsi une notion relative, contingente, abstraite, indéfinie et donc difficile à quantifier de manière objective. Au mieux les notions de demande et de besoin peuvent-elles être approchées par des enquêtes auprès des usagers, par des analyses qualitatives multicritères ou via la méthode de « préférence révélée » visant à apprécier la valeur économique accordée à tel ou tel service lié à l'eau et à l'environnement en général (AMIGUES 2012).

La demande est l'expression du besoin par les usagers. En d'autres termes, elle est la requête d'une quantité d'eau souhaitée pour réaliser l'usage. La demande est une notion plus concrète que le besoin, car elle se traduit par une action réelle de l'usager (sa requête) produisant un effet direct sur le cycle d'usage de l'eau. On peut la voir comme un « stimulus » sur l'infrastructure technique : c'est le moteur central du cycle d'usage de l'eau. Néanmoins, la demande ne correspond pas toujours à un volume d'eau concret et mesurable, car il arrive que celle-ci ne soit pas satisfaite. Cette situation se produit lorsque l'offre n'est pas suffisante ou en raison de contraintes techniques : l'usager ne reçoit pas la quantité d'eau souhaitée (pénurie d'eau ou intermittence de service par exemple). Ceci marque la différence entre la demande (le souhait, non mesurable physiquement) et l'apport, c'est-à-dire l'eau livrée en entrée de l'usage qui sera effectivement utilisée, en partie ou en totalité, pour mettre en œuvre l'usage et donc mesurable au niveau du compteur d'eau. Par exemple, dans le cas de l'eau potable, la demande est estimée par une moyenne des apports en période de ressources en eau suffisantes. On peut comparer la demande liée à l'action d'ouvrir le robinet. C'est un stimulus de la part de l'usager, mais qui ne se traduit pas nécessairement par une quantité d'eau coulant du robinet.

Nous considérons que la demande est un terme spécifiquement anthropique, c'est-à-dire qu'elle est formulée par l'homme, en tant qu'usager. Dans le cas d'usages de l'eau non anthropiques (par exemple les usages environnementaux), même si les plantes et les animaux ont un certain besoin en eau, ils ne formulent pas de demande. C'est un représentant humain qui, dans certains cas, la formulera à leur place, basée sur une évaluation de leurs besoins. Les actions des associations de pêcheurs ou des ONG environnementales pour garantir des débits résiduels minimaux dans les rivières sont une façon de formuler cette demande que les organismes vivants ne peuvent formuler eux-mêmes. Pour les besoins en eau des plantes en agriculture, la demande en eau d'irrigation est formulée par l'irrigant.

2.3.4 La partie technique du cycle (mesurable)

La première étape mesurable d'un cycle d'usage ex-situ de l'eau est le prélèvement. Ce sont les quantités d'eau extraites de l'environnement naturel dans le but de les utiliser. Les prélèvements sont définis en référence à un système de ressources particulier (tête de bassin versant, bassin versant régional, aquifère souterrain, lac, etc. (MUSY et al. 2014). Cette notion

renvoie à celle de détournement plus ou moins étendu dans le temps et dans l'espace. En effet, la restitution dans le même système de ressource doit avoir lieu, sinon il y a *consommation* (BUCHS 2016). La restitution d'eau dans un type de milieu différent de celui où elle a été prélevée (eau souterraine, rivière) peut aussi être considérée comme une consommation. Par exemple, lors de transferts interbassins, il y a, du point de vue du bassin émetteur, une sortie nette qui pourrait s'apparenter à une consommation. Nous préférons cependant distinguer le transfert de la consommation et circonscrire ce dernier terme à l'effet d'un usage sur un hydrosystème dans son ensemble.

Lorsqu'il y a un agent intermédiaire entre l'usager et le système de ressources, la distribution représente la quantité d'eau injectée dans un réseau d'eau *ex-situ* et envoyée à destination des usagers finaux. Elle constitue le transfert d'eau depuis le prélèvement jusqu'au lieu d'utilisation de l'eau. La distribution représente toujours un volume moins important que les prélèvements, car des pertes se produisent au cours du transport de l'eau dans les réseaux, durant les traitements éventuels (potabilisation) ou les stockages (fuites de réservoirs, évaporation) et parce qu'une certaine quantité d'eau est également nécessaire à l'entretien des infrastructures (nettoyages, purges).

L'apport en eau est la matérialisation de la demande en un volume d'eau ; c'est la réponse au stimulus exercé par la demande. Autrement dit, ce sont les quantités d'eau arrivant à destination de l'usager et effectivement utilisées par celui-ci. L'apport représente donc un volume directement observable et quantifiable. Dans le cas d'usages *ex-situ*, l'apport peut être mesuré de manière directe en entrée de l'usage, par exemple via le compteur d'eau. Il correspond aux prélèvements, soustraits des pertes se produisant jusqu'à l'arrivée au niveau de l'usager. En période de ressource en eau suffisante, les apports mesurés constituent les données utilisées pour évaluer la demande en eau, car on estime que la demande en eau exprimée a pu être satisfaite. Les apports sont dans ce cas considérés égaux à la demande.

Dans la suite du cycle d'usage s'opère la consommation, qui est le déficit quantitatif entre les entrées et les sorties d'un système de ressources précis pour une période donnée. C'est la quantité d'eau qui n'est pas restituée au milieu naturel dans lequel a eu lieu le prélèvement et qui disparaît donc de ce dernier (CALIANNO et al. 2014). Puisque notre objectif est la quantification volumique, nous ne considérons pas ici les dégradations de la qualité de l'eau comme une consommation. Par exemple, la consommation domestique en eau potable sera la différence entre le volume d'eau arrivant par les robinets des ménages (l'apport) et les rejets d'eau usée. Dans ce cas, la consommation sera essentiellement l'eau évaporée et une partie de l'eau bue ou incorporée dans les aliments cuisinés sur place. Enfin, la restitution est la quantité d'eau retournant au milieu naturel, soit avant l'usage (pertes de distribution et de stockage), soit après l'usage (rejets).

Chaque notion du cycle d'usage *ex-situ* représente ainsi une quantité différente d'eau suivant la position dans le cycle (au fur et à mesure des pertes), se déroule à des instants différents (temps de parcours et de stockage dans l'infrastructure technique) et dans des lieux précis (des prélèvements jusqu'aux rejets). Une synthèse des termes redéfinis dans cette section est présentée dans le Tableau 2.2.

Termes retenus dans cet article	**Définition**
USAGE	Catégorie d'utilisation de l'eau ; objectifs visés lors de l'emploi de l'eau par l'usager : - usage domestique - irrigation - production d'énergie - support de loisir - milieu vital - ... Usage *ex-situ* : si l'eau est détournée du milieu naturel. Usage *in-situ* : si l'usage a lieu sur place, grâce aux services liés à l'eau.
BESOIN	Volume d'eau théorique et contingent considéré comme nécessaire pour la satisfaction d'un usage, indépendamment de toute contrainte physique, technique ou économique (en économie standard, volume considéré comme nécessaire pour « maximiser l'utilité » d'un usager).
DEMANDE	Expression du besoin en eau matérialisée par la requête d'un volume d'eau souhaité par l'usager. - En économie standard, cette requête est représentée par la fonction de demande qui associe une quantité (volume) à un prix. - En hydrologie et pour les approches en économie appliquée, la demande ne représente pas un volume d'eau matériel, mais constitue le stimulus qui actionne le cycle d'usage (petit cycle de l'eau).
PRELEVEMENT	Volume d'eau extrait du milieu naturel dans le but d'être utilisé.
DISTRIBUTION	Volume d'eau distribué aux usagers via un réseau.
APPORT	Volume d'eau concrètement utilisé par l'usager, acheminé jusqu'à lui dans le cas d'un usage ex-situ.
CONSOMMATION	Volume d'eau ne retournant pas au milieu de prélèvement (au moins temporairement) et/ou de manière altérée.
RESTITUTION	Volume d'eau retournant au milieu prélevé.

TABLEAU 2.2 – Définition des termes retenus dans cet article pour décrire le cycle d'usage de l'eau, dans l'ordre suivant : usage (terme le plus générique), besoin et demande (notions immatérielles), prélèvement, distribution, apport, consommation et restitution (étapes du cycle technique).

2.4 Précision des termes du cycle suivant les particularités de chaque usage

Après avoir structuré la terminologie du cycle d'usage de l'eau autour du cas général d'un usage *ex-situ*, nous déclinons maintenant ces définitions en rajoutant les particularités et les termes propres à trois cas spécifiques d'usages de l'eau : les usages liés à l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation et l'usage *environnemental*. De plus, chaque schéma de l'infrastructure technique de ces usages précise les notions qui sont techniquement mesurables.

2.4.1 Les cycles des usages de l'eau potable et d'irrigation

L'approvisionnement en eau potable (AEP) n'est pas un usage en soi, mais plutôt un ensemble d'infrastructures et de pratiques visant à garantir la distribution d'eau potable vers ses divers lieux d'usage. Un organisme distributeur (collectivité publique, régie des eaux, distributeur privé) livre l'eau demandée par ses clients et ces derniers mettent en application les fonctions de l'eau (ménages, industries, services publics, commerces), c'est-à-dire, en font l'usage (Fig. 2.2). C'est pourquoi nous parlons du cycle *des* usages de l'AEP, au pluriel.

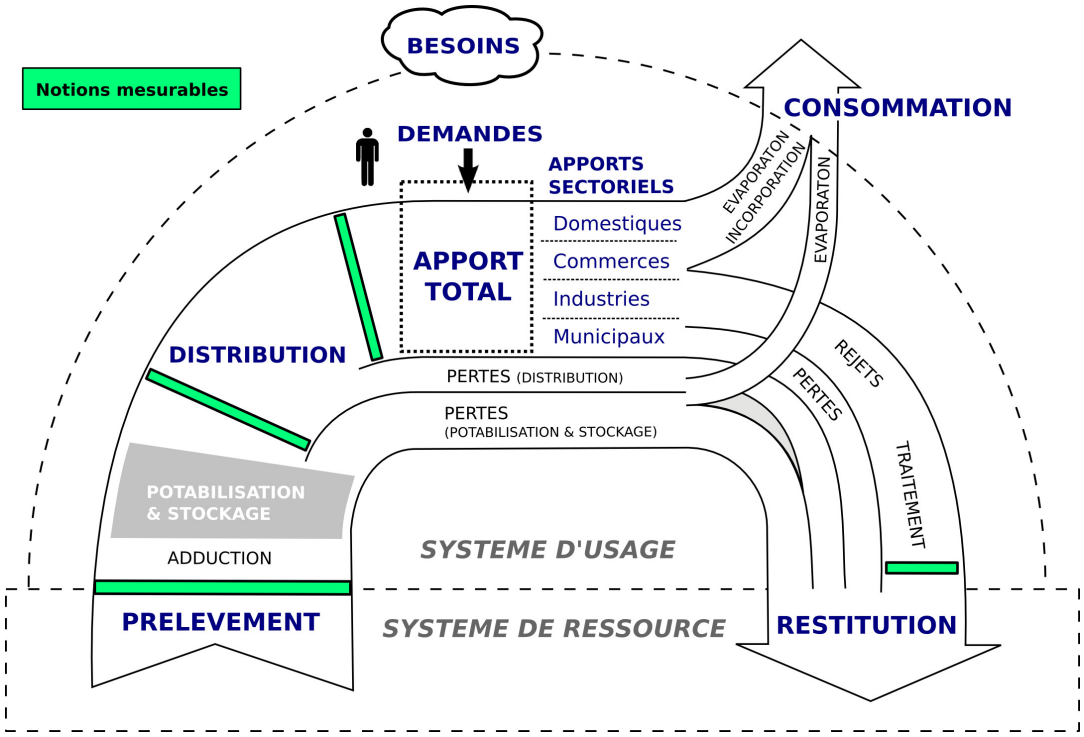


FIGURE 2.2 – Étapes du cycle d'usage de l'eau (cas de l'approvisionnement en eau potable).

Le cycle d'usage de l'eau d'irrigation (Fig. 2.3) est similaire à celui de l'AEP dans ces premières étapes (du prélèvement à l'apport), dans la mesure où il est fréquemment conçu en réseau. Par contre, il n'y a qu'un type d'usager : l'irrigant.

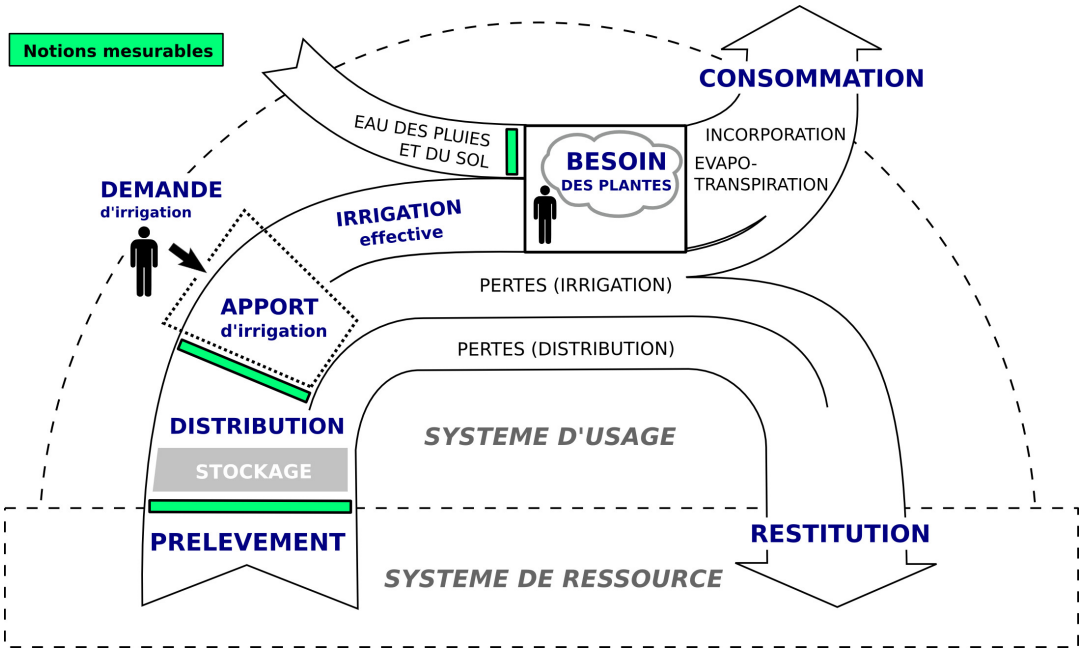


FIGURE 2.3 – Étapes du cycle d'usage de l'eau pour l'irrigation.

D'un point de vue du cycle « technique » de l'AEP et de l'irrigation, la première étape est l'adduction, qui est le transport de l'eau entre le lieu de prélèvement et le lieu de stockage (et, si nécessaire, de potabilisation) avant distribution aux usagers. Suite aux pertes se produisant durant les transferts et traitements, la quantité d'eau au niveau de l'adduction sera inférieure aux prélèvements et supérieure à la distribution.

La distribution est la quantité d'eau (potable ou d'irrigation) sortant des réservoirs de l'organisme distributeur à destination des usagers. Les indicateurs de performance permettent de rendre compte de la qualité d'un réseau donné. Ainsi en France, l'ONEMA estime qu'en moyenne un quart de l'eau potable distribuée est perdue (RENAUD et al. 2014).

Pour le cas de l'AEP, la demande représente l'expression du besoin des clients-usagers de l'organisme distributeur, c'est-à-dire la somme des requêtes d'eau de l'ensemble des usagers reliés au réseau d'eau potable ou exprimée aux opérateurs non-conventionnels (citernes par exemple). Les apports désignent quant à eux les volumes d'eau effectivement livrés aux usagers et mis en œuvre pour atteindre les objectifs de l'usage. Dans le cas d'un réseau, ce sont les compteurs d'eau (collectifs ou individuels) placés au niveau du branchement qui vont mesurer cette quantité. Lorsqu'il n'y a pas de compteurs, il est difficile de quantifier l'eau apportée à l'usager. Elle peut être estimée via les mesures de prélèvement ou de distribution, auxquelles est soustraite une estimation des pertes du réseau.

D'après ces étapes et suivant l'usager auquel est destinée l'eau potable, quatre types de quantités peuvent alors être différenciées :

- la distribution totale est le volume d'eau potable injecté dans le réseau à destination de l'ensemble des usagers ;
- la distribution sectorielle est la part de la distribution totale destinée à une catégorie particulière d'usage (clients privés, industries, services publics, etc.) ;

- l'apport total représente la quantité d'eau effectivement livrée et utilisée par l'ensemble des usagers (elle correspond à la distribution totale moins les fuites et les pertes) ;
- l'apport sectoriel est la quantité d'eau effectivement livrée et utilisée par un groupe particulier d'usagers.

En agriculture, les plantes utilisent pour leur développement l'eau des précipitations dont une fraction a atteint le sol par ruissellement et percolation vers les nappes souterraines (eau bleue) et l'autre fraction a contribué à l'humidité du sol (eau verte) favorisant l'évaporation ou la transpiration des plantes (FALKENMARK 1995, 2003 ; HOEKSTRA et al. 2011). Le besoin en eau des plantes est la quantité d'eau théorique jugée nécessaire à la croissance des plantes. Dans le cas d'une agriculture irriguée, le besoin des plantes représente les quantités d'eau estimées utiles à la croissance des cultures pour obtenir un rendement optimal (le calcul est fait sans contrainte de disponibilité des ressources). Dans notre cas de cycle d'usage de l'eau pour l'irrigation, le besoin en eau des plantes est jugé équivalent à la hauteur d'eau nécessaire pour compenser les pertes d'eau par évapotranspiration d'une culture dans des conditions hydrométéorologiques (ensoleillement, vent, hygrométrie) et pédologiques idéales (DOORENBOS et PRUITT 1977). Le minimum correspond à la nécessité de survie des plantes ; le maximum correspond à un optimum lié à des objectifs de rendement de production (ERHARD-CASSEGRAIN et MARGAT 1983). On retrouve donc cette notion abstraite d'idéalité, de nécessité, dans la définition du besoin. C'est en quelque sorte le besoin de productivité de l'homme transposé à la plante, qui sans les besoins de rendement de l'irrigant n'aurait pas vocation à croître de manière « optimale ».

Considérant que la plante ne peut pas exprimer ses besoins et que l'on ne peut donc pas lui attribuer de demande, le cycle d'usage pour l'eau d'irrigation que nous décrivons est centré sur l'irrigant. Lorsqu'il y a irrigation, l'usager irrigant effectue cette demande d'irrigation, avec comme but de satisfaire les besoins en eau de la plante, qu'il estimera en fonction du rendement recherché. Il peut également prendre en compte d'autres conséquences de l'irrigation, telles que la gestion de la salinité des sols (HOWELL 2003), la lutte contre le gel, la germination, le refroidissement des cultures (BURT et al. 1997), ou encore les usages divers d'entretien de l'unité de production (CALIANNO et al. 2014)[3]. De plus, il faut inclure dans la demande toutes les pertes se produisant durant le procédé d'irrigation lui-même (arrosage hors de la parcelle visée à cause du vent, ruissellement hors champ, évaporation, fuites de conduites). Voilà pourquoi nous ne parlons pas de demande en eau des plantes, mais de demande d'irrigation.

L'apport d'irrigation est la quantité d'eau effectivement allouée à l'irrigant et utilisée par ce dernier pour l'irrigation, mesurable en entrée de l'usage.

L'irrigation effective est la part de l'apport en eau d'irrigation qui profite à la plante. Cette quantité est soit directement utilisée par la plante, soit stockée dans la réserve utile du sol et utilisée plus tard. Dans le cas d'une agriculture irriguée, le besoin en eau des plantes

[3]Par exemple, les quantités d'eau mobilisées pour le nettoyage des sols dans les serres d'Almeria (pourtant très efficientes d'un point de vue agronomique lors de la campagne agricole) ne sont pas négligeables et contribuent fortement à la révision à la hausse des valeurs moyennes couramment présentées comme les « besoins » ou « demande » en eau des plantes (BUCHS 2016) alors qu'il s'agit d'une demande d'irrigation.

est estimé comme étant cette part d'eau d'irrigation, ajoutée à l'eau verte et l'eau de pluie déjà disponible et utilisable. Les pertes se produisant sur la parcelle irriguée sont liées à l'efficacité de la méthode employée (par submersion, ruissellement, aspersion, goutte à goutte) et forment l'écart entre l'apport d'irrigation et l'irrigation effective (ICID 2002). En référence à cette efficacité durant l'irrigation, la notion d'efficience du système d'irrigation est souvent employée (BURT et al. 1997 ; HOWELL 2003 ; FUHRER et JASPER 2012).

Une fois l'eau d'irrigation appliquée aux cultures, le cycle d'usage continue avec les diverses consommations constituées des pertes par évaporation ou par incorporation par la plante, ne retournant pas au système choisi comme référence. Une autre manière de définir la consommation est de considérer qu'elle se produit lorsque l'eau, une fois restituée au milieu naturel, n'est pas réutilisable par l'usager irrigant ou la plante (BURT et al. 1997). Cette situation se produit lorsqu'il y a détérioration des propriétés de l'eau nécessaires à l'usage ; on parle alors de consommation qualitative (ERHARD-CASSEGRAIN et MARGAT 1983).

2.4.2 Le cycle des usages environnementaux de l'eau

La grande majorité des usages environnementaux de l'eau se déroulent *in-situ*, dans les eaux de surface (lacs, rivières) ou souterraines. Ils se retrouvent donc en concurrence avec d'autres usages anthropiques in-situ, comme la pêche, la navigation, la baignade, les sports nautiques, le thermalisme et la production hydroélectrique au fil de l'eau, et les usages ex-situ, qui dérivent les eaux du milieu naturel. Dans les lignes qui suivent, nous nous penchons spécifiquement sur les usages environnementaux (faune et végétation) et les besoins qui leur sont associés. Notre approche est anthropocentrée, puisque nous considérons les usages environnementaux comme une catégorie d'usage de l'eau, au même titre que les usages des humains.

L'usage environnemental se traduit par un cycle faisant apparaître une quantité d'eau minimale qu'il convient de maintenir dans le système concerné (débits d'une rivière, hauteur d'eau d'un lac), suite aux prélèvements effectués par les usages ex-situ, afin de conserver la qualité de la biodiversité aquatique. Ces valeurs correspondent dans notre terminologie à un besoin en eau.

Les écosystèmes, la faune et la flore ne peuvent toutefois pas formuler directement une demande : ici encore, elle est évaluée de manière indirecte par l'homme sous la forme de débits minimaux ou de valeurs qualitatives particulières. Ces quantités d'eau minimales peuvent par ailleurs être inscrites dans la loi, ce qui leur donne un caractère normatif. Dans ce contexte, différentes visions de conservation de l'environnement s'affrontent et la fixation de débits résiduels convenables doit fréquemment tenir compte d'intérêts opposés : d'une part, les intérêts de l'économie et de l'approvisionnement en énergie, d'autre part les intérêts de la protection de l'environnement (OFEFP 2000 ; FERNANDEZ et TROTTIER 2012).

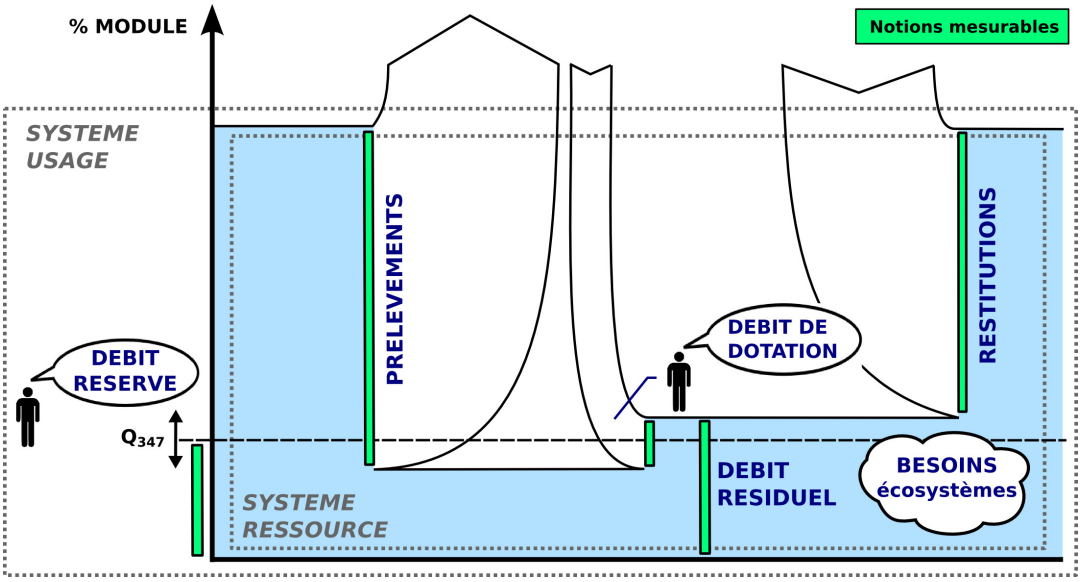


FIGURE 2.4 – Étapes du cycle d'usage environnemental de l'eau.

Différentes quantités peuvent être distinguées (Fig. 2.4). Les besoins des écosystèmes (usage environnemental) sont exprimés sous la forme de demandes par des « représentants » (scientifiques, pêcheurs, organisations environnementales, législateurs, etc.) sous la forme de débits minimaux à respecter :

- Le débit résiduel est le débit d'un cours d'eau qui subsiste après un ou plusieurs prélèvements. C'est une notion quantifiable et mesurable. Ce débit, qui peut être nul dans certains cas, représente la quantité d'eau restante, disponible pour les usages *in-situ*.
- Le débit résiduel convenable est le débit nécessaire à la protection de la diversité des écosystèmes aquatiques qui dépendent des cours d'eau, à la conservation des populations de poissons indigènes et à leur reproduction, et à la préservation de la diversité des paysages (OFEFP 2000). Les termes « convenable » et « nécessaire » font référence à un jugement de valeur que porte la société en évaluant les besoins environnementaux. Il est représenté par le nuage « besoins écosystèmes » sur la Figure 2.4.
- Le débit résiduel minimal (terme utilisé en Suisse) ou débit réservé (terme utilisé en France et au Québec) fait référence au débit minimum requis pour maintenir, à un niveau jugé acceptable, un ou plusieurs usages de l'eau in-situ (FAUNE ET PARCS QUÉBEC 1999). C'est donc une demande de débit minimal à respecter, formulée par les pouvoirs publics et les gestionnaires et fixée sur la base d'une norme statistique. En Suisse, la valeur seuil choisie est le débit d'étiage Q347, c'est-à-dire le débit d'un cours d'eau atteint ou dépassé 347 jours par année, dont la moyenne est calculée sur une période de dix ans au minimum et qui n'est pas influencé sensiblement par des retenues, des prélèvements ou des apports d'eau (SHGN 1999). Il est inscrit dans la Loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux), adoptée en 1991. Pour l'Union européenne, la Directive-cadre sur l'eau définit le débit réservé comme ne devant pas être inférieur au 1/10e du module du cours d'eau. On parle aussi de débit réservé écologique (FAUNE ET PARCS QUÉBEC 1999) ou de débit objectif d'étiage (en France), lorsque le débit réservé vise spécifiquement à préserver les usagers environnementaux et leurs habitats : maintien des milieux humides, préservation de la végétation et de la faune aquatique.
- En Suisse, le débit de dotation est le volume d'eau de restitution imposé aux usagers préleveurs pour garantir le maintien du débit résiduel (OFEFP 2000). En ce sens, le

débit de dotation constitue lui aussi une forme de demande en eau, formulée par les pouvoirs publics. En Europe, l'autorité publique chargée de la police de l'eau délivre des autorisations de prélèvement aux usagers. Le calcul du débit ou du volume prélevable tient compte des restitutions au milieu. En conséquence il n'est pas nécessaire d'imposer de volume restitué.

2.5 Discussion et conclusion

2.5.1 Les différents types de confusion concernant les usages de l'eau

Cette recherche sur la terminologie des usages de l'eau dans la littérature scientifique a permis de mettre en évidence un manque de consensus sur les termes liés à l'utilisation de l'eau. Quatre grands types de confusion ont été mis en évidence : les confusions sémantiques, la polysémie des termes, les confusions de catégories d'usage et les approximations liées aux méthodes indirectes de quantification.

Le premier type de confusion, d'ordre sémantique, se produit lorsque des termes différents sont employés comme synonymes. Trois termes distincts – demande, usage et consommation – sont ainsi utilisés pour faire référence à une même notion : l'eau utilisée par les usagers (FALKENMARK et WIDSTRAND 1992 ; ZHOU et al. 2002 ; ARBUÉS et al. 2003 ; CORBELLA et PUJOL 2009 ; VANHAM et al. 2011 ; BEAL et al. 2013 ; RINAUDO 2013). Cette confusion sémantique conduit à mobiliser les termes associés à l'utilisation de l'eau de manière indissociée, gommant ainsi leurs spécificités.

Un deuxième type de confusion, d'ordre terminologique, se produit lorsqu'un même terme est associé à des significations diverses. Par exemple, pour la consommation, nous avons répertorié deux sens distincts (Tableau 2.1) : d'une part, l'eau utilisée par les usagers et d'autre part l'eau évacuée ou « détruite », rendue non réutilisable pour un nouvel usage. La dualité des sens de ce terme n'est pas propre au champ disciplinaire, mais est plutôt liée à l'approche choisie. En effet, les hydrologues et gestionnaires de l'eau ont tendance à s'appuyer sur une approche systémique quantitative des ressources et usages de l'eau afin d'étudier ou réguler l'équilibre entre ces deux systèmes. Le terme de consommation renvoie alors à la perte nette d'un bilan de matière. Cette dualité se retrouve également en économie : les approches en économie institutionnaliste et appliquée (ARBUÉS et al. 2003 ; BARRAQUÉ et al. 2011 ; BUCHS 2016) considèrent l'eau comme un bien tout à fait particulier et distinguent l'eau des services rendus par cette dernière (BUCHS et PETIT 2015) et appréhendent la consommation dans une acception plus générale et proche de celle des hydrologues. Ces approches se distinguent des approches dites « orthodoxes » ou « standards » qui considèrent l'eau comme tout autre bien et pour lesquelles le terme de consommation fait référence aux demandes exprimées monétairement (un volume ou un débit fonction d'un prix auquel l'eau est vendue ou valorisée) (SPULBER et SABBAGHI 1994).

Le troisième type de confusion, d'ordre conceptuel, a trait à la classification des usages de l'eau. Les catégories d'usage de l'eau sont définies selon la nature de l'action à accomplir. Le problème que nous avons observé est lié au choix des composants constituant cette nature (notamment les acteurs et les secteurs impliqués). Par exemple, pour certains auteurs, l'usage domestique de l'eau potable inclut les ménages, les commerces, les industries raccordées aux réseaux municipaux et les usages municipaux (WADA et al. 2011) alors que

pour d'autres, l'usage domestique renvoie uniquement aux usages effectués par les ménages (TEMPLIN et al. 1999 ; KOHLI et al. 2012 ; GROUILLET et al. 2015). Cette dernière définition nous paraît être la plus cohérente par rapport au terme « domestique », bien que la distinction entre les différents usagers raccordés au réseau ne soit pas toujours aisée. Par ailleurs, la demande domestique peut également être exprimée par d'autres dénominations telles que demande des ménages (FREIBURGHAUS 2012 ; BLANC et SCHÄDLER 2013) ou demande résidentielle (ARBUÉS et al. 2003 ; BEAL et al. 2013). Cet exemple montre combien les critères de classification influent sur la terminologie utilisée.

Enfin, le quatrième type de confusion est d'ordre méthodologique. Il est dû à l'utilisation de méthodes indirectes (l'utilisation de valeurs approchées ou *proxis*) pour estimer les volumes d'eau au cours des différentes étapes du cycle d'usage. C'est notamment le cas lorsqu'il n'y a pas de compteur d'eau et que les données d'apport sont estimées via une autre étape du cycle pour laquelle une mesure existe (distribution, prélèvement). Le fait d'estimer un volume d'eau par une méthode indirecte engendre deux difficultés. Premièrement, le proxi est par définition une valeur approchée qui signifie qu'il y a un écart par rapport au volume que l'on cherche réellement à estimer. Deuxièmement, lorsqu'un proxi est utilisé à plusieurs reprises, la signification de la quantité d'eau servant de proxi vient prendre la place de la quantité que l'on cherche à estimer. Ceci engendre alors des approximations, non seulement en termes de quantification, mais aussi en termes de représentation de la notion estimée. Et ces approximations sont bien plus importantes que les incertitudes provenant de la mesure directe.

2.5.2 Intérêts et limites du cycle d'usage de l'eau en tant qu'appui terminologique

Cet article s'appuie sur le concept du cycle d'usage, tel que schématisé par ERHARD-CASSEGRAIN et MARGAT (1983), pour proposer une organisation des termes se rapportant à chaque usage de l'eau au travers d'une représentation et description schématique de la dynamique des flux d'eau. Ces flux partent du système de la ressource pour y revenir partiellement après un parcours dans le système des usages et peuvent être déclinés en quantités d'eau distinctes mobilisées par l'usager, qui effectue une demande en eau. La demande en eau joue un rôle central dans ce cycle. Elle est considérée comme l'expression du besoin en eau, sous la forme d'une requête de la part de l'usager. La demande est ainsi vue comme un stimulus actionnant le cycle technique d'usage, dans lequel se retrouvent les termes qui sont associés à des quantités d'eau observables et mesurables : prélèvement, distribution, apport, consommation et restitution.

Dans le cas de l'approvisionnement en eau potable, la schématisation sous forme cyclique a permis de faire la distinction entre l'eau potable et ses usages. Dans le cycle d'usage de l'eau pour l'irrigation, le rôle de l'usager irrigant a été mis en avant dans la terminologie, par rapport au rôle des plantes. Nous considérons que c'est l'usager irrigant qui effectue la demande en eau d'irrigation, qu'il estime être l'expression correcte des besoins en eau de ses cultures. De même, pour les usages environnementaux, ce sont des usagers humains qui évaluent et expriment les besoins environnementaux en émettant une demande en eau, au nom des écosystèmes.

La schématisation en cycles d'usage de l'eau a l'avantage d'apporter un caractère quantitatif aux représentations purement systémiques des usages de l'eau (REYNARD 2000b ; CHARNAY 2010 ; BONRIPOSI 2013 ; MUSY et al. 2014), qui offrent une vision relationnelle – a-temporelle et a-spatiale – des interactions entre acteurs, entités et usagers de l'eau. Un autre avantage est qu'elle apporte un support schématique aux algorithmes ou aux modèles statistiques de prévision des usages de l'eau (BABEL et al. 2007 ; VANHAM et al. 2011 ; SAULNIER et al. 2011 ; GROUILLET et al. 2015 ; MILANO et al. 2015), qui représentent les flux d'eau et quantifient les apports, mais ne permettent pas de mettre en évidence les liens de cause à effet et les interactions entre entités ou acteurs. Le schéma de cycle d'usage permet également de situer les proxis, d'un côté par rapport aux notions qu'ils désignent et de l'autre par rapport aux quantités d'eau qu'ils permettent d'approcher.

De plus, l'inclusion du système technique et la différenciation des usagers de l'eau dans les diagrammes de cycle d'usage permettent de faire le lien entre les terminologies proches des sciences humaines et sociales, et celles proches des sciences de l'ingénieur ou de la gestion de l'eau, en organisant la terminologie par rapport aux infrastructures techniques. C'est une manière de concrétiser les notions dans un schéma plus proche de la réalité interdisciplinaire propre à la gestion de l'eau. Ainsi, dans un même schéma, il est possible de rendre compte de la multiplicité des facteurs qui sont à prendre en compte dans le processus d'usage.

En parallèle des apports théoriques, ces cycles d'usage de l'eau peuvent également être utiles dans la pratique des gestionnaires de l'eau, car ils permettent d'organiser la quantification des usages en facilitant la distinction des termes utilisés dans les étapes de suivi et de monitoring de la gestion intégrée des ressources en eau.

Il existe néanmoins plusieurs limites à cette approche. Tout d'abord, le cycle d'usage de l'eau, tel qu'il est construit ici, est circonscrit aux aspects quantitatifs de la gestion de l'eau. Les questions liées à la gestion de la qualité de l'eau n'y sont pas traitées, bien qu'elles puissent être ajoutées ultérieurement. D'un point de vue terminologique, la question de la qualité est en effet intéressante : une eau de mauvaise qualité restituée au système de ressources peut être considérée comme consommée pour d'autres usagers puisqu'ils ne pourront pas l'utiliser si elle ne respecte pas leurs exigences qualitatives (ERHARD-CASSEGRAIN et MARGAT 1983). Ensuite, la question de la reproductibilité de ces cycles peut se poser, dans la mesure où ils représentent parfois des cas particuliers, valables pour un type d'usage à un endroit donné. Néanmoins, par leur simplicité, il est possible de les adapter à différents contextes : le système de ressource choisi peut par exemple être le bassin versant, une unité de gestion (limites communales, limites d'organismes de bassin) ou une unité hybride bassin versant - limite administrative, sous réserve de pouvoir établir les conditions aux limites. Il est également possible d'y ajouter tout type d'usager. Une autre limite est la dimension spatiale des cycles d'usage, qui est plutôt orientée vers les approches locales. Pour les études à l'échelle macroscopique (nationale ou supra-nationale), il n'est plus envisageable de représenter l'entièreté des flux d'eau, ni tous les acteurs et usagers.

Enfin, plusieurs aspects de la quantification des usages de l'eau restent à approfondir. Le premier concerne la question de la variabilité des ratios unitaires d'apports, lorsqu'ils sont utilisés dans les études prospectives des usages de l'eau. À l'échelle supra-nationale (FALKENMARK et WIDSTRAND 1992 ; HOEKSTRA et al. 2011) ou nationale (BARRAQUÉ et al. 2011 ;

BLANC et SCHÄDLER 2013), ces ratios sont utilisés en regard de la population et de manière indifférenciée tout au long de l'année. À l'échelle régionale (CHARNAY 2010 ; SAULNIER et al. 2011 ; MILANO et al. 2013a ; GROUILLET et al. 2015) et locale (VANHAM et al. 2011 ; LEROY 2015), le ratio unitaire d'apport en eau choisi est celui considéré comme représentatif de la région étudiée. À cette échelle, il est souvent complété par les variations spatiales et temporelles de la population (densités d'habitat, saisonnalité des habitats temporaires) (REYNARD et al. 2014 ; MILANO et al. 2015). Une perspective de recherche consisterait à déterminer quelles sont les variations de ce ratio unitaire, à l'échelle régionale et locale, ce qui revient à approfondir l'étude de la variabilité des apports et leurs déterminants, comme le fait MONTGINOUL (2013). Il s'agit de déterminer quelles sont les différences d'apport suivant le type d'usage et selon l'individu, quelles sont les variations spatiales des usages (suivant l'altitude, le climat, les ressources disponibles) et selon quelles saisonnalités elles évoluent (été-hiver, variations inter-annuelles, haute et basse saison des territoires touristiques). Une autre perspective de recherche relève des relations entre différents cycles d'usages, pour permettre une schématisation des relations entre usagers. Certains éléments d'interaction pourraient être ajoutés aux schémas de cycle d'usage : les synergies, les concurrences, les transferts d'eau, les aspects économiques et les conflits d'usages. Cela permettrait d'enrichir les composantes sociales du cycle d'usage de l'eau, à ce stade tourné majoritairement vers le technique et le quantitatif.

Remerciements

Nous remercions Bernard Weissbrodt, éditeur de la *Lettre aqueduc.info*, qui nous a donné l'opportunité de réfléchir aux notions étudiées ici, sous la forme d'un article préliminaire publié à l'occasion de la centième édition de sa lettre d'information. Nos remerciements vont également à Aude Soureillat, Georges-Marie Saulnier et André Musy pour leurs commentaires sur une version préliminaire du manuscrit, ainsi qu'aux deux réviseurs anonymes pour leurs remarques constructives qui ont permis d'améliorer la qualité de l'article. Nous tenons enfin à remercier Manuela Fernandez pour ses apports précieux à la relecture du manuscrit.

Chapitre 3

Cas d'étude et montage expérimental

3.1 Présentation des cas d'étude

3.1.1 Montana

Introduction

La commune de Montana se situe au sud de la Suisse, dans le canton du Valais. Elle occupe l'adret en rive droite de la vallée du Rhône, surplombant la ville de Sierre (Fig. 3.1). La situation d'abri de cette vallée intra-alpine, comprise entre les Alpes Valaisannes, au sud, et les Alpes Bernoises, au nord, induit un climat de type continental, ce qui explique la relative sécheresse de cette région dans les altitudes proches de la plaine du Rhône.

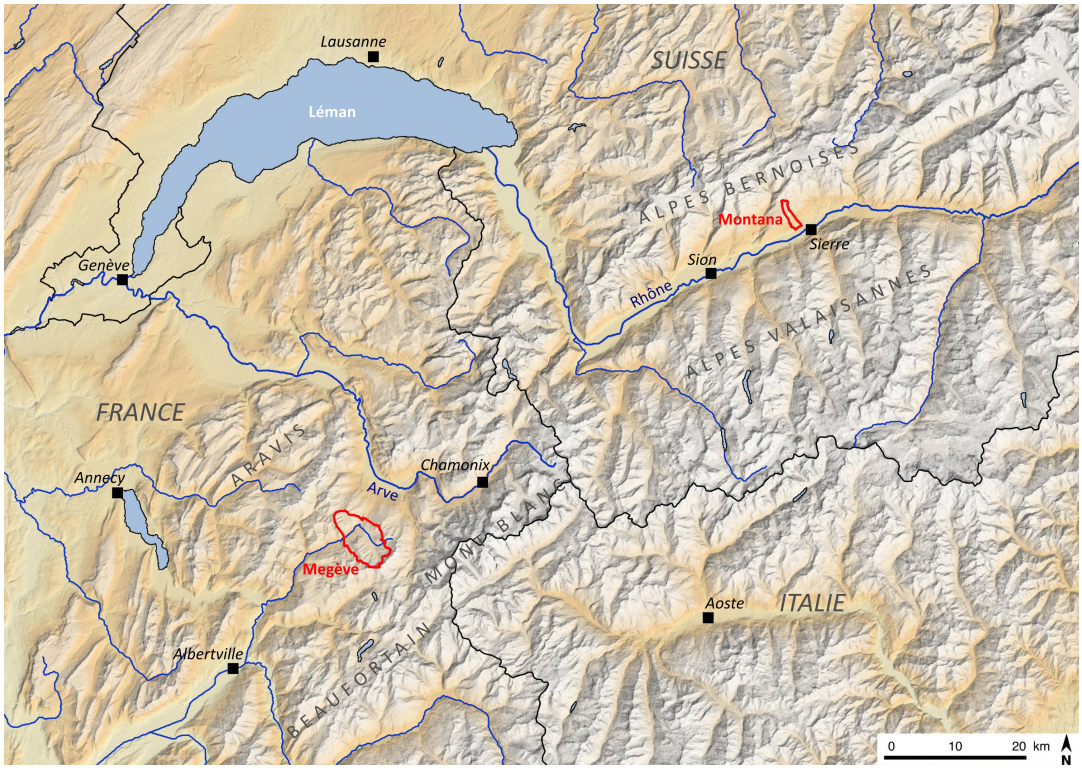


FIGURE 3.1 – Localisation des communes étudiées par rapport aux massifs alpins.

Il est à noter que le premier janvier 2017, Montana a fusionné avec ses voisines Chermignon, Randogne et Mollens pour former la nouvelle commune de Crans-Montana. Cependant dans ce travail, nous parlerons de Montana telle qu'était la commune avant 2017 car l'étude a débuté en 2013 et c'est à cette échelle que l'analyse a été effectuée. La commune de Montana a été choisie comme cas d'étude pour cette recherche car la région de Crans-Montana-Sierre a déjà fait l'objet de plusieurs travaux, dont la thèse de REYNARD (2000b) sur la gestion patrimoniale et intégrée de ses ressources en eau et la thèse de BONRIPOSI (2013) qui a produit une analyse systémique et prospective de ses usages de l'eau. La présente thèse s'inscrit donc dans la suite logique de ces travaux, en valorisant les contacts déjà acquis sur place et en approfondissant les questions scientifiques qui en sont ressorties, avec une focalisation sur les usages de l'eau : les enjeux de monitoring des usages, les quantités réellement utilisées, leur saisonalité et leur répartition spatiale. Parmi les communes de la région de Crans-Montana-Sierre, Montana a été sélectionnée car elle présente un large pannel d'usages de l'eau et qu'elle a la particularité d'utiliser des eaux qui sont prélevées quasi entièrement hors des limites communales. Deux autres particularités rendent ce territoire intéressant du point de vue des usages de l'eau. Tout d'abord, le climat continental dont jouit la région fait que les demandes en eau d'irrigation sont importantes en été. Ensuite, la présence d'une partie de la station touristique de Crans-Montana sur la commune fait que les demandes en eau potable présentent une forte saisonalité.

Originairement basée sur une agriculture alpine de subsistance (pâturages, céréales), l'économie de la commune a été fortement bouleversée par l'essor du tourisme de cure à partir de 1892 et par la suite, au milieu du 20^e siècle, le développement du tourisme sportif hivernal. Réputée pour être une station bourgeoise, Crans-Montana possède des terrains de golf de renommée internationale et un nombre très important de résidences secondaires. Malgré tout, en termes d'occupation du sol, les prairies, les pâturages et le vignoble occupent une grande partie du territoire communal. L'accès à l'eau a marqué profondément l'histoire de la région. La ressource était relativement abondante mais difficilement accessible (REYNARD 2001) car elle se retrouve essentiellement dans les vallées de la Lienne et de la Raspille, profondément incisées dans le versant sur lequel Crans-Montana est situé. Cet isolement hydrologique a conduit à la construction de canaux d'irrigation (les *bisses* dès le Moyen Age, qui ont permis d'intensifier l'irrigation des prairies (DUBUIS 1994) et, bien plus tard (au cours du 19^e siècle), l'arrosage des vignes (REYNARD 2001).

Contexte bio-physique

Le contexte bio-physique sur lequel est implanté la commune de Montana est décrit en premier lieu dans cette section (relief, végétation, climat et hydrologie), car ce territoire alpin a une grand influence sur les modes de vie, les événements historiques et la gestion de l'eau. Montana forme une bande verticale de 4.89 km^2 qui s'étend depuis la plaine du Rhône (580 m) jusqu'au domaine skiable de Crans-Montana (1770 m) (Fig. 3.2).

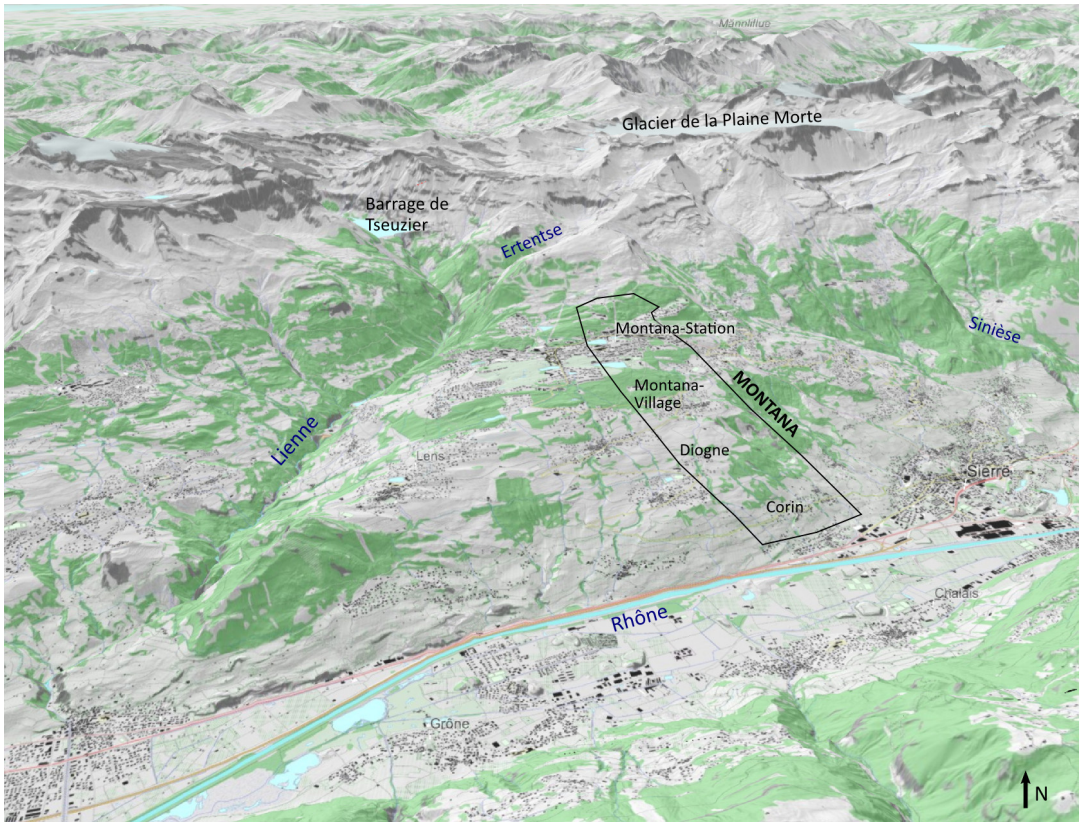


FIGURE 3.2 – Relief autour de la commune de Montana. Source du bloc diagramme : swisstopo.

De par cette configuration verticale, Montana présente une grande variété de végétation et d'occupations du sol, selon l'étagement altitudinal. De bas en haut, les paysages suivants sont rencontrées :

- En contre-bas de la limite sud de Montana (500 m) : la plaine du Rhône, où s'étend la commune de Sierre.
- Entre 580 m et 1000 m : la partie basse de la commune de Montana, sur un coteau en forte pente. On y retrouve le village de Corin entouré de vignobles, qui s'étendent depuis la plaine jusqu'à environ 800 m (Fig. 3.3c). Sur la partie haute du coteau, une bande de forêt de feuillus surplombe les vignes.
- A partir de 1000 m, la pente s'adoucit et on retrouve le hameau de Diogne et le village historique de Montana-Village, autour desquels la forêt a été défrichée pour mettre en places des parcelles de prairies et de pâturages, et anciennement, quelques cultures céréalières de subsistance (Fig. 3.3b).
- Entre 1300 et 1400 m se situe une forêt de conifères qui surplombe Montana-Village.
- Entre 1400 et 1600 m se trouve une partie plus ou moins plane appelée Haut-Plateau, bien que ce terme soit géomorphologiquement erroné car il ne présente pas de stratification tabulaire (REYNARD 2005). Sur le Haut-Plateau s'est installée la station touristique de Crans-Montana (Fig. 3.3a).
- Sur la partie haute de Montana (jusque 1700 m), les pentes redeviennent fortes. On y retrouve des forêts de conifères, le bas du domaine skiable et des alpages d'altitude.
- Plus haut encore se situent les crêtes des Alpes Bernoises et le glacier de la Plaine Morte, à 2'750 m d'altitude.



FIGURE 3.3 – Trois différents types d'occupation du sol à Montana suivant l'étagement altitudinal : la station touristique sur le Haut-Plateau (a), les prairies entourant le village historique (b) et le coteau avec son vignoble (c). Photographies : Martin Calianno (également pour les autres photographies du manuscript, sauf mention particulière).

La région de Montana se situe dans les Hautes Alpes Calcaires, appartenant au domaine tectonique helvétique au nord et pennique au sud, bien visibles sur la coupe géologique en rive droite de la vallée du Rhône (Fig. 3.4). Les roches mères rencontrées sont des alternances de calcaires et des schistes dont les couches sont sub-verticales, avec un léger pendange sud en direction de la plaine du Rhône. Ces plans de stratification sub-verticaux ont formé les coteaux, avec leur pente forte, où affleurent les calcschistes gréseux du Flysch valaisan, appartenant au domaine pennique (BADOUX et al. 1959). Tandis qu'au niveau du Haut-Plateau, le passage du glacier du Rhône a érodé de manière différentielle la succession de roches du domaine helvétique, dont les alternances de schistes (moins résistants) et de calcaires (plus résistants) ont formé un paysage typique fait de croupes et d'éperons alignés parallèlement à la plaine du Rhône (REYNARD 2005). Ces ressauts sont séparés par des dépressions marécageuses, souvent colmatées de moraines et qui ont parfois été aménagées pour y créer des lacs et des réservoirs d'irrigation.

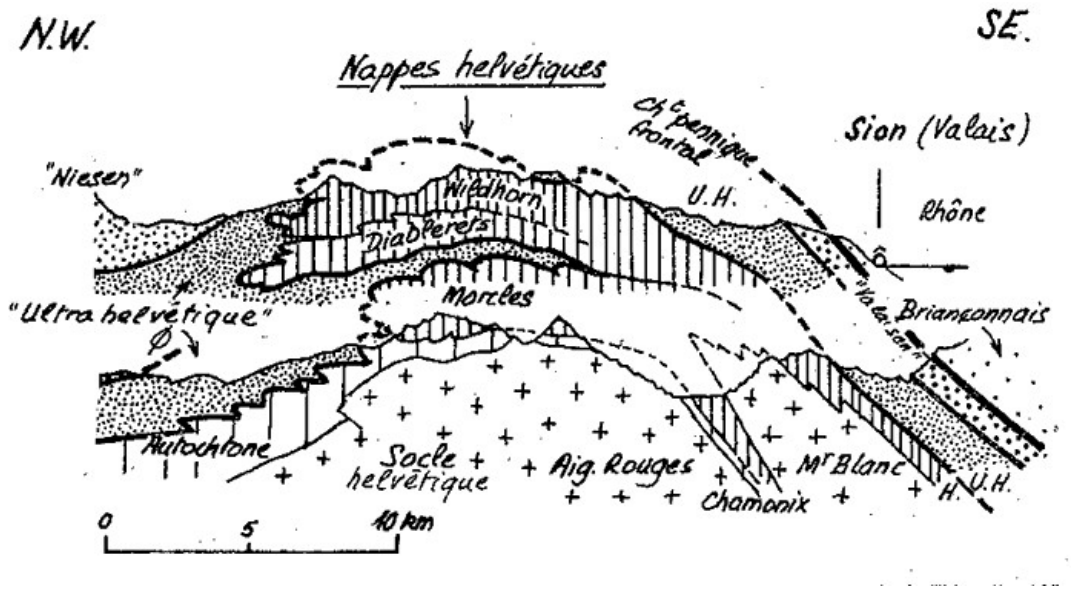


FIGURE 3.4 – Coupes en rive droite de la vallée du Rhône dans sa traversée du prolongement nord des massifs cristallins externes : en haut une vingtaine de kilomètres au NE de la vallée, au niveau du col du Pillon et du massif des Diablerets ; en bas pratiquement le long de la vallée, aux environs de Saint-Maurice (en aval) et du coude de Martigny (en amont). Image extraite du site web GEOL-ALP (GIDON 2018).

Pour la suite du travail concernant l'irrigation de la vigne, il est nécessaire de présenter succintement le contexte géomorphologique et pédologique au niveau du vignoble de Montana. Le vignoble appartient à l'ensemble des coteaux de Sierre, dont la partie située à l'ouest du village de Corin est assez pentue et de topographie homogène (LETESSIER et MARION 2007). Les vignes occupent les versants entre 500 et 800 mètres d'altitude et reposent sur la roche mère du flysch valaisan. Du côté est de Corin, en direction de la commune de Randogne, les pentes sont un peu plus douces. Des terrains gypseux et schisteux du domaine helvétique y affleurent et apparaissent bosselés en raison des déformations entraînées par un important glissement de masse (glissement du Boup), qui est accompagné de circulations d'eau latérales (BURRI 1997). Les pentes n'étant pas très raides, il y a peu de terrasses mais par contre de nombreux murs en pierres sèches soutiennent le bas des parcelles. La topographie est faite de sursauts assez pentus, armés par des schistes calcaires se débitant en plaques, sur lesquels s'appuient les murs des parcelles (LETESSIER et MARION 2007).

Climat et hydrologie

Contexte climatique général

Le Valais Central, où se situe Montana, est la région la plus sèche de Suisse, avec des précipitations moyennes en plaine nettement inférieures au reste du pays (voir Fig. 3.5).

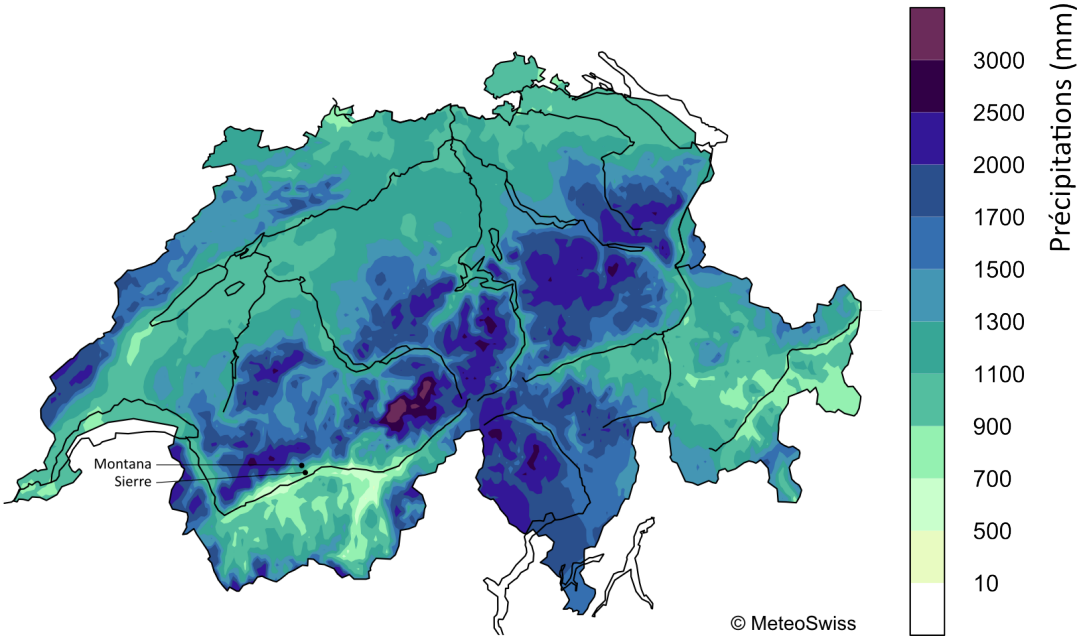


FIGURE 3.5 – Précipitations moyennes annuelles (mm) en Suisse sur la période 1981-2010. Données MétéoSuisse.

Dans la vallée intra-alpine du Rhône, au niveau de la plaine, le climat est de type continental. Les hivers sont froids en raison des situations d'inversion thermique. Les étés sont chauds et secs à cause de la situation d'abri entre les crêtes des Alpes Bernoises au nord, et des Alpes Valaisannes au sud, créant un effet de foehn asséchant et réchauffant la vallée. Cette situation d'abri induit un ensoleillement exceptionnel avec plus de 2'000 heures par année (BOUËT 1985), ce qui a fait le succès du Haut-Plateau et de ses établissements de cure (DORIOT GALOFARO 2005).

Le climatogramme de Sion (Fig. 3.6) est représentatif de la situation pour la plaine (482 m) tanquis que le climatogramme de Montana (Fig. 3.7) donne une idée du climat sur le Haut-Plateau (1427 m). Sion enregistre des températures plus hautes de deux à trois degrés par rapport à Montana tout au long de l'année.

Les gradients altitudinaux de températures et de précipitations expliquent les différences d'occupation du sol et d'activités agricoles à Montana suivant l'étagement de la végétation (REYNARD 2000b) : la vigne se porte bien aux basses altitudes (dans l'étage collinéen, jusqu'à environ 800 m) sur les coteaux proches de la plaine, jouissant d'un ensoleillement important et de températures élevées. Le Haut-Plateau se situe entre l'étage montagnard et subalpin et se caractérise par des forêts de résineux et par les vastes surfaces consacrées à la prairie et aux alpages (BONRIPOSI 2013).

Les précipitations moyennes annuelles sur la période 1980-2010 sont de 605 mm à Sion alors qu'elles atteignent 692 mm à Montana. Ces cumuls de précipitations sont similaires au valeurs observées dans les climats méditerranéens et sont très faibles en comparaison des 2000 mm pouvant tomber annuellement sur les crêtes alpines voisines (voir Fig. 3.5). Les

étés secs étant également chauds (moyennes de juillet : 20 ˚C à Sion contre 14.9 ˚C à Montana), l'irrigation des vignes et des prairies est une pratique largement répandue dans le Valais Central. Les étés étant également secs sur le Haut-Plateau, l'irrigation des jardins et des pelouses dans la station touristique est un usage courant de l'eau.

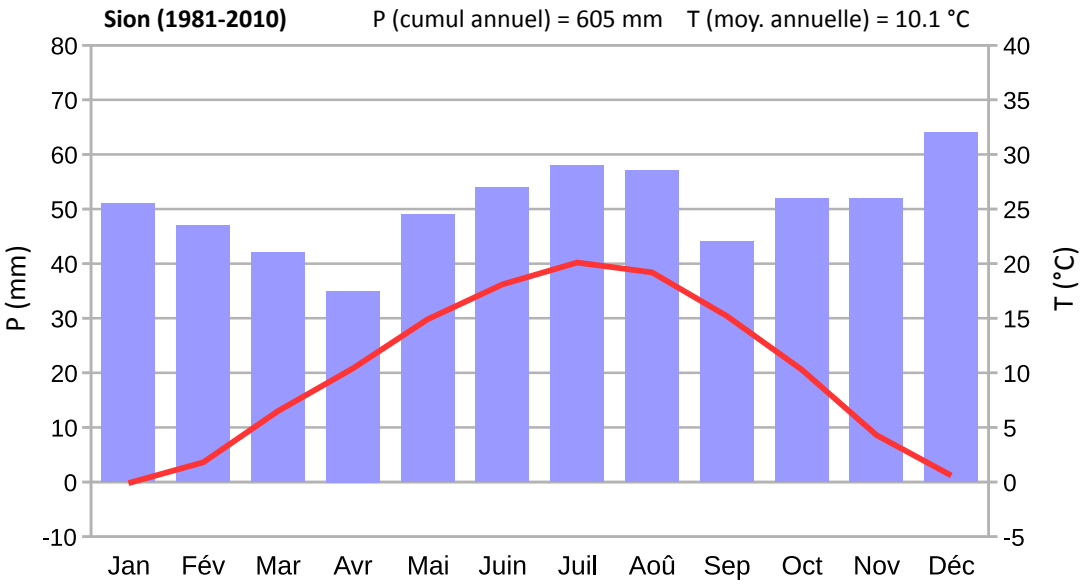


FIGURE 3.6 – Climatogramme pour la station météorologique de Sion (482 m), sur la période 1981-2010. Données MétéoSuisse.

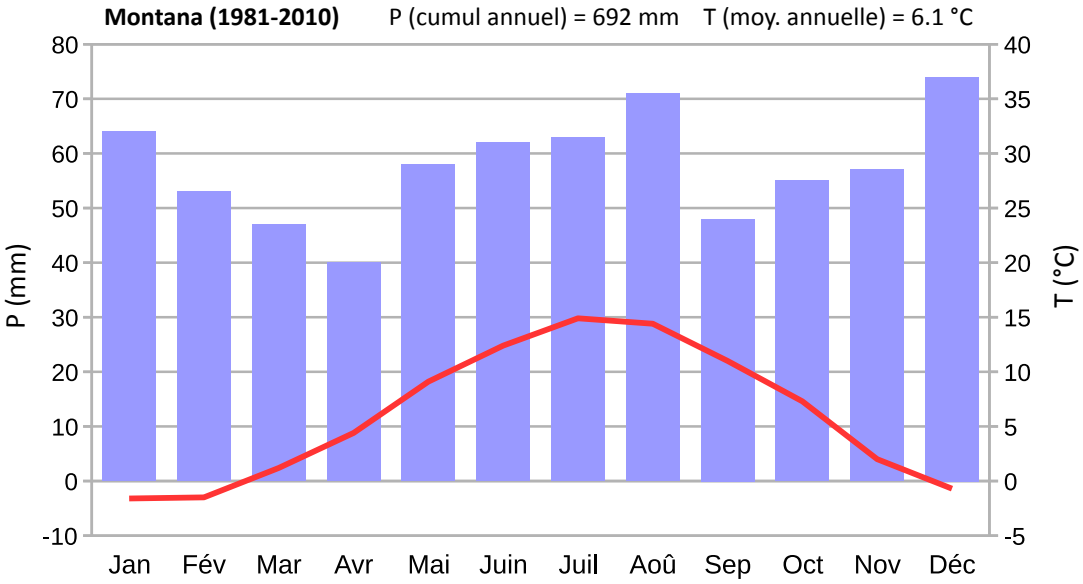


FIGURE 3.7 – Climatogramme pour la station météorologique de Montana (1427 m), sur la période 1981-2010. Données MétéoSuisse.

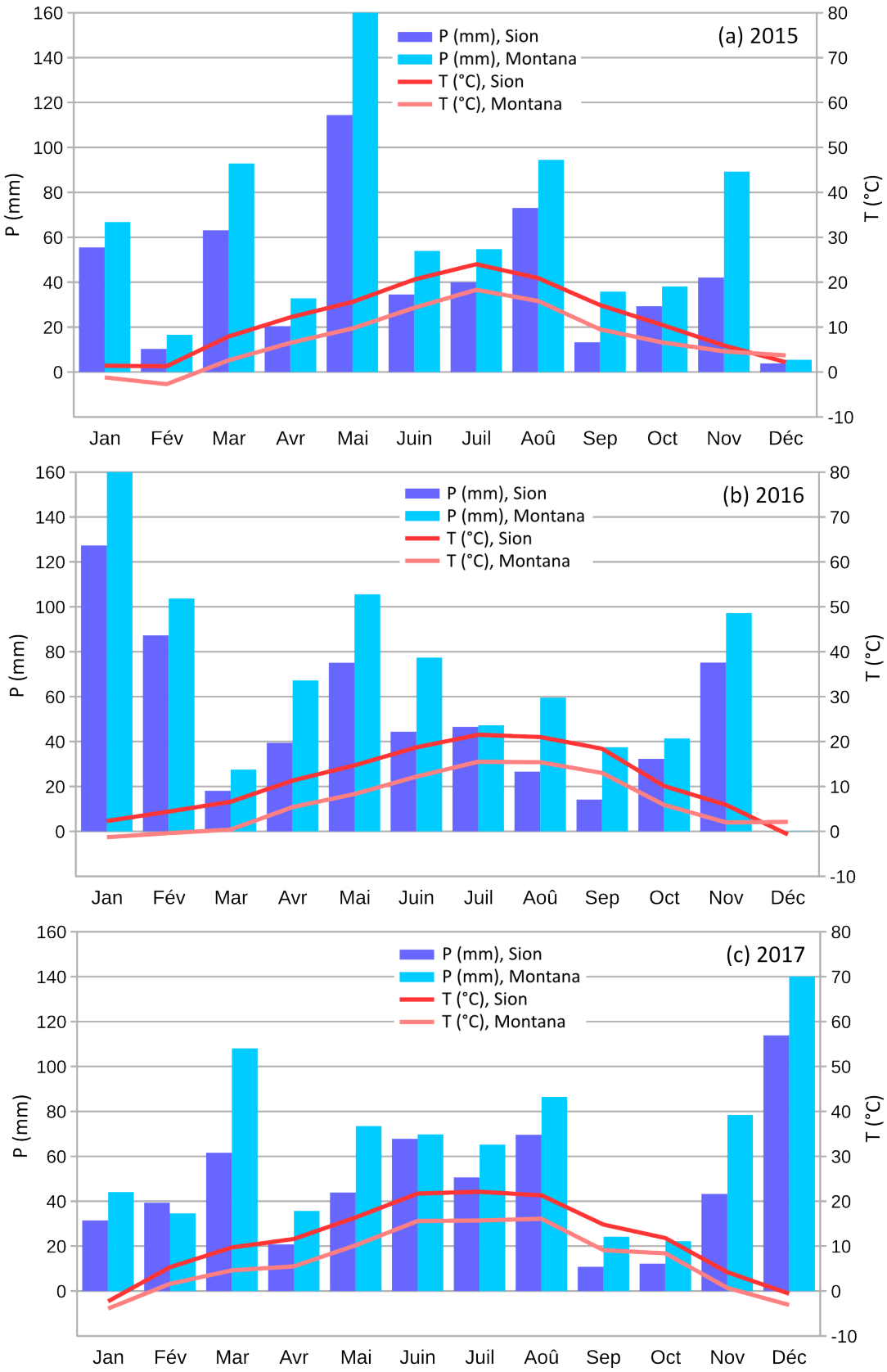


FIGURE 3.8 – Cumuls de précipitations et températures moyennes mensuelles aux stations de Montana (1427 m) et Sion (482 m) en 2015 (a), 2016 (b) et 2017 (c). Données MétéoSuisse.

Conditions climatiques durant les trois années d'étude

Les conditions climatiques ont été relativement contrastées entre les trois années étudiées : 2015, 2016 et 2017 (Fig. 3.8). La figure 3.9 synthétise les écarts de températures et précipitations mensuelles de ces trois années par rapport à la norme 1981-2010. Les tons bleus indiquent des valeurs anormalement humides ou fraîches alors que les tons verts indiquent des valeurs anormalement sèches ou chaudes.

			Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc
2015	Montana	T (°C)	0.4	-1.2	1.4	2.1	0.6	1.9	3.4	1.4	-1.5	-0.7	2.6	4.4
		P (mm)	2.8	-36.4	45.9	-7.2	105.4	-8	-8.3	23.5	-12.2	-16.9	32.3	-68.5
	Sion	T (°C)	1.5	-0.5	1.4	1.8	0.7	2.5	3.9	1.7	-0.3	0.2	1.6	1.6
		P (mm)	4.5	-36.7	21.1	-14.6	65.5	-19.4	-18	16.1	-30.7	-22.7	-9.9	-60.1
2016	Montana	T (°C)	0.3	1.1	-0.8	1	-0.8	-0.2	0.6	1	2	-1.4	0	2.8
		P (mm)	97.7	50.7	-19.5	27.2	47.6	15.4	-15.7	-11.5	-10.5	-13.6	40.2	-73.9
	Sion	T (°C)	2.4	2.6	0.1	0.9	-0.2	0.6	1.4	1.8	3.2	-0.2	1.6	-1.3
		P (mm)	76.3	40.3	-23.9	4.4	26.1	-9.6	-11.4	-30.4	-29.8	-19.7	23.2	-64
2017	Montana	T (°C)	-2.3	3.1	3.4	1.1	1.1	3.2	0.8	1.7	-1.9	1.1	-1.3	-2.4
		P (mm)	-19.9	-18.4	61.1	-4.3	15.5	7.8	2.2	15.5	-23.8	-32.8	21.4	66.1
	Sion	T (°C)	-2.2	3.5	3.2	1.2	1.5	3.6	2	2.1	-0.4	1.5	-0.1	-1.2
		P (mm)	-19.5	-7.7	19.6	-14.2	-5.1	13.8	-7.4	12.6	-33.2	-39.8	-8.7	49.9

T (°C)	-3	-2	-1	0	1	2	3	**Ecarts à la normale 1981-2010**
P (mm)	60	40	20	0	-20	-30	-40	

FIGURE 3.9 – Ecarts par rapport à la norme 1981-2010 aux stations de Montana (1427 m) et Sion (482 m) en 2015, 2016 et 2017. Données MétéoSuisse.

L'annnée 2015 a connu un début extrêmement doux, avec des records de températures hivernales mesurées en Suisse durant la première quinzaine de janvier (MÉTÉOSUISSE 2015). A partir de la mi-janvier et jusqu'à fin février, les température sont redevenues hivernales. Le printemps a été doux et ensoleillé en mars et avril, avec des températures au dessus des normales. Le début du mois de mai a été par contre marqué par un événement de précipitations intenses, avec plus de 100 mm tombés entre le 1^{er} et le 3 mai. Ce court événement est responsable de la quasi totalité des pluies tombées au mois de mai à Sion (114 mm) et à Montana (163 mm). L'été a ensuite été caniculaire en juin, juillet et août, la Suisse ayant vécu cette année-là son deuxième été le plus chaud depuis le début des mesures, après l'été record de 2003 (MÉTÉOSUISSE 2015). A Montana et Sion, les températures du mois de juillet ont été supérieures de 2 °C par rapport à la norme 1981-2010. Les vagues de chaleur ont aussi été exceptionnelles, avec des températures maximales journalière comprises entre 33 et 36 °C dans les régions de plaine du Nord des Alpes au début juillet et un nouveau record absolu de 39.7 °C le 7 juillet à Genève. Le début d'automne a ensuite été frais. Ensuite, les mois de novembre et décembre ont été extrêmement doux et ensoleillés, avec un manque persistant de précipitations, en particulier pour le mois de décembre où la neige a été absente des stations pour les fêtes de fin d'année. Cette situation anticyclonique se voit très bien sur la Figure 3.8a, en décembre, avec des précipitations quasi nulles et une inversion de température : il a fait plus chaud à Montana qu'à Sion.

L'année 2016 a débuté avec une douceur hivernale proche des records. Moyennée sur les trois mois de l'hiver (décembre 2015 - février 2016), la température a dépassé la norme 1981-2010 de 2.5 °C en moyenne sur l'ensemble de la Suisse (MÉTÉOSUISSE 2016). Les précipitations ont par contre été importantes en janvier et en février, avec un cumul de 265 mm à

Montana et 214 mm à Sion. Le printemps s'est ensuite également montré pluvieux et frais, particulièrement en mai (105 mm à Montana, 75 mm à Sion) et le mois de juin qui a suivi a été gris et pluvieux. Un temps estival s'est finalement installé au mois de juillet et août, entrecoupé de quelques épisodes orageux, ce qui explique par exemple les différences locales de précipitations au mois d'août entre Sion (26 mm) et Montana (59 mm). L'été s'est ensuite prolongé jusqu'en septembre, avant une brusque chute des températures en octobre, où la neige est tombée jusqu'en moyenne montagne. Cette offensive hivernale précoce a duré jusqu'à la mi-novembre, où il a abondamment neigé en montagne (MÉTÉOSUISSE 2016). Les stations de ski ont pourtant très vite déchanté car le mois de décembre qui a suivi a été exceptionnellement ensoleillé, chaud et sec, en raison de conditions anticycloniques persistantes. La neige a rapidement fondu en altitude et était absente jusqu'à près de 2000 m. Comme pour la fin d'année 2015, les conditions climatiques à Montana se prêtaient donc plus à la balade qu'au ski.

Après un mois janvier 2017 inhabituellement froid à Montana (environ 2 ˚C sous la norme 1981-2010), des records de douceur ont caractérisé le mois de février, avec une température maximale journalière de 21.4 ˚C mesurée à Sion le 23 février. D'une manière générale, l'hiver 2016/17 a été extrêmement sec, ensoleillé et peu enneigé : le Valais n'avait pas connu une sécheresse comparable depuis 40 ans, avec moins de la moité des précipitations normales (MÉTÉOSUISSE 2017). Après un mois de mars relativement arrosé, le printemps qui s'en est suivi a été le troisième plus chaud sur l'ensemble de la Suisse depuis le début des mesures en 1864. Avril a été particulièrement sec et chaud à Sion et Montana. Ce printemps précoce a vu fleurir les arbres fruitiers 16 à 18 jours plus tôt que la moyenne 1981-2010 (MÉTÉOSUISSE 2017). Les fortes gelées de la nuit du 20 au 21 avril ont donc fait des ravages en Valais, où les dégâts ont été importants sur les abricotiers en floraison et dans les vignes. L'été qui a suivi a été lui aussi le troisième plus chaud enregistré en Suisse après ceux de 2003 et 2015. Le mois de juillet a connu des températures supérieures à la norme 1981-2010 de 1 ˚C à Montana et de plus de 2 ˚C à Sion, alors que le mois de juin a vu jusqu'à +3 ˚C et le mois d'août jusqu'à + 2 ˚C. Il faut aussi noter plusieurs épisodes orageux importants survenus la deuxième semaine d'août. L'année s'est ensuite terminée par des mois de septembre et octobre frais et secs. Les premières offensives hivernales sont ensuite apparues en novembre et l'année s'est clôturée par des quantités importantes de neige tombées en décembre.

Hydrologie

D'un point de vue hydrographique, la commune de Montana se situe sur l'interfluve des bassins versants de la Lienne, à l'ouest, et de la Sinièse et de la Raspille, à l'est. Cette interfluve forme un triangle comprenant les coteaux de Sierre et le Haut-Plateau (Fig. 3.10 ; BONRIPOSI 2013). Cet interfluve est en quelque sorte coupé des principaux hauts bassins versants. Il ne comprend que des torrents de petite taille de régime nivo-pluvial avec un premier étiage en été (juillet - septembre) et un second en hiver (janvier - mars). Malgré cette *déconnexion* hydrologique, les territoires du coteau (les parties basses de Lens, Chermignon, Montana et Randogne, ainsi que Venthône et Veyras) ont été privilégiés pour l'habitat et l'agriculture en raison de leurs pentes moins abruptes et de leur meilleure exposition. C'est la raison pour laquelle les bisses ont depuis très longtemps été aménagés pour pouvoir amener l'eau des bassins versants glacio-niveaux dont les écoulements soutenus par les eaux de fonte perdurent jusque la fin de l'été. Tout au sommet de ces bassins versants, le glacier de la Plaine Morte assure donc leur alimentation, pour quelques dizaines d'années encore du moins, après être passé au travers d'un système karstique complexe (FINGER et al. 2013).

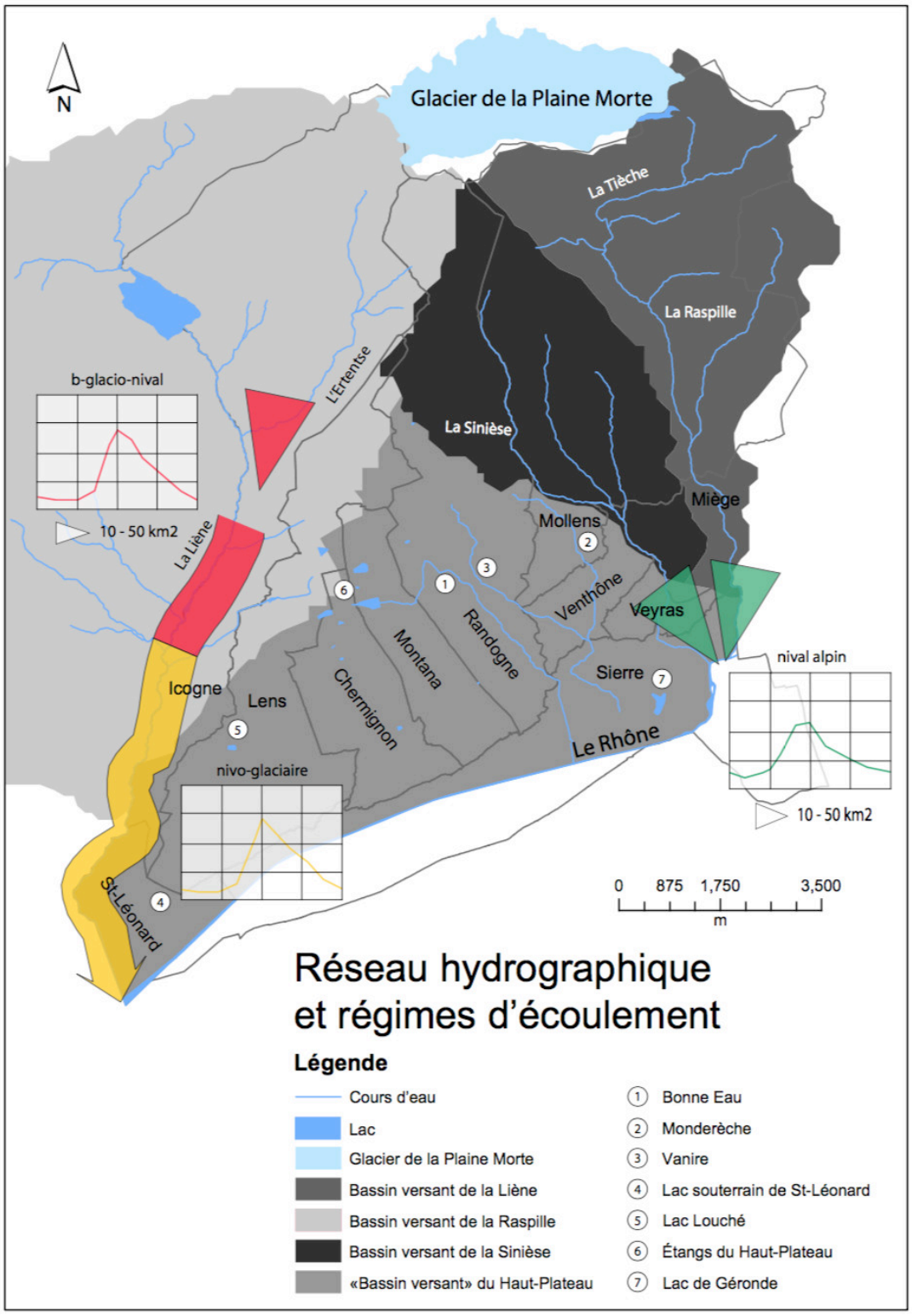


FIGURE 3.10 – Hydrographie, bassins versants et régimes hydrologiques de la région de Crans-Montana-Sierre. Figure extraite de BONRIPOSI (2013). Sources des données : Services des registres fonciers et de la géomatique du canton du Valais et WEINGARTNER et ASCHWANDEN (1992).

Contexte géographique et historique

La morphologie du territoire et son climat, conjointement aux relatives difficultés d'accès à l'eau, ont de tous temps influencé la vie des habitants de la région (BONRIPOSI 2013). De ces facteurs découle l'organisation du territoire de Crans-Montana-Sierre selon un découpage vertical, façonné par les limites politiques, et selon un découpage vertical, induit par les activités économiques correspondant aux différents étages bio-climatiques (REYNARD 2000b).

Au début de cette thèse (2013), Montana faisait partie des communes du coteau de Sierre, formant des bandes verticales allant de la plaine aux crêtes alpines avec d'ouest en est : Icogne, Lens, Chermignon, Montana, Randogne et Mollens (Fig. 3.11).

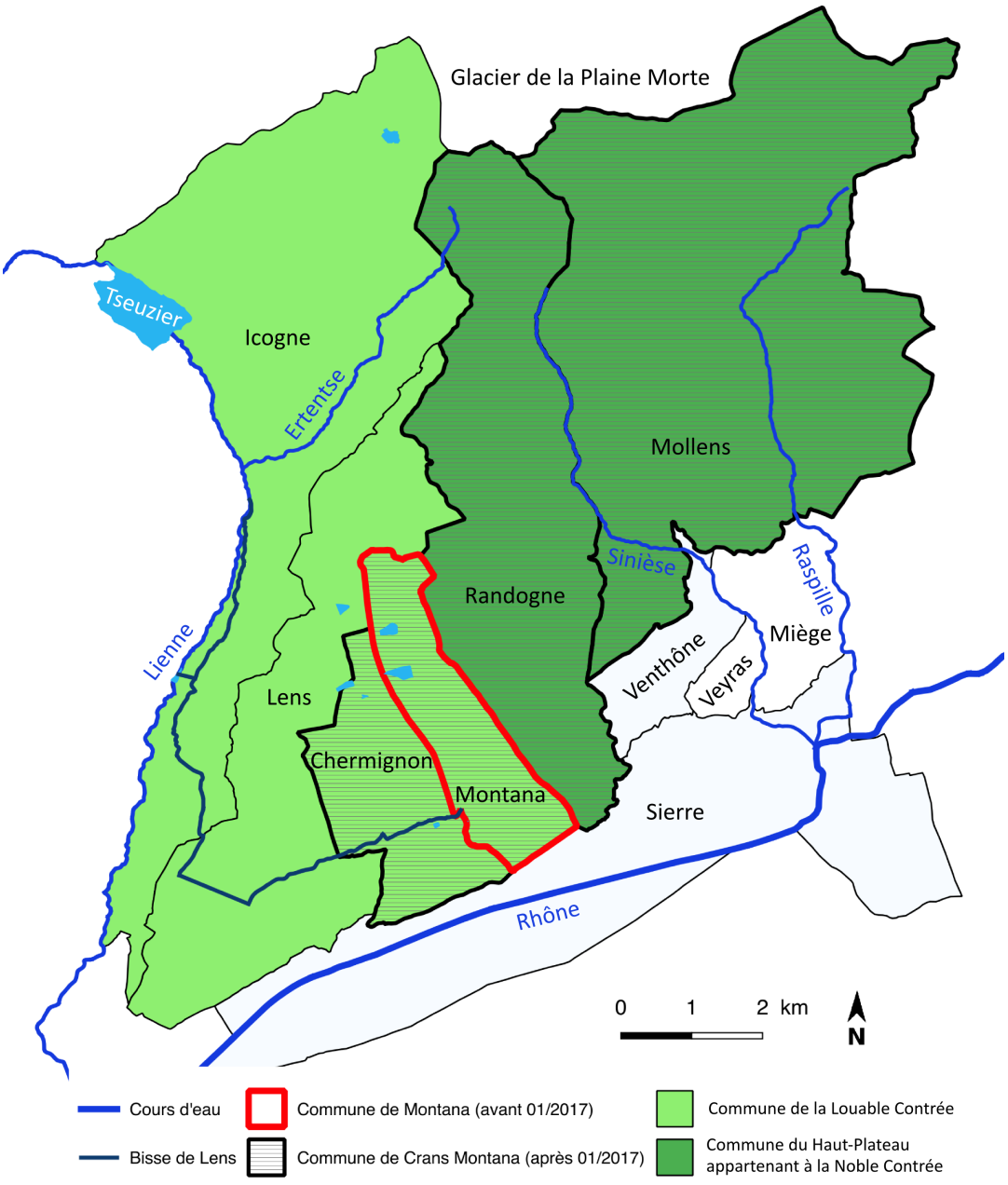


FIGURE 3.11 – Contours administratifs de la région de Crans-Montana-Sierre.

Historiquement, Randogne et Mollens ont formé, avec les communes actuelles de Sierre, Veyras, Venthône et Miège, la *Contrée de Sierre*, mentionnée dès le 14^e siècle. Peu à peu, cette grande communauté a détendu ses liens et des revendications séparatistes apparaissent durant la seconde moitié du 19^e siècle (CONNE 1991). Malgré tout, les cinq communes du versant (hormis Sierre) gardent un certain nombre de liens politiques et sociaux au sein de la Grande Bourgeoisie de la Noble Contrée (Fig. 3.11). A l'ouest du Haut-Plateau, les quatres communes de Montana, Chermignon, Lens et Icogne ont un passé commun au sein de la Louable Contrée, aussi appellée *Contrée de Lens*, ou *Ancien Lens*. Ces regroupements en Bourgeoisies sont en partie liés au besoin de gestion collective des canaux d'irrigation (les *bisses*) ainsi qu'à la gestion communautaire des forêts et des alpages. Après de nombreuses dissensions entre Lensards et Montanais, une consultation populaire approuve en 1899 la création de communes distinctes. C'est en 1904 que le Grand Lens est partagé de manière effective en quatre communes (Icogne, Lens, Chermignon et Montana), dont les territoires sont organisés en bandes nord-sud (REYNARD 2000b).

A l'ouest, les torrents de la Lienne et de l'Ertentse fournissaient (et fournissent toujours actuellement) les eaux de surfaces partagées par les communes de la Louable Contrée, via le bisse de Lens et le bisse du Roh, tandis qu'à l'est, les eaux de la Sinièse et de la Raspille sont partagées par les communes de la Noble Contrée. Cette organisation est-ouest du partage de la ressource en eau reste encore aujourd'hui très marquée dans la structure des réseaux d'adduction et de distribution de l'eau potable et de l'eau d'irrigation. Par ailleurs, depuis le début des années 2010, les communes du Haut-Plateau étudient la possibilité de relier ces deux régions sources par une canalisation sous pression. Le *projet Lienne-Raspille* permettrait alors de stocker les eaux de ces deux bassins versants en les redirigeant vers le barrage de Zeuzier (REY 2009).

Les communes formant des bandes verticales, elles disposent chacune des différents étages altitudinaux de végétation, avec les occupations du sol et les activités économiques correspondantes. Celles-ci forment le découpage vertical du territoire, correspondant aux étages bio-physiques décrites dans la section précédente. De bas en haut se retrouvent donc à Montana en particulier : le vignoble avec son hameau (Corin) à la base du coteau, proche de la plaine du Rhône, ensuite les prairies et cultures, entourant les villages historiques (Montana-Village), puis au dessus le Haut-Plateau avec l'actuelle station touristique (Crans-Montana) et enfin, aux plus hautes altitudes, les pistes de ski, les alpages et les crêtes. Le Haut-Plateau correspondait, avant le développement de la station touristique, à l'étage des mayens, c'est-à-dire les chalets intermédiaires occupés au printemps et en automne lors des transhumances vers les alpages d'altitude (REYNARD 2008). Au 19^e siècle, les champs de céréales ont disparu au profit des prairies, qui à leur tour, dès le milieu du 20^e siècle, sont progressivement remplacées par des parcelles bâties (à proximité des villages) et des parcelles de vigne, ou sont recolonisées par la forêt sur les terrains les moins accessibles. Parallèlement à cette déprise agricole, le nombre d'agriculteurs a fortement baissé depuis le milieu du 20^e siècle, ainsi que le cheptel bovin (Tableau 3.1 ; ARCALPIN 2010). Il ne restait en 2008 que 6 détenteurs de bovins, contre 94 en 1946. A l'heure actuelle (2017), il ne subsiste qu'un seul agriculteur-éleveur professionnel. Dans le vignoble de Corin, on dénombre aujourd'hui 7 viticulteurs-encaveurs (professionnels) et une dizaine de vignerons amateurs.

	1946	2008
Détenteurs de bovins (nb)	94	6
Cheptel bovin total (UGB)	220	38
Surface fouragère (ha)	132	88
Cultures (ha)	45	9
Vignes (ha)	30	50

TABLEAU 3.1 – Montana : évolution de l'exploitation agricole (1946-2008).
Source des données : ARCALPIN (2010).

Les querelles historiques dont témoignent la succession des fusions et séparations des communes des Louable et Noble Contrées se ressentent également au niveau de la planification territoriale. En raison du découpage communal, le manque de coordination a longtemps prévalu depuis le début du 19^{e} siècle, causant des difficultés pour le développement touristique et la gestion de l'eau et des infrastructures à l'échelle du Haut-Plateau. Dès 1892, chaque commune a ainsi développé son propre domaine skiable et sa propre station touristique. Crans-sur-Sierre, à l'ouest (communes de Lens et Chermignon) était plutôt tournée vers le tourisme sportif, destiné à une clientèle aisée, tandis que Montana-Vermala, à l'est (communes de Montana, Randogne), se consacrait au tourisme de cure, favorisé par le climat de la région (ensoleillement important, air sec ; REYNARD 2000a). Du point de vue de la gestion de l'eau, le manque de coordination intercommunale est également illustré par le fait que Lens, Chermignon et Montana partagent les mêmes ressources en eau (via le tunnel du Mont Lachaux qui débouche sur la commune de Lens), mais elles ont chacune leur station de potabilisation (dont celle de Chermignon, située sur la commune de Lens...).

Le tunnel du Mont Lachaux a été construit en 1946 par les quatre communes de l'Ancien Lens (Icogne, Lens, Chermignon, Montana) pour remplacer le Bisse du Roh, dont certaines parties suspendues étaient dangereuses et difficiles à entretenir. Dans le tunnel transitent les eaux de surface de l'Ertentse (destinées à l'irrigation) ainsi que les eaux de source, provenant du même vallon (pour l'eau potable). Le tunnel débouche au lieu dit Plans Mayens, où un répartiteur partage les eaux entre les communes de l'Ancien Lens (REYNARD 2000b). Arrivées sur la commune de Montana, les eaux de surface sont stockées dans les lacs Grenon et Moubra.

En 1957, la construction du barrage hydroélectrique de Zeuzier dans la haute vallée de la Lienne va, lui aussi, modifier le système de gestion de l'eau sur le Haut-Plateau. En effet, la commune de Lens construira en 1969 une conduite reliant le barrage au répartiteur de Plans-Mayens, via le tunnel du Mont-Lachaux. Les communes de l'Ancien Lens peuvent acheter cette eau brute à l'exploitant du barrage en cas de pénurie. Les communes de Chermignon et Montana n'ayant pas participé au financement de la conduite, elle doivent en plus s'acquitter d'une taxe de droit de passage à la commune de Lens (REYNARD 2000a).

Dans le courant des années 1970, la mise sous tuyau du réseau d'irrigation de Montana (vignoble, prairies) et le passage à l'arrosage par aspersion marquent la fin de l'irrigation par ruissellement.

Un premier pas de regroupement des communes s'opère en 1997 avec la fusion des offices de tourisme. Les stations de Crans-sur-Sierre et Montana-Vermala fusionnent et prennent le nom de Crans-Montana. En 1999, les sociétés de remontées mécaniques fusionnent à leur tour. Depuis janvier 2017, suite à une votation populaire, les communes de Chermignon,

Montana, Randogne et Mollens fusionnent pour former la nouvelle commune de Crans-Montana. Cette décision intervient quelques années après que les citoyens de Lens aient refusé par votation populaire le principe d'une fusion comprenant l'ensemble des communes de la Louable Contrée. La commune d'Icogne n'a pas non-plus répondu positivement au projet de fusion. A l'heure actuelle, en 2018, les services techniques en charge de l'eau des anciennes communes de Chermignon, Montana, Randogne et Mollens ont aussi fusionné pour former le service de l'eau de la nouvelle commune de Crans-Montana. Malgré tout, les infrastructures et les règles de partage de l'eau à Montana sont restées identiques à la configuration historique, où le partage des ressources en eau du vallon de l'Ertentse s'organise entre les communes de l'Ancien Lens.

Du point de vue démographique, suite au développement de la station de Crans-Montana, la commune de Montana présente aujourd'hui durant les hautes saisons touristiques (hiver et été) un nombre important de résidents temporaires et de visiteurs en comparaison de la population permanente (Tableau 3.2). La population permanente est de 2'386 habitants, pour une capacité d'accueil touristique trois fois supérieure (estimée à 7'370 lits). Cette capacité d'accueil correspond à l'estimation du nombre de lits touristiques totaux (hôtellerie, parahôtellerie, établissements de cure, écoles internationales) à saturation du plan d'aménagement de zone (ARCALPIN 2008).

Résidents permanents	2'386 (OFS, 2016)
Résidents non permanents	152 (OFS, 2016)
Capacité d'accueil (lits touristiques)	7'370 (ARCALPIN 2008)

TABLEAU 3.2 – Montana : démographie et capacatié d'accueil touristique.

Usages de l'eau à Montana

Usages de l'eau

Bien que représentatifs des territoires de montagne et présents sur le Haut-Plateau, les usages de l'eau pour la production d'hydroélectricité (barrage de Zeuzier) et de neige artificielle sont effectués en dehors de la commune de Montana. Dans la haute vallée de la Lienne, le barrage de Zeuzier, ainsi que la conduite forcée et la centrale hydroélectrique intermédiaire sont situés sur la commune d'Icogne. La centrale hydroélectrique principale se situe au niveau de la plaine, sur la commune de St-Léonard. La neige artificielle produite par la société de remontées mécaniques de la station de Crans-Montana prèlève l'eau directement dans le lac artificiel de Chermignon (commune de Lens) et possède également ses installations de pompage à Lens. Une part négligeable du linéaire des pistes de ski de Crans-Montana équipées de canons à neige se situent sur la commune de Montana. Pour cette raison, l'usage de la neige artificielle ne sera pas abordé ici (voir BONRIPOSI 2013). De plus, la production de neige artificielle, sujet sensible s'il en est (et visible contrairement aux conduites enterrées) est déjà largement traité dans la littérature scientifique (PACCARD 2010; MAGNIER 2013). L'irrigation du golf de Crans-Montana est également un usage de l'eau prépondérant sur le Haut-Plateau, mais ce dernier se situe sur les communes de Lens et Chermignon. L'eau utilisée pour arroser les parcours de golf provient également du lac artificiel de Chermignon (BONRIPOSI 2013).

Les usages de l'eau principaux à Montana sont les diverses utilisations faites de l'eau potable et l'irrigation. Au niveau de la région de Crans-Montana-Sierre, ces usages représentent aussi les deux plus importantes demandes en eau en termes de volumes annuels (REYNARD et BONRIPOSI 2012). Les volumes d'eau potable ne sont relevés qu'une fois par an au niveau des apports, au moment des facturations. Au niveau de la distribution de l'eau potable, des données journalières sont récoltées par les services techniques communaux, mais elle ne permettent pas de décrire la répartition spatiale des usages. Par contre, pour les usages d'irrigation, aucune mesure n'est effectuée. Pour ces raisons, le focus sera mis dans cette thèse sur la quantification des usages de l'eau potable et d'irrigation.

Les usages de l'eau potable sont principalement domestiques, effectués par la population (permanente et temporaire) dans les différentes agglomérations de la commune : Montana-Station, Montana-Village, Diogne et Corin. Les usages domestiques vont de la boisson à la cuisson des aliments, en passant par l'hygiène corporelle (douches, bains), la vaisselle et éventuellement le remplissage de spas ou jacuzzis. Les compteurs d'eau domestique en assurent le comptage, effectué à l'échelle annuelle et servant de base pour la facturation (Fig. 3.12). D'autres usages de l'eau potable sont effectués par les infrastructures de loisirs (piscines, thermes, salles de sport), pour l'irrigation des pelouses et jardins (uniquement dans la station) et par de petites exploitations agricoles (caves viticoles, fromageries).

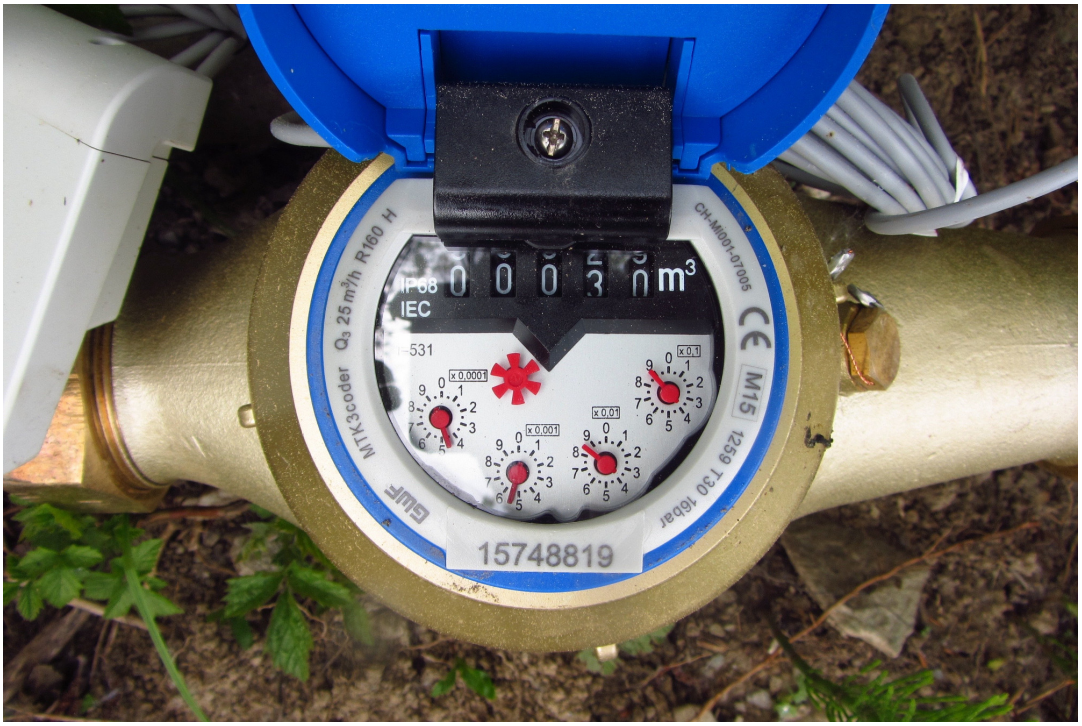


FIGURE 3.12 – Exemple de compteur d'eau potable domestique à Montana.
Ce modèle-ci donne un index volumique avec une résolution d'un litre.

Les usages de l'eau d'irrigation sont principalement destinés à l'arrosage des prairies de fauche, des pâtures, du vignoble, des jardins privés et des espaces verts publics (Fig. 3.13), là où le réseau d'irrigation communal est accessible (c'est-à-dire en contre bas de la station). L'irrigation se fait principalement par aspersion, à l'aide de systèmes de gicleurs fixes ou portatifs. Certaines parcelles de vignes sont irriguées avec un système de goutte-à-goutte, mais cela reste encore très marginal.

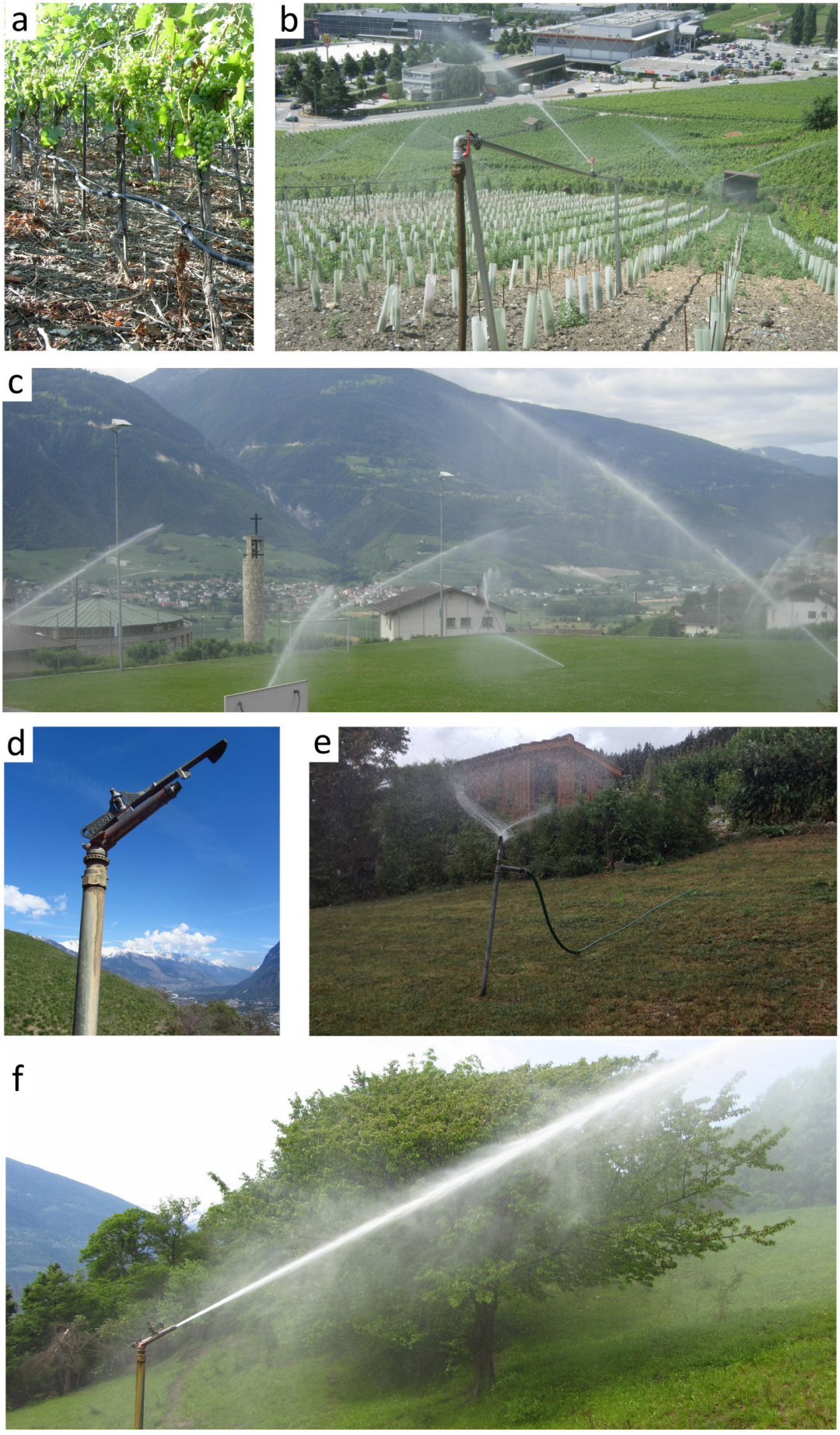


FIGURE 3.13 – Exemples de systèmes d'irrigation à Montana : goutte-à-goutte (a) et aspersion de jeunes vignes (b) à Corin, aspersion du terrain de foot de Corin (c), gicleur fixe pour l'irrigation des prairies de Diogne (d,f) et gicleur mobile pour l'irrigation des prairies à Montana-Village (e).

Des usages *in-situ* de l'eau sont égalememt effectués à Montana. Les loisirs nautiques en sont un exemple, avec les locations de pédalo sur le lac Grenon, ou la pêche et la baignade sur le lac de la Moubra.



FIGURE 3.14 – Usages de l'eau *in-situ* sur le lac de la Moubra.

Citons enfin les usages immatériels de l'eau qui peuvent être recensés sur la commune de Montana. Un exemple est l'eau comme paysage, avec les lacs et les bisses du Haut-Plateau et la réhabilitation de la fin du Bisse du Ro au niveau de la station.

Ressources en eau et modalités de gestion

Deux types de ressources sont prélevées pour alimenter les communes du Haut-Plateau : les eaux de surface (*eau brute*), principalement destinées à l'irrigation et les eaux de source, principalement destinées à la distribution de l'eau potable. Cette distinction n'est pas aussi binaire pour l'eau potable car la commune de Montana a la possibilité de potabiliser l'eau brute.

Sur l'interfluve formé par le Haut-Plateau et les coteaux de Crans-Montana, peu de sources pouvant servir à l'eau potable y sont présentes. En outre, les torrents de cette zone sont de petite taille et à régime nivo-pluvial (Fig. 3.10) : ils ne permettent pas de soutenir les demandes en eau d'irrigation estivales car à cette période (juillet-août) ils sont en étiage. C'est dans les hauts bassins versants de la Lienne et de l'Ertentse que se trouve la plus grande part des ressources en eau pour les communes de l'Ancien Lens, avec le captage des eaux de surface de l'Ertentse et les sources de l'Er de Lens (Fig. 3.15). L'adduction de ces eaux vers le Haut-Plateau se fait via le tunnel du Mont-Lachaux. Plus en aval du bassin versant sont effectués deux captages dans les eaux de surface de la Lienne, assurant l'alimentation du Bisse de Lens.

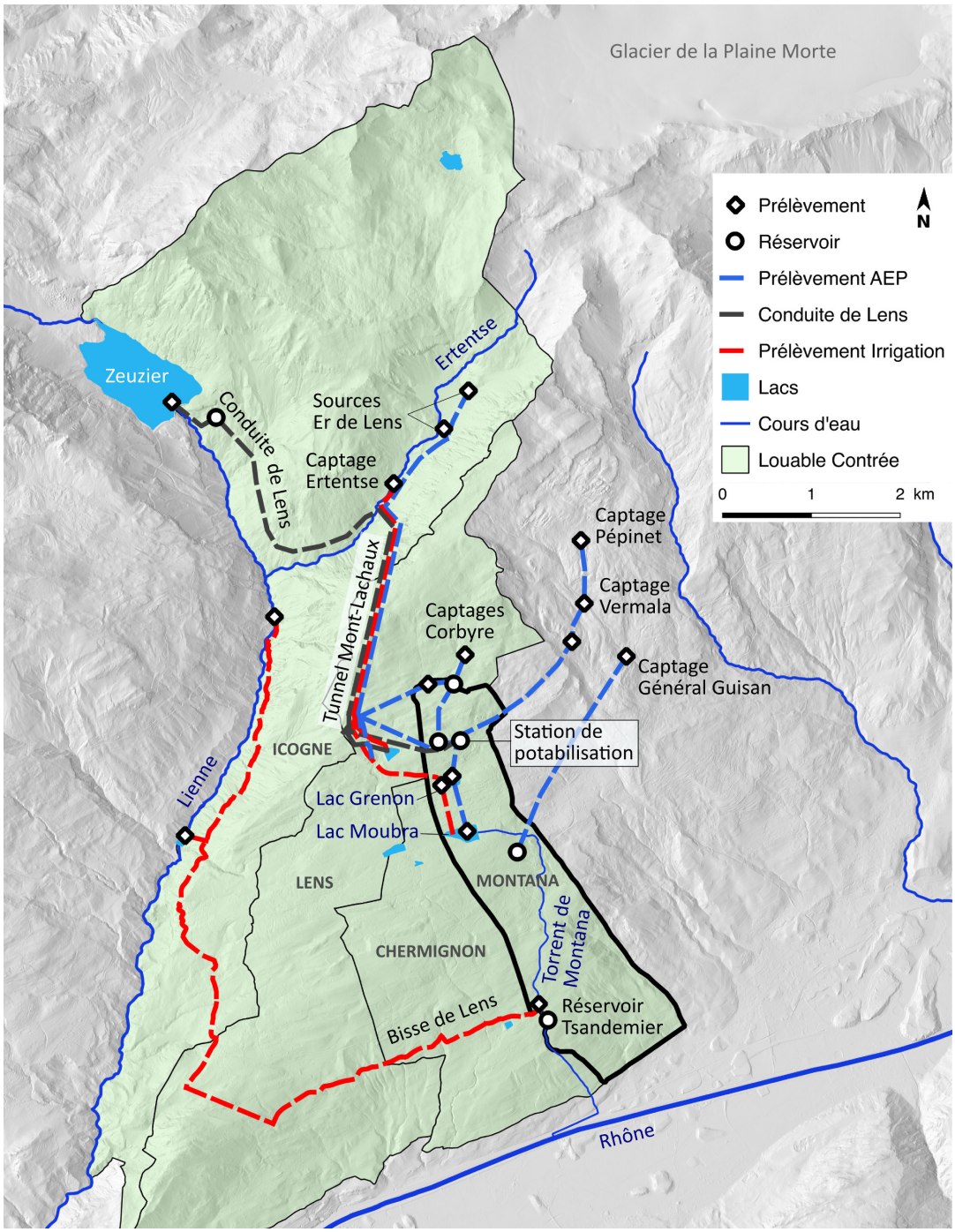


FIGURE 3.15 – Prélèvements effectués par la commune de Montana : eaux de source et eaux de surface.

Dans la Louable contrée, les communes 'riches en eau' sont donc Icogne, dont les eaux de la Lienne se situent sur son territoire, et Lens, dont l'arrière pays en altitude comprend une partie du versant du bassin de la Lienne (voir Fig. 3.10). Les communes de Chermignon et Montana, situées sur le coteau, sont les communes 'pauvres en eau' car elles n'ont pas accès aux vallées latérales où se situent sources et torrents de régime nivo-glaciaire. La majorité des ressources en eau de Montana sont donc prélevées en dehors de son territoire.

La gestion de l'eau à Montana s'effectue au niveau communal. Le service des eaux fait partie des services techniques communaux ; il emploie deux techniciens et deux ingénieurs

(état 2017, avant la fusion des communes). Leur mission consiste en la surveillance et la maintenance de la station de potabilisation et des réservoirs d'eau d'irrigation, la réparation des fuites de canalisation, le remplacement et la relève des compteurs d'eau, l'ouverture et la fermeture saisonnière du réseau d'irrigation.

Le système technique d'infrastructures (prélèvements, approvisionnements en eau) est organisé selon deux réseaux séparés : l'un pour l'eau potable, l'autre pour l'irrigation.

Le réseau d'eau potable

Ressources : 1/4 des eaux des captages de l'Er de Lens dans le vallon de l'Ertentse sont destinées à Montana, via le tunnel du Mont-Lachaux (voir Fig. 3.15). Ces eaux représentent la source principale de la commune. Quelques petites sources sont également prélevées ; elles sont situées hors des limites de la commune (sources de Corbyre, Général Guisan, Vermala et Pépinet).

Traitement : La station de potabilisation communale, située sur les hauts de la station touristique, assure le traitement des eaux avant distribution. L'eau traitée est stockée dans un réservoir adjacent. En cas de besoin, les eaux de surface des lacs Grenon et Moubra peuvent être re-pompées jusqu'à la station de potabilisation pour être traitées. Egalement, les eaux du barrage de Zeuzier, amenées via la conduite du tunnel du Mont-Lachaux peuvent être achetées à la société hydroélectrique (Lienne SA) pour être à leur tour traitées en eau potable. Ces deux ressources 'de secours' d'eau brute justifient l'installation d'une station de potabilisation par la commune.

Distribution : La distribution se fait par gravité, dans un réseau de conduites sous pression qui desservent les agglomérations de la commune : Montana-Station, Montana-Village, Diogne et Corin. En raison de la déclivité importante du réseau de distribution, des vannes coupe-pression sont installées à altitudes régulières pour abaisser la pression dans le réseau.

Tarification : La tarification de l'eau potable se fait au volume et est binomiale, c'est-à-dire qu'elle est composée d'une partie fixe, ou redevance annuelle d'abonnement, et d'une partie variable, constituée du volume apporté (en m^3), mesuré par les compteurs d'eau. Chaque immeuble est équipé d'un compteur. Dans le cas d'habitations collectives, un seul compteur mesure l'ensemble des logements. La relève des compteurs pour facturation se déroule une fois par an, via un système de télé-relève : les compteurs sont équipés d'une antenne radio qui permet de faire le relevé à distance des index depuis la voie publique. De cette manière, la relève de l'ensemble des compteurs de la commune peut se faire en une semaine par le technicien du service des eaux.

Le réseau d'irrigation

Ressources : Entre le 15 avril et le 1er octobre, 1/4 des eaux de surface du captage de l'Ertentse (via le tunnel du Mont-Lachaux) sont destinées à la commune de Montana. Une fois arrivée sur le territoire communal, ces eaux sont stockées au niveau du Haut-Plateau dans le lac Grenon qui est lui-même connecté au lac de la Moubra, situé en contre bas de la station. Le Bisse de Lens, finissant sa course dans la commune en bas du hameau de Diogne, apporte également une part importante des eaux d'irrigation.

Le bisse se jette dans le torrent de Montana (formant la limite communale entre Chermignon et Montana), dans lequel un prélèvement est effectué un peu plus en aval pour remplir le réservoir d'irrigation de Tsandemier (voir Fig. 3.15). Ce réservoir est lui-même connecté au réseau d'irrigation de Montana et est essentiellement destiné à soutenir l'irrigation du vignoble de Corin, situé en contre bas.

Traitement : Il n'y a pas de traitement proprement-dit de l'eau brute. Un dessablage est toutefois effectué au niveau des prélèvements dans les torrents.

Distribution : Le réseau de distribution d'eau d'irrigation démarre par un prélèvement dans le lac de la Moubra. Pour cette raison, les usages d'irrigation au niveau de la station, plus en amont, se font via le réseau d'eau potable. Le réseau de distribution descend vers les hameaux de Montana-Village et Diogne pour alimenter les pâtures, prairies, jardins et espaces verts publics. Arrivé au niveau de Corin, il distribue l'eau destinée au vignoble.

Tarification : La tarification de l'eau d'irrigation se fait non pas au volume, mais à la surface des parcelles concernées. Chaque propriétaire possédant une parcelle à irriguer paie annuellement une taxe fixe et un montant proportionnel à la surface irrriguée. Il n'y a donc pas de compteur d'eau sur le réseau d'irrigation de Montana, que ce soit au niveau des prélèvements dans les lacs et réservoirs, ou au niveau de la distribution.

3.1.2 Megève

Introduction

La commune de Megève se situe à l'est de la France, dans le département de Haute-Savoie. Le village du même nom est une des stations touristiques historiques des Alpes françaises. Son essor remonte aux années 1910 et est étroitement lié à la volonté de la baronne Maurice de Rotschild de créer en France une station de ski de renommée équivalente à la station suisse de St-Moritz (BALSEINTE 1959). Elle est bâtie sur un col qui sépare la vallée de l'Arve, au nord (avec les villes de Sallanches, Chamonix, Genève) et la vallée de l'Arly, au sud, qui débouche sur Albertville et la vallée de l'Isère (Fig. 3.1 et 3.16). De par sa configuration de col, en bordure sud-ouest du Massif du Mont-Blanc, et par son altitude générale élevée (la cote la plus basse de la commune est à 1100 m), le climat de Megève est plus frais et plus humide qu'en Valais Central. L'irrigation n'est pour cette raison par nécessaire pour les surfaces agricoles mégevannes. Les usages principaux de l'eau sur la commune sont liés à l'eau potable et à la production de neige artificielle.

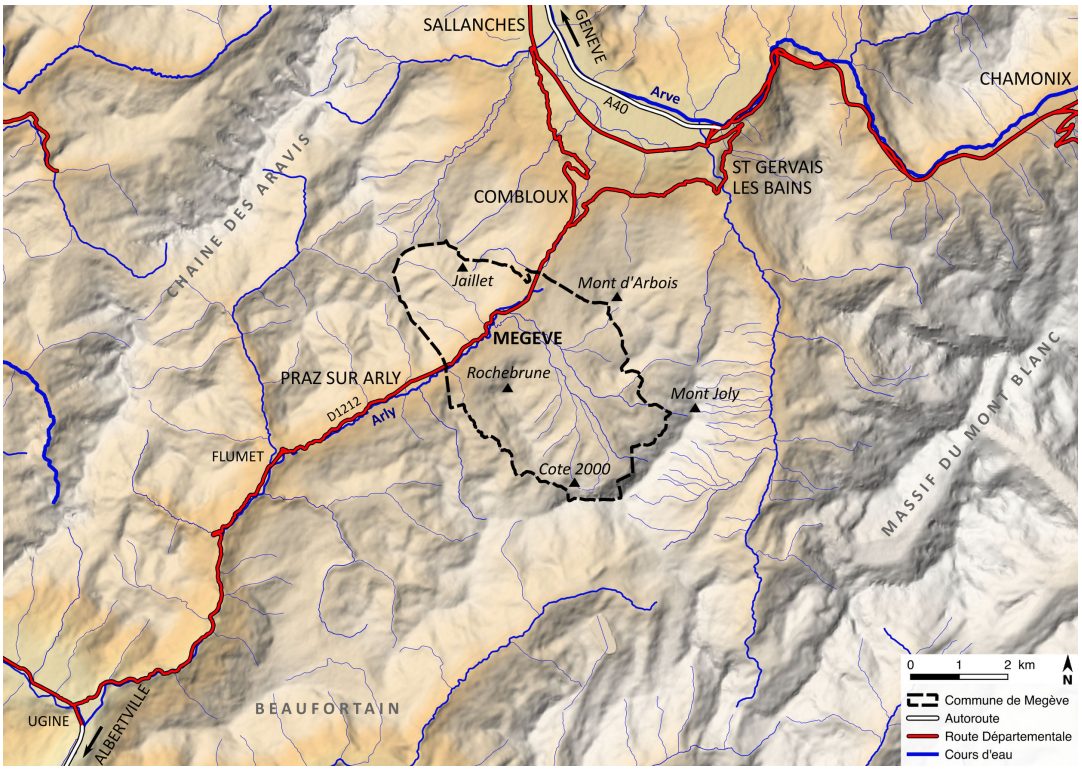


FIGURE 3.16 – Relief autour de la commune de Megève.

Megève a été choisie comme second cas d'étude pour cette recherche car un travail de thèse sur la gestion intégrée de l'eau a précédemment été effectué sur la commune (LEROY 2015). Ce projet a abouti à la création d'un modèle recréant les demandes en eau de l'ensemble des usages présents sur la commune, le but étant de produire des scénarios d'équilibre ressource-demande en faisant évoluer les paramètres climatiques et de donner des réponses quant à la sécurité hydrique future de la station. Malgré tout, ce modèle se base sur les données d'usages de l'eau disponibles actuellement et leurs résolutions temporelle et spatiale se sont parfois montrées insuffisantes, en particulier pour l'eau potable et les données de population temporaire. C'est pourquoi dans cette recherche, les usages de l'eau potable de Megève feront l'objet d'un monitioring à haute résolution afin d'obtenir des séries de données d'usage représentatives du territoire. Le choix de Megève se justifie également par la présence de sa station touristique, induisant des demandes en eau potable présentant une forte saisonalité.

Du point de vue de la gestion de l'eau, le cas de Megève est moins complexe que celui de Montana, de par son climat ne nécessitant pas d'irrigation et surtout parce que l'entièreté des ressources en eau prélevées se situe à l'intérieur des limites communales.

Contexte bio-physique

Megève s'étend sur 44 km^2 et est considérée comme une station de ski de moyenne montagne avec des altitudes allant de 1100 m à 2500 m (LEROY 2015). La commune est située en bordure sud-ouest du massif du Mont-Blanc, dans le sillon qui sépare le Beaufortain nord-occidental des contreforts orientaux de la chaîne des Aravis (GIDON 2018 ; Fig. 3.16).

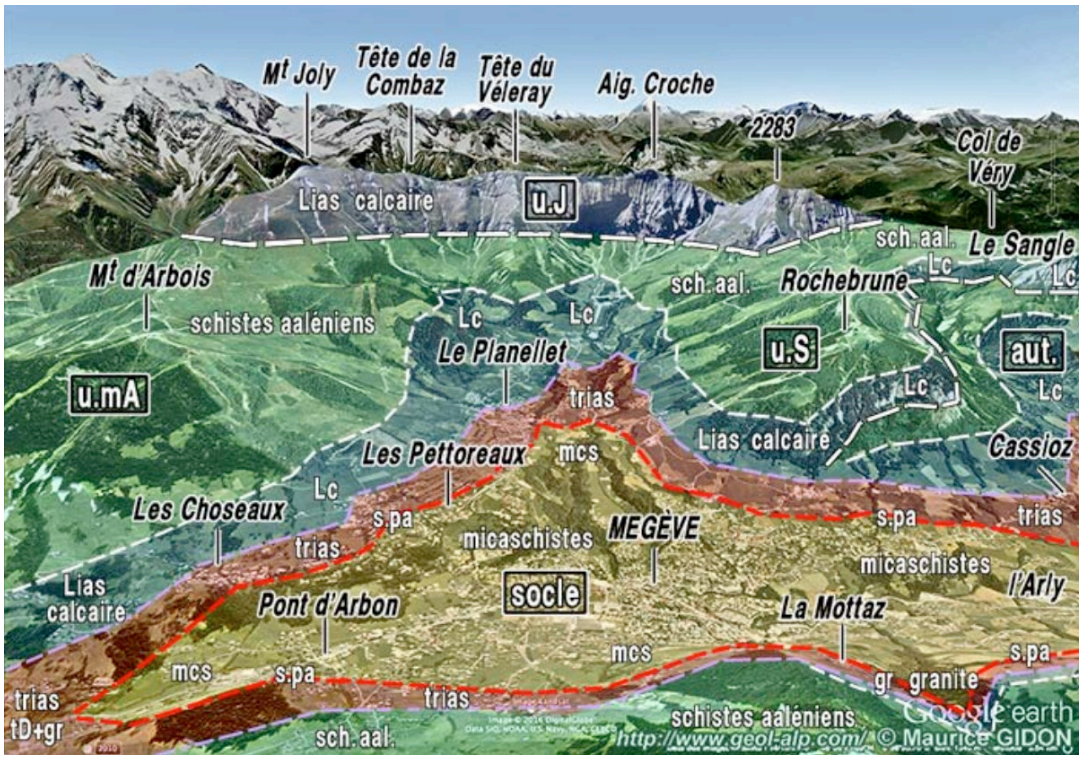


FIGURE 3.17 – Géologie de la dépression de Megève et ses bordures vues du nord. Image extraite du site GEOL-ALP (GIDON 2018).

Relief et géologie

Autour de Megève, les couches géologique sont disposées de façon sub-horizontale, comme s'il n'y avait là qu'une succession sédimentaire non déformée (GIDON 2018). L'érosion y a mis au jour le socle cristallin qui affleure dans une 'boutonnière' (où se situe la localité de Megève) cernée par les terrains sédimentaires (Fig. 3.17). Les pentes des montagnes qui encadrent cette dépression, les crêtes de Croise Baulet (comprenant le domaine skiable du 'Jaillet') à l'ouest et le chaînon du Mont Joly à l'est, sont assez douces car exclusivement formées de couches argilo-calcaires d'âge Jurassique inférieur (Lias) à moyen (Dogger) (Fig. 3.18).

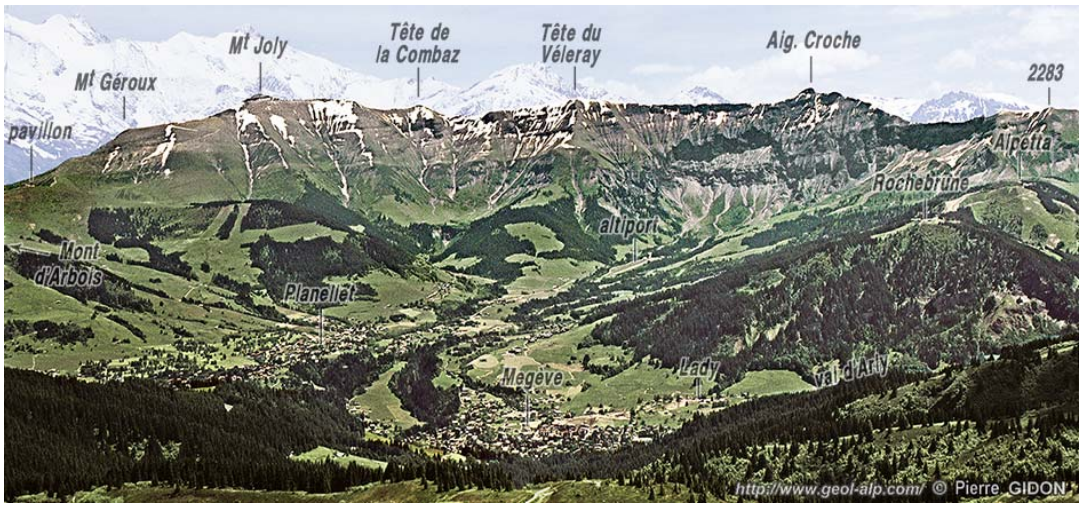


FIGURE 3.18 – La dépression de Megève, vue du nord-ouest, depuis Croise Baulet. En arrière plan, le massif du Mont Blanc. Image extraite du site GEOL-ALP (GIDON 2018).

Cette situation de faible pente a par exemple permis l'installation d'un altiport sur le replat situé en contrebas du Mont Joly. Les domaines skiables se déploient sur les deux versants, de part et d'autre du col où se loge la station touristique (Fig. 3.16). Les sommets principaux du domaine skiable sont, à l'est, Rochebrune (1755 m), le Mont d'Arbois (1780 m), la Cote 2000 (2000 m), le Mont Joly (2500 m) et à l'ouest, le Jaillet (1570 m).

Contexte climatique général

De par son altitude et sa situation en bordure ouest des Alpes, exposée aux masses d'air atlantiques, Megève possède un climat montagnard caractérisé par des hivers froids et des étés frais et humides. Ces caractéristiques se retrouvent bien dans le climatogramme de la station météorologique de Combloux (située à 1183 m et à 5 kilomètre au nord de Megève : Fig. 3.19) avec des températures moyennes hivernales en-dessous de 0 ˚C. Les mois de mai, juin et juillet sont particulièrement pluvieux et décembre est la période recevant la plus grande part des précipitations, souvent sous forme de neige. Les précipitations annuelles sont donc assez abondantes, avec un cumul moyen de 1497 mm.

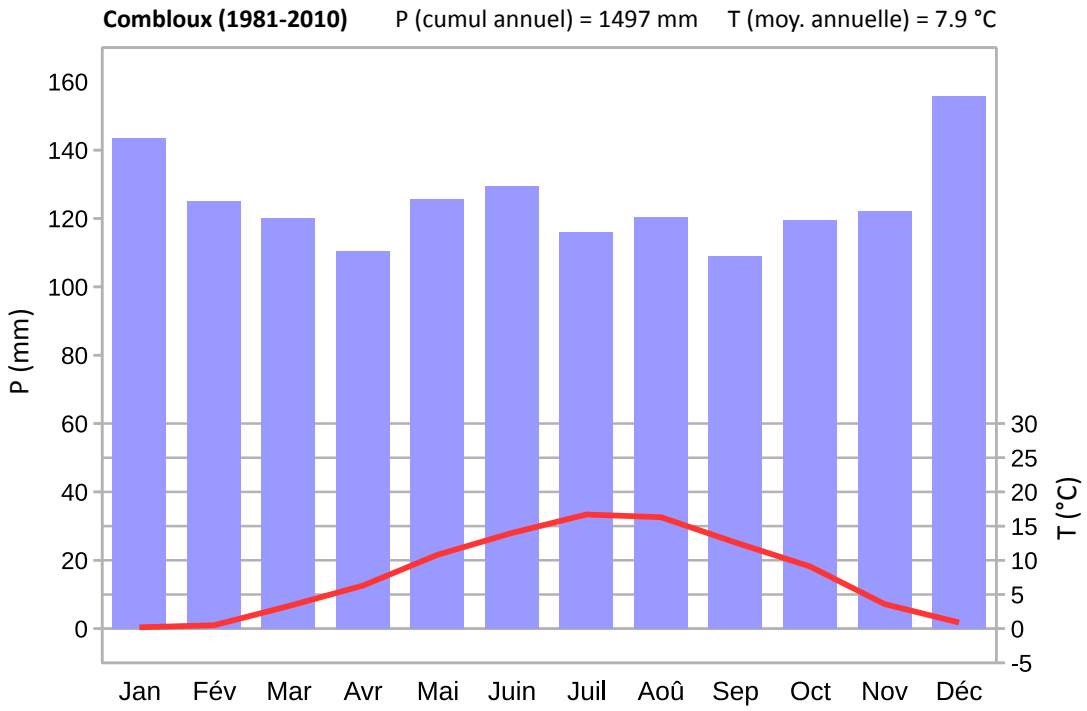


FIGURE 3.19 – Climatogramme de la station météorologique de Combloux (1183 m) sur la période 1981-2010. Données : MétéoFrance.

Conditions climatiques durant les trois années d'études

En comparaison de la situation continentale de Montana, le climat montagnard de Megève a offert des conditions météorologiques légèrement moins contrastées entre les trois années étudiées : 2015, 2016, 2017 (Fig. 3.20).

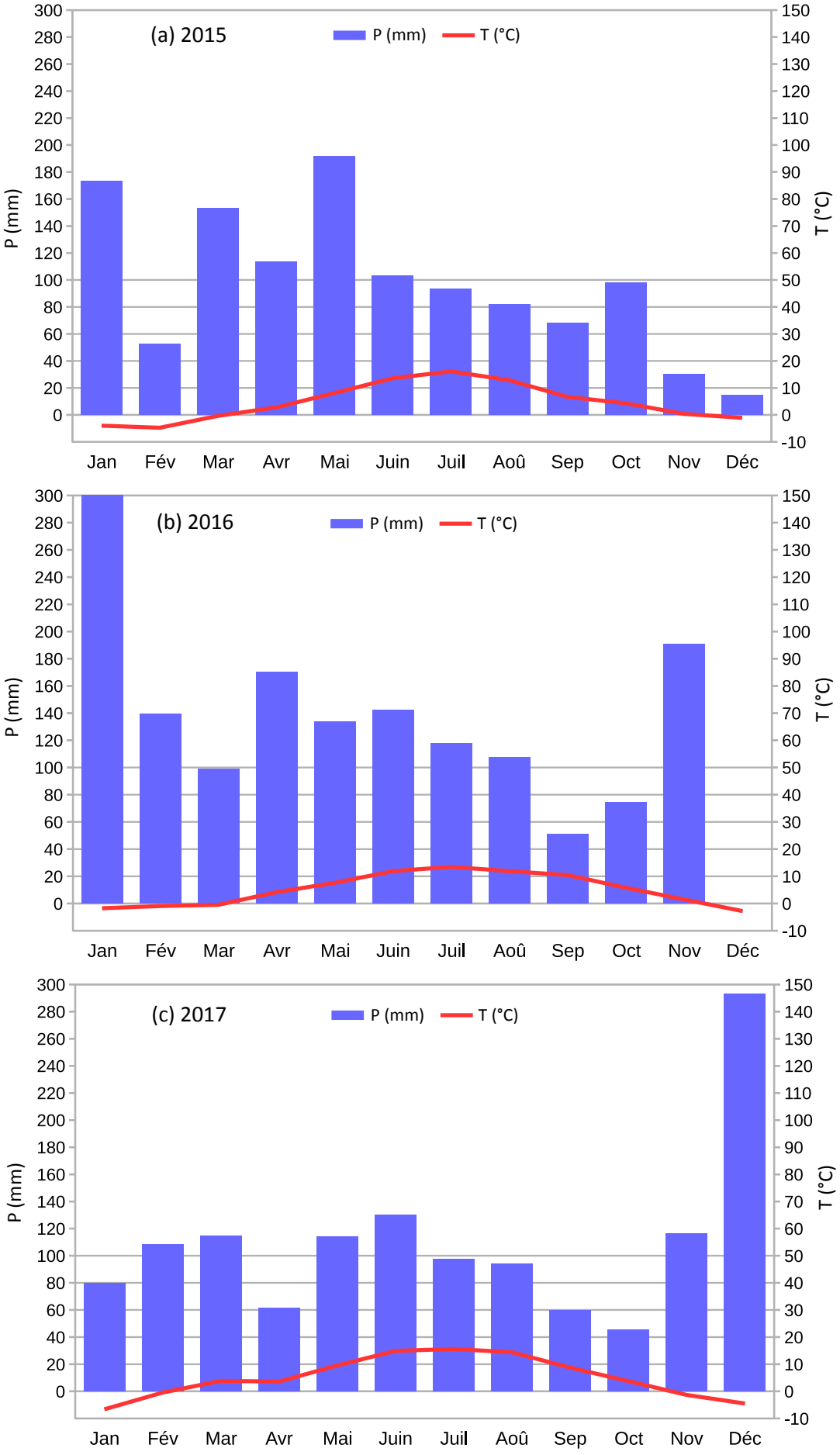


FIGURE 3.20 – Cumuls de précipitations et températures moyennes mensuelles à la station de Megève (1080 m) en 2015 (a), 2016 (b) et 2017 (c). Données MétéoFrance.

La figure 3.21 synthétise les écarts de températures et précipitations mensuelles de 2015, 2016 et 2017 par rapport à la moyenne de ces trois années[1]. Comme pour Montana, les tons bleus indiquent des valeurs relativement humides ou fraîches vis-à-vis de la moyenne, alors que les tons verts indiquent des valeurs relativement sèches ou chaudes.

		Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc
2015	T (°C)	0.1	-2.7	-1.4	-0.7	-0.3	0.1	1.0	-0.2	-1.9	-0.3	0.2	1.7
	P (mm)	-11	-48	31	-2	45	-22	-10	-12	8	25	-82	-88
2016	T (°C)	2.4	1.1	-1.5	0.7	-0.8	-1.6	-1.6	-1.2	1.8	1.2	1.3	0.0
	P (mm)	116	39	-23	55	-13	17	15	13	-9	2	78	-103
2017	T (°C)	-2.5	1.6	2.9	0.1	1.1	1.5	0.6	1.3	0.1	-0.9	-1.5	-1.7
	P (mm)	-105	8	-8	-54	-33	5	-5	-1	0	-27	4	190

T (°C)	-3	-2	-1	0	1	2	3	**Ecarts à la moyenne 2015-17**
P (mm)	60	40	20	0	-20	-40	-60	

FIGURE 3.21 – Ecarts de précipitations et températures mensuelles par rapport à la moyenne 2015-2017. Données MétéoFrance.

L'année 2015 a débuté par un mois de février remarquablement sec et froid par rapport à la moyenne 2015-16 (Fig. 3.21). Après un mois de mai relativement pluvieux, l'été n'a pas été marqué comme à Montana par une canicule prononcée. Bien que la température moyenne de juillet ait été d'un degré au dessus de la moyenne 2015-17, les valeurs (16 ˚C ; Fig. 3.20a) sont restées relativement fraîches par rapport aux températures observées en plaine cette année-là. Comme à Montana, les mois de novembre et décembre ont été exceptionnellement secs, et le mois de décembre très doux. La neige naturelle à manqué sur les pistes pour les fêtes de fin d'année. De plus, les températures ont été trop élevées pour pouvoir faire fonctionner efficacement les canons à neige.

L'hiver s'est finalement installé en 2016 par un mois de janvier extrêmement enneigé, avec 301 mm de précipitations cumulées. Par contre, les températures, tout juste négatives, ont été très douces par rapport à la moyenne 2015-17 et la situation s'est prolongée en février avec une température moyenne de -0.9 ˚C (Fig. 3.20b). Comme à Montana, le printemps a été relativement humide, particulièrement au mois d'avril (170 mm). L'été qui a suivi a montré des températures relativement fraîches, avec des précipitations proches des normes. Ensuite, après un début d'automne doux, le mois de novembre a été marqué par une offensive hivernale précoce, avec un épisode neigeux important (191 mm au total sur le mois). Par contre, comme à Montana, le mois de décembre qui s'en est suivi a été marqué par une remarquable absence de précipitations et des températures douces pour la période. Ces conditions anticycloniques, similaires à celles de décembre 2015, ont à nouveau conduit à un début de saison touristique hivernale sans neige dans la station de Megève.

L'arrivée de l'hiver et de la neige s'est produite en janvier 2017, avec des températures moyennes de -4.5 ˚C et 80 mm de précipitations (la situation reste cependant relativement sèche et froide par rapport aux deux années précédentes et aux normes mesurées à la station

[1]La station MétéoFrance de Megève, destinée aux mesures nivologiques, a été installée trop récemment pour pouvoir définir une norme climatologique. La station la plus proche pouvant fournir une norme est Bourg-Saint-Maurice, mais celle-ci est située en fond de vallée, ce qui la rend difficilement comparable avec Megève.

de Combloux). Les mois de février et mars ont été arrosés, mais exceptionnellement doux avec respectivement -0.5 et 3.9 ˚C de moyenne. Mars a même été plus chaud que le mois d'avril cette année-là (3.6 ˚C). La fin du printemps a également montré des températures élevées par rapport à la moyenne 2015-17 (+ 1.5 ˚C en juin). L'été a été particulièrement chaud au cours des mois de juin et août. La fin d'année 2017 a été cette fois marquée par des mois de novembre et décembre à caractère hivernal, avec des précipitations neigeuses particulièrement importantes en décembre (293 mm).

Hydrologie

L'accumulation de neige hivernale sur le haut bassin de l'Arly engendre un régime hydrologique de type nival à nivo-pluvial (Fig. 3.22). Les débits les plus importants s'écoulent d'avril à mai, soutenus par la fonte des neiges et un second pic de débits, bien moins marqué, se produit à la fin de l'automne (fin novembre, décembre). Ce régime entraîne donc en parallèle deux périodes d'étiage. Le premier étiage, le plus sévère, se produit entre août et novembre : le stock de neige est entièrement fondu en fin d'été et les pluies sont encore trop faibles pour soutenir les débits. Le second étiage s'étend de janvier à février et est essentiellement lié aux températures négatives : les précipitations se produisent sous forme solide et forment le stock de nei ge qui ne peut à ce moment pas alimenter les débits liquides. Ces deux étiages jouent un rôle important dans la gestion de l'eau de la station car ils se produisent justement aux périodes de fortes demande liés aux hautes saisons touristiques.

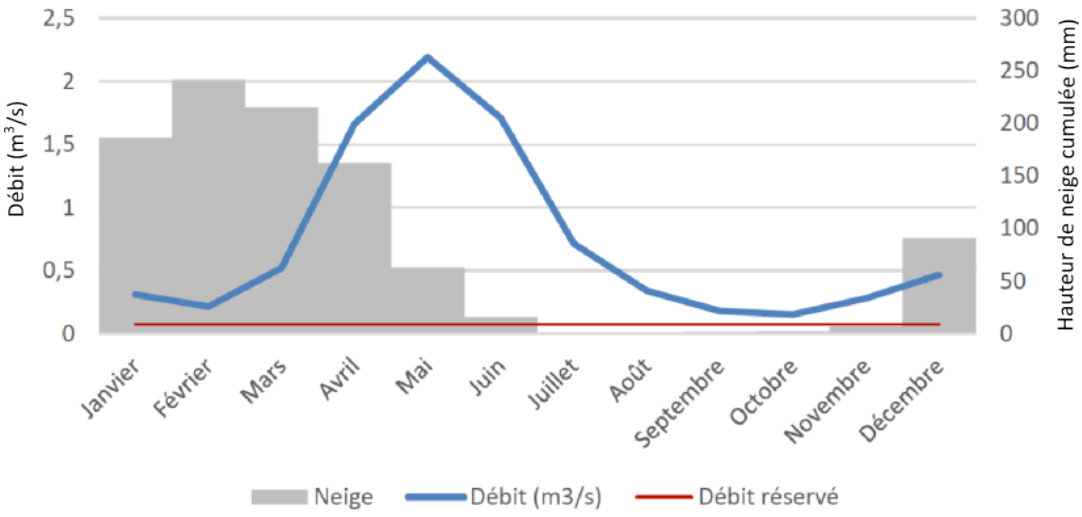


FIGURE 3.22 – Régime hydrologique à Megève : débits moyens annuels, hauteur moyenne de neige et débits réservés. Figure modifiée d'après LEROY (2015). Données : TENEVIA (2014).

Contexte géographique et historique

Les pentes douces et l'ensoleillement remarquable de Megève ont très tôt permis l'installation humaine et une agriculture florissante ainsi que, plus tard, le développement du tourisme (BALSEINTE 1959). Sa situation de col en fait également un lieu de passage important entre Savoie et Haute Savoie, reliant Sallanches et Albertville par la route des gorges de l'Arly (D1212). Dans cette région de tradition agro-pastorale, le territoire communal est en

grande partie constitué de prairies naturelles en pente douce, surmontées de forêts de sapins (AUVERGNE-RHÔNE-ALPES 2018). Comme dans la plupart des municipalités du massif alpin, la principale activité économique de Megève jusqu'au début des années 1950 était l'agriculture. La vie des alpins était rude, fortement marquée par les saisons et l'isolement hivernal (BALSEINTE 1959).

Très tôt, le tourisme se développe à Megève. La première mention relevée est en 1903, où Megève est désignée comme station climatique. On vante les bienfaits de l'air pur et un sanatorium est ouvert pour les enfants (AUVERGNE-RHÔNE-ALPES 2018).

Juste avant la première guerre mondiale, les premiers essors du ski se font à Megève. Un temps interrompu par la guerre, le développement de cette activité reprend pendant l'hiver 1919-1920 avec un tourisme très mondain, initié par la famille Rothschild qui décida d'en faire un de ses lieux de villégiature (BALSEINTE 1959). C'est à cette période que sont construits les premiers hôtels. Megève est en pleine essor à ce moment et voit sa population augmenter rapidement ainsi que le nombre de ses hébergements. En 1957, Megève possède déjà 100 km de pistes. Actuellement, la station garde une réputation associée à un lieu de villégiature orienté sur le haut de gamme (BOYER 1999). Elle disposait durant l'hiver 2014-2015 de 11'605 lits touristiques professionnels et de 26'201 lits diffus (logements individuels loués par des particuliers ou par des agences), ce qui donne un total de 37'806 lits touristiques (COMETE 2014).

Avec l'essor du tourisme, l'émigration de Mégevans vers les villes diminue et une forte immigration de travailleurs non Mégevans apparaît, faisant les navettes depuis les agglomérations de la vallée de l'Arve ou du val d'Arly. La population augmente donc rapidement. Elle est passée de 1750 habitants en 1911 à 5255 habitants en 1982 (source : INSEE, 2014). Depuis cette année, la population est en recul : avec l'augmentation du niveau de vie en station, les classes moyennes se voient de plus en plus contraintes de s'installer en plaine, pour la plupart dans l'agglomération de Sallanches. On compte actuellement (2014) 3'292 résidents permanents dans la commune (Tableau 3.3). En tant que station touristique fréquentée par une population aisée, Megève compte une très forte proportion de résidences secondaires qui se marquent dans le territoire par de grandes étendues d'habitat dispersé (de type chalets) en périphérie du village. Ce fort taux d'habitat temporaire, couplé aux 37'806 lits touristiques de la station (Tableau 3.3) induisent de fortes variations de population entre les hautes et basses saisons touristiques. En haute saison, en supposant que les résidences secondaires et les hôtels sont pleins, la population touristique totale est estimée à 48'000 personnes (BRANCHEREAU 2015).

Résidents permanents	3'292 (INSEE, 2014)
Nombre total de logements	9'372 (INSEE, 2014)
Part des résidences secondaires	78.3 % (INSEE, 2014)
Lits touristiques professionnels	11'605 (COMETE 2014)
Lits touristiques diffus	26'201 (COMETE 2014)
Total lits touristiques	37'806 (COMETE 2014)

TABLEAU 3.3 – Megève : démographie et capacatié d'accueil touristique.

Deux hautes saisons touristiques sont observées à Megève. La plus intense est la saison d'hiver, entre les fêtes de fin d'année et les vacances scolaires hivernales (de février à la mimars), où les activités principales sont les loisirs de neige. La deuxième période touristique est la saison d'été, durant les vacances scolaires de juillet et août, où les activités principales sont la randonnée, le vélo et d'une manière plus générale, l'attrait de la fraîcheur et des

paysages de montagne. Le tourisme d'été est une activité importante de Megève puisqu'il représente 40 % de la fréquentation touristique annuelle (COMETE 2014). Néanmoins, la clientèle d'été est en général de passage et les temps de séjour sont moins longs (LEROY 2015). De même, en hiver, un peu moins de la moitié des forfaits de ski vendus sont des forfaits à la journée et cette clientèle journalière locale ne reste généralement pas sur place.

Aujourd'hui, l'économie de Megève est majoritairement tournée vers les services liés à la station touristique, en comparaison de la place qu'a gardé l'agriculture : on compte seulement 21 entreprises agricoles sur 971 entreprises au total, d'après l'INSEE (données 2014) et 56 agriculteurs pratiquent l'élevage sur 4800 hectares (BONINO et ELAPHOS 2008). 650 unités de gros bétail sont recensées sur la commune de Megève en 2007 (COMMUNE-DE-MEGÈVE 2007). Les activités industrielles sont très minoritaires : un abattoir et une scierie. Par ailleurs, Megève est équipée d'une petite centrale hydroélectrique, installée depuis 1965 sur le réseau d'eau potable, sous le Palais des sports (BRANCHEREAU 2015). Du point de vue des équipements, Megève possède de nombreuses infrastructures dédiées au tourisme : piscine, patinoire, Palais des sports, spa, golf, aéroclub, ainsi qu'un panel d'enneigeurs artificiels.

L'organisation des remontées mécaniques se fait sur deux institutions. La Société des Remontées Mécaniques (SEM) de Megève gère les domaines de Rochebrune et du Mont d'Arbois. Elle est détenue à 62 % par la ville de Megève (BONINO et ELAPHOS 2008). Sa présidence est donc assurée par la commune. L'autre institution est la SEM du Jaillet qui gère le domaine du Jaillet. Elle regroupe entre autres les communes de Megève, Combloux et La Giettaz sous forme d'un Syndicat Intercommunal à Vocation Unique (SIVU). Ce dernier est dirigé par le maire de Combloux (LEROY 2015).

Usages de l'eau

Usages de l'eau à Megève

Les principaux usages de l'eau dans la commune de Megève sont liés aux différentes utilisations de l'eau potable et à la production de neige artificielle et d'hydroélectricité.

La neige de culture est produite en hiver (si besoin) sur les domaines de Rochebrune, Mont d'Arbois et Cote 2000, pour la préparation des pistes avant ouverture et durant l'exploitation. La SEM possède deux retenues collinaires pour le stockage de l'eau destinée à la production de neige : le lac de Javen et la retenue du Mont d'Arbois (voir Fig. 3.23). La retenue collinaire du Mont d'Arbois est située juste en dehors des limites communales, mais reste à l'intérieur du bassin versant de l'Arly. Ces retenues sont remplies au printemps via leurs propres captages des eaux de surface, en profitant des débits de fonte. Le lac de Javen est directement connecté au réseau municipal donc il peut être rempli avec de l'eau potable s'il y a des besoins supplémentaires en neige artificielle durant la période hivernale. Ces volumes d'eau potables sont présentés dans le Tableau 3.4. Le remplissage se fait à condition que les ressources en eau pour la distribution de l'eau potable soient suffisantes pour satisfaire les usages domestiques de la haute saison hivernale.

La production d'hydroélectricité à Megève est un cas particulier car elle consiste au turbinage du trop-plein du réseau d'eau potable (BRANCHEREAU 2015). Comme dans le cas l'usage de l'eau potable pour la production de neige artificielle, les besoins en eau potable domestique sont prioritaires sur la production hydroélectrique. La turbine du Palais des Sports de Megève est installée à la sortie du réseau d'eau potable (sur un des points bas de la commune, au niveau du col). Comparé à une centrale hydroélectrique classique, son potentiel énergétique est assez limité car le trop-plein d'eau des sources prélevées pour l'eau potable est faible durant les hautes saisons touristiques (LEROY 2015). Néanmoins, cet usage

Usage	Volumes 2012 (m^3)	Volumes 2013 (m^3)	Volumes 2014 (m^3)	Répartition (%)
Abonnés domestiques	545'042	543'360	606'968	20.4 %
Bassins avec comptage et bornes de puisage	79'077	50'470	31'491	1.1 %
Turbine hydroélectrique	1'323'345	2'264'198	1'970'111	66.1 %
Neige artificielle	102'233	69'127	100'242	3.4 %
Volumes techniques et non comptabilisés (estimation)	13'836	13'668	14'883	0.5 %
Pertes	567'793	361'066	255'533	8.6 %
Total distribué	2'631'326	3'301'889	2'979'228	100 %

TABLEAU 3.4 – Megève : répartition des prélèvements d'eau potable par usage en 2012, 2013 et 2014. Données : BRANCHEREAU (2015).

de l'eau potable est le plus important en termes de volume car en moyenne sur les années 2012, 2013 et 2014, il représente 66.1 % de l'eau potable distribuée (Tableau 3.4).

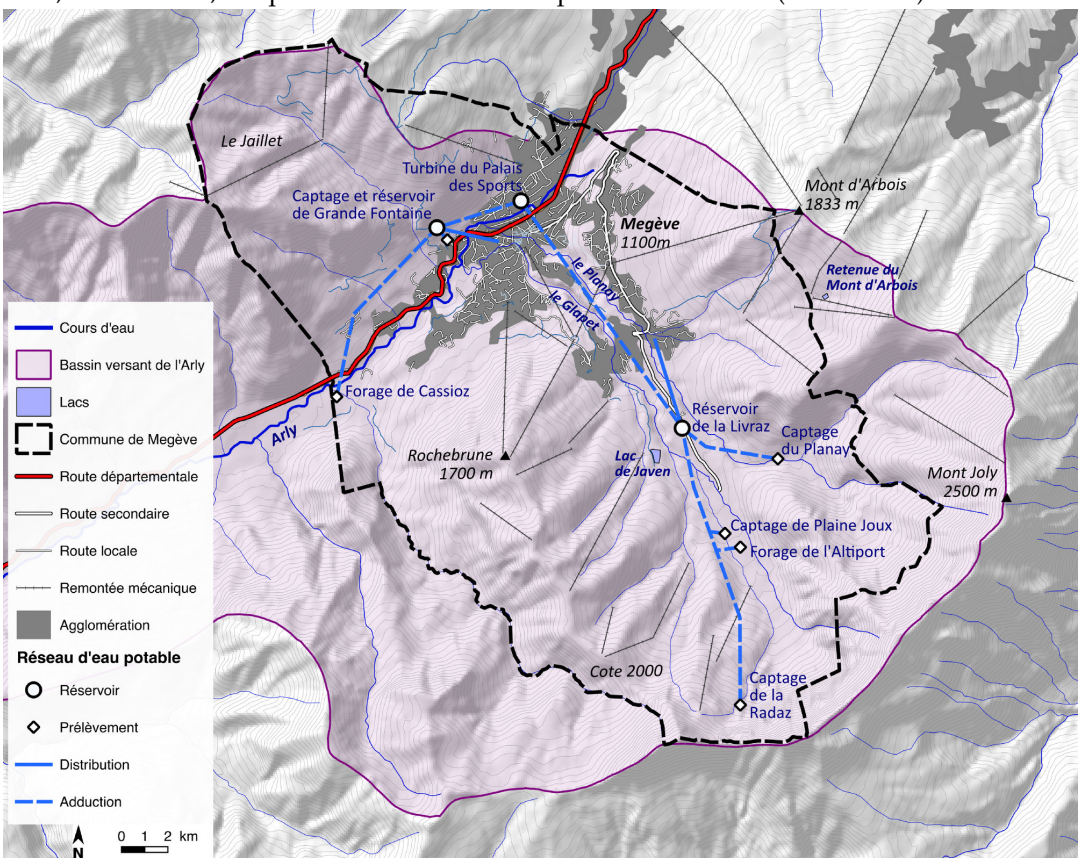


FIGURE 3.23 – Ressources prélevées et réseau de distribution d'eau potable de Megève.

Sur la même période, les volumes d'eau potable utilisés annuellement pour la production de neige artificielle ont représenté 3.4 % du total des volumes distribués, hydroélectricité et pertes comprises (Tableau 3.4). Les autres volumes sont constitués des usages domestiques (20.4 %), des fontaines et bornes de puisage (1.1 %) et des volumes techniques (0.5 %). Ces pourcentages sont à relativiser car certains usages sont concentrés sur des courtes périodes de temps. Le turbinage hydroélectrique se déroule principalement au printemps à la fonte des neiges, lorsque les débits des sources engendrent un trop-plein important.

Les prélèvements d'eau potable utilisée pour la neige artificielle sont eux concentrés sur la période hivernale. Les pics saisonniers de production de neige artificielle sont donc significatifs. Néanmois, cet usage étant très bien suivi quantitativement par la société de remontées mécaniques et déjà traité en détails dans la thèse de LEROY (2015), il ne fera pas l'objet de monitoring dans ce travail.

A part l'hydroélectricité (qui n'est pas un usage prioritaire), les usages urbains de l'eau potable sont donc en volume annuel les utilisations les plus importantes de l'eau à Megève. L'eau potable sert pour les usages domestiques, les usages municipaux (nettoyage des voiries, alimentation des fontaines, vidange et rinçage des réservoirs), les bureaux et commerces, l'artisanat et les petites entreprises, l'agriculture (abreuvement du bétail, laiteries) et les loisirs (piscines, patinoire, centres sportifs). La protection contre les incendies est également un usage de l'eau potable, un certain volume y est réservé dans les infrastructures de stockage. Au vu de la part importante de résidences secondaires et de la population temporaire à Megève, la distribution d'eau potable a une très forte saisonalité en relation avec les périodes touristiques.

Infrastructures et modalités de gestion de l'eau

La gestion de l'eau à Megève s'organise au sein d'une régie communale de 7 personnes : la directrice, le fontainier (en charge de la pose et de la relève des compteurs d'eau), une secrétaire, deux techniciens (en charge de l'entretien des conduites) et deux ingénieurs de réseau.

Le réseau d'eau potable

Ressources : Les ressources principales pour l'eau potable se situent toutes sur le territoire communal (voir Fig. 3.23). La grande part des prélèvements sont effectués sur deux sources situées au pied du massif du Mont Joly, au sud-est de Megève : le captage du Planay et le captage de la Radaz. Ces deux sources étant située dans deux vallons distincts (le Planay au pied du Mont Joly et la Radaz à proximité de la Cote 2000), ils présentent l'avantage d'avoir des régimes complémentaires. D'après le fontainier communal, il arrive régulièrement que lorsque l'une des deux sources présente un faible débit, l'autre captage arrive à assurer les besoins du réseau. D'autres sources complètent les prélèvements : les captages de Plaine Joux (près de l'altiport) et de la Grande Fontaine (sur le versant nord-ouest de Megève) ainsi que les forages de l'altiport (dans la nappe alluviale) et de Cassioz (dans la nappe de l'Arly).

Traitement : L'entièreté des prélèvements étant effectué sur des sources ou dans des nappes alluviales, la présence d'une station de traitement n'est pas nécessaire. Seul un traitement aux UV est effectué sur les captages du Planay et de la Grande Fontaine.

Distribution : L'eau prélevée va directement remplir les réservoirs principaux de la commune : le réservoir de la Livraz (sur le versant sud-est de la commune) et le réservoir de la Grande Fontaine (sur le versant nord-ouest). Situé en hauteur de la station touristique, le réservoir de la Livraz assure la distribution vers la partie sud-est de Megève et la Grande Fontaine assure la distribution de la partie nord-ouest de l'agglomération. Ce dernier est alimenté par l'eau provenant de la Livraz avec la seule pression accumulée avec la différence d'altitude entre les deux réservoirs.

Tarification : La commune de Megève applique une tarification volumique de l'eau potable. Comme à Montana, la facturation est binomiale, c'est-à-dire qu'elle se décompose en une partie fixe (abonnement) et en une partie variable, constituée du volume apporté (BRANCHEREAU 2015). Chaque bâtiment possède un compteur d'eau domestique, de même que les bassins et fontaines communales. Les volumes d'eau potable destinés au remplissage du lac de Javen pour la production d'hydroélectricité sont également comptabilisés. La facturation des abonnés domestiques s'effectue une fois par an, en été. La relève des compteurs est effectuée manuellement par le fontainier et la secrétaire. Cette opération prend environ un mois en tout. Depuis 2012, pour faciliter ces relèves, le fontainier installe progressivement des têtes de lecture radio, en commençant par les compteurs les plus difficiles d'accès : par exemple ceux situés dans des regards (coffrets en béton enterrés) ou dans des pièces fermées à clé. A la fin 2016, plus de 450 compteurs (sur un total de 4030) étaient équipés de ces antennes et pouvaient être relevés à distance.

3.2 Montage expérimental

Les données collectées durant ce travail de thèse se sont concentrées sur les usages de l'eau potable (à Montana et Megève) et de l'eau d'irrigation (à Montana). Ces mesures quantitatives, effectuées à l'aide de compteurs d'eau et de débitmètres, ont été complétées par des entretiens auprès des acteurs usagers de l'eau.

L'objectif général du montage expérimental mis en place sur les deux communes est, d'une part, d'obtenir une mesure des usages pour lesquels aucune donnée n'existait auparavant (comme c'est le cas pour l'irrigation à Montana) et, d'autre part, d'obtenir des mesures à pas de temps plus courts et avec une meilleure catégorisation des usagers pour les usages dont certaines données étaient déjà disponibles via les communes (comme c'est le cas pour les usages de l'eau potable à Montana et Megève).

Un calendrier (Fig. 3.24) synthétise les différents relevés de terrain et entretiens effectués lors de la recherche. Pour chaque cycle de mesure (surligné en bleu), le nombre de compteurs d'eau échantillonnés et les pas de temps de mesure sont indiqués.

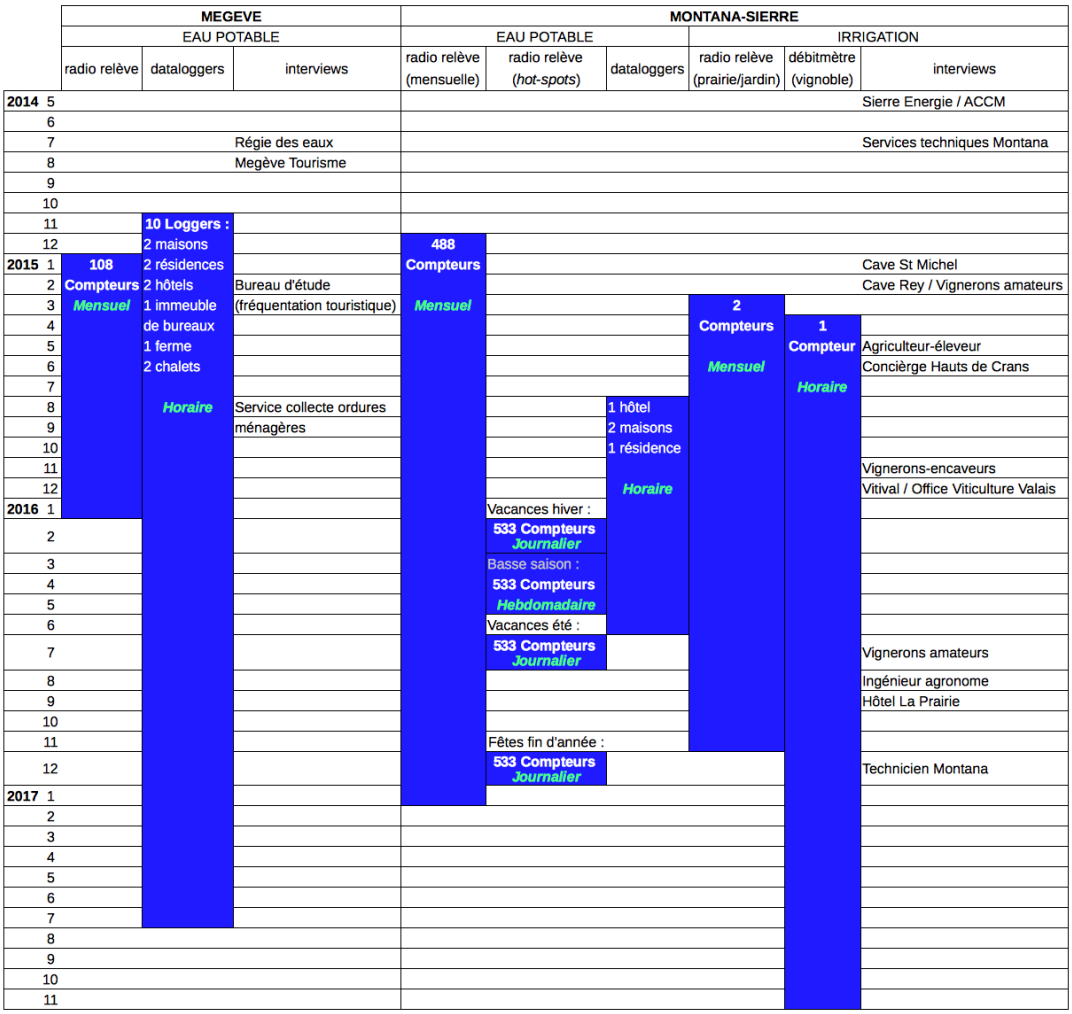


FIGURE 3.24 – Calendrier des travaux de terrain effectués et des données récoltées.

Les sections suivantes reprennent en détail les modes opératoires choisis pour la récolte des données d'usage de l'eau à Montana et à Megève.

3.2.1 Montana

Monitoring des usages de l'eau potable

Dans un premier temps, les données municipales disponibles concernant l'eau potable ont été récoltées : prélèvements mensuels aux différentes sources, distribution journalière (en sortie de la station de potabilisation) et volumes annuels facturés.

Afin de récolter des données d'usage de l'eau potable à l'échelle de l'usager (apports), deux méthodes ont été choisies : la radio-relève de l'ensemble des compteurs d'eau de la commune et la pose de dataloggers sur un petit échantillon de compteurs d'eau.

Radio-relève des compteurs d'eau

Les compteurs d'eau de Montana sont tous équipés d'antennes radio, utilisées pour la relève annuelle destinée à la facturation. L'occasion a donc été saisie pour demander à la commune le prêt de l'antenne réceptrice et effectuer une relève systématique des compteurs, à intervales plus courts. Ces relèves sont effectuées en voiture, depuis la voie publique, et

prennent environ une journée. Deux échelles de temps ont été choisies pour ces relèves (Fig. 3.24) : un monitoring sur le temps long (deux ans) et un monitoring sur des temps plus courts ('hotspots').



FIGURE 3.25 – Compteur domestique d'eau potable équipé d'une antenne radio pour la relève à distance.

Le monitoring sur le temps long a consisté en des relèves mensuelles de l'index des compteurs d'eau, sur deux ans (2015-2016). Cet index est la totalisation du volume d'eau passé au travers du compteur depuis son installation, exprimé en litres ou en mètres cubes, suivant l'ancienneté du modèle. L'antenne réceptrice utilisée par la commune a l'avantage d'être automatique, c'est-à-dire qu'elle détecte les compteurs d'eau dans un rayon d'environ 50 mètres et les relève de manière systématique. Ce mode de communication des données permet d'effectuer la relève des compteurs d'eau depuis une voiture en mouvement (environ 30 km/h), en obtenant un gain de temps important. Les têtes de lecture radio des compteurs d'eau (Fig. 3.25) de Montana (modèles de marque GWF) ont la particularité d'envoyer comme signal l'index du jour de la relève et l'index du dernier jour du mois antérieur. C'est pourquoi les campagnes de mesure ont été systématiquement organisées en milieu de mois, ce qui a permis d'obtenir deux valeurs en une seule relève : celle du milieu du mois et celle du dernier jour du mois précédent. De cette manière, une série de données bi-hebdomadaires a pu être produite. Au total, 488 compteurs ont pu être relevés, sur un peu plus de 700 compteurs radio existants dans la commune. En plus des compteurs de Montana, la commune de Sierre a été contactée pour effectuer un relevé sur un échantillon de leurs compteurs d'eau afin d'obtenir des données en plaine pouvant servir d'éléments de comparaison avec les données récoltées plus en altitude. La commune de Sierre, qui ne comptait à ce moment pas d'antenne radio sur ces compteurs, a accepté d'en installer dans un hôtel, deux maisons individuelles et deux résidences de logements. Les relèves de ces compteurs étaient effectuées en parallèle de celles de Montana.

Le monitoring sur le temps court a été effectuée durant la seconde année de mesure

(2016), avec des relèves à pas de temps plus courts, lors de certains des 'hotspots' de l'année touristique : au cours de trois hautes saisons, avec un pas de temps journalier et sur une période de dix jours (vacances d'hiver en février, vacances d'été en juillet et fêtes de fin d'année en décembre) et au cours d'une basse saison, avec un pas de temps hebdomadaire sur une période de trois mois (fin mars, avril et mai).

Echantillon de dataloggers

En parallèle des relèves radio, un échantillon de bâtiments a été sélectionné avec l'aide des services techniques de Montana pour effectuer un suivi avec un pas de temps horaire. Deux maisons unifamiliales et un hôtel ont été retenus. Un système de dataloggers a cette fois été mis en place et consiste en une tête de lecture fixée sur le compteur d'eau et envoyant en temps réel les données d'index sur un serveur web. Ces mesures ont été prises entre août 2015 et juin 2016. Pour compléter ces mesures d'apport d'eau potable, la fréquentation journalière de l'hôtel a été récupérée auprès de la gérante, via les données de taxes de séjour. En plus de ces trois bâtiments, les apports d'eau pour une résidence de logements située dans la station ont fait l'objet d'un suivi. C'est dans ce cas le concierge du bâtiment qui a eu la gentillesse de noter à pas de temps réguliers les index du compteur d'eau potable de l'immeuble.

Monitoring de l'irrigation

Irrigation des prairies et des jardins

Pour les usages d'irrigation des prairies et des jardins, des parcelles-tests ont été sélectionnées pour mesurer les volumes d'eau au niveau des apports : une parcelle de prairie et un jardin privé, situés à Montana-Village. La prairie occupe une superficie de 6700 m^2 et le jardin 330 m^2 (Fig. 3.26a,b). Deux compteurs équipés d'antennes radio ont été spécifiquement installés sur le réseau d'irrigation communal pour effectuer les mesures (Fig. 3.26b), car il n'en existait pas en raison de la tarification surfacique de l'irrigation. L'un mesure en direction du système d'arrosage du jardin privé et l'autre vers le branchement sur lequel l'agriculteur fixe ses asperseurs mobiles pour irriguer la prairie. Les relevés ont été effectués via les antennes radio en parallèle des compteurs d'eau potable, une fois par mois entre 2015 et 2016 durant la période d'ouverture du réseau d'irrigation (avril-octobre).

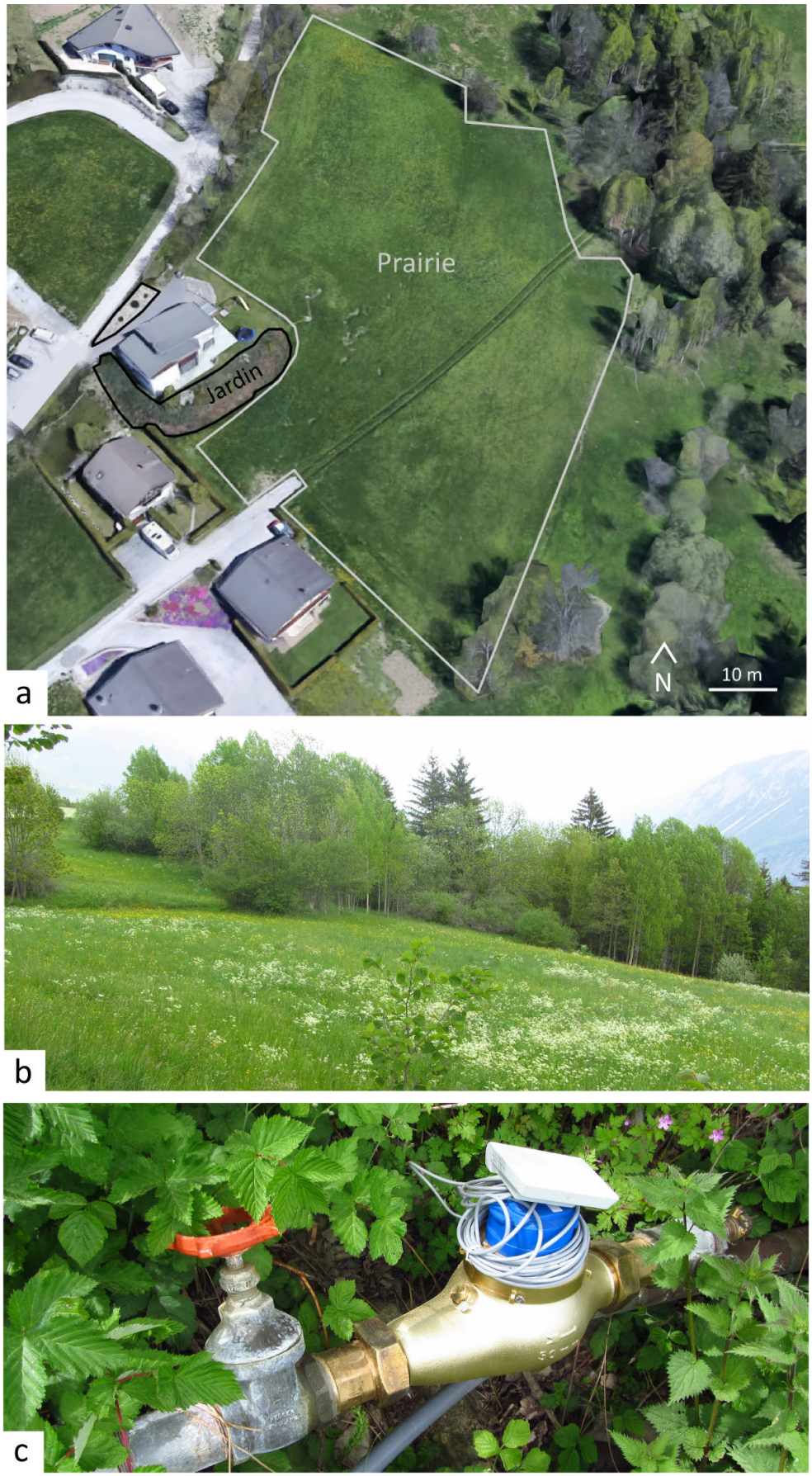


FIGURE 3.26 – Plan de délimitation de la prairie et du jardin retenus pour le monitoring (a). Image : (c) 2017 Google Earth. Vue de la prairie choisie pour le monitoring (b) et compteur d'eau branché sur le réseau d'irrigation, avec antenne radio pour la relève à distance des index (c).

Irrigation du vignoble

L'usage principal d'irrigation sur le bas de la commune de Montana étant l'arrosage du vignoble, il a été possible de mesurer la distribution d'eau pour la totalité des parcelles de vigne alimentées par le réseau communal d'irrigation en installant un débitmètre sur la canalisation du réseau située juste en amont du vignoble (Fig. 3.27).



FIGURE 3.27 – Installation de monitoring sur le réseau d'irrigation en amont du vignoble : chambre de la vanne coupe-pression où est installée la sonde débitmètre.

La difficulté était de trouver un système permettant de mesurer le débit sur une canalisation de diamètre important (environ 30 cm), sans devoir faire de travaux sur le réseau. Un compteur d'eau classique à turbine de ce diamètre serait trop coûteux et les compteurs d'eau à induction magnétique (ne nécessitant pas de travaux sur la conduite) ne sont actuellement pas assez fiables, à des prix abordables pour cette recherche. La solution qui a été trouvée est celle d'une sonde débitmètre pouvant s'insérer directement dans une vanne existante. Cette technologie est développée par le fabricant (ClaVal) des vannes déjà en place sur le réseau d'irrigation de Montana. Une vanne coupe-pression a donc été équipée de cette sonde (Fig. 3.28b) et mesure le débit de manière instantannée. Cette sonde a une précision de +/- 2 % dans la plage de débit entre 0.2 et 5 m^3/s. Les valeurs mesurées sont ensuite enregistrées chaque minute dans un boîtier (Fig. 3.28a) et envoyées sur un serveur web via une antenne GSM. Ces données ont ensuite été agrégées aux pas de temps horaires et journaliers pour l'analyse. Il faut enfin noter que puisque le débitmètre est installé au niveau de la distribution en amont de Corin, certains autres usages de l'eau d'irrigation du village sont également pris en compte dans les volumes mesurés, en particulier l'arrosage des jardins privés et des espaces verts publics.

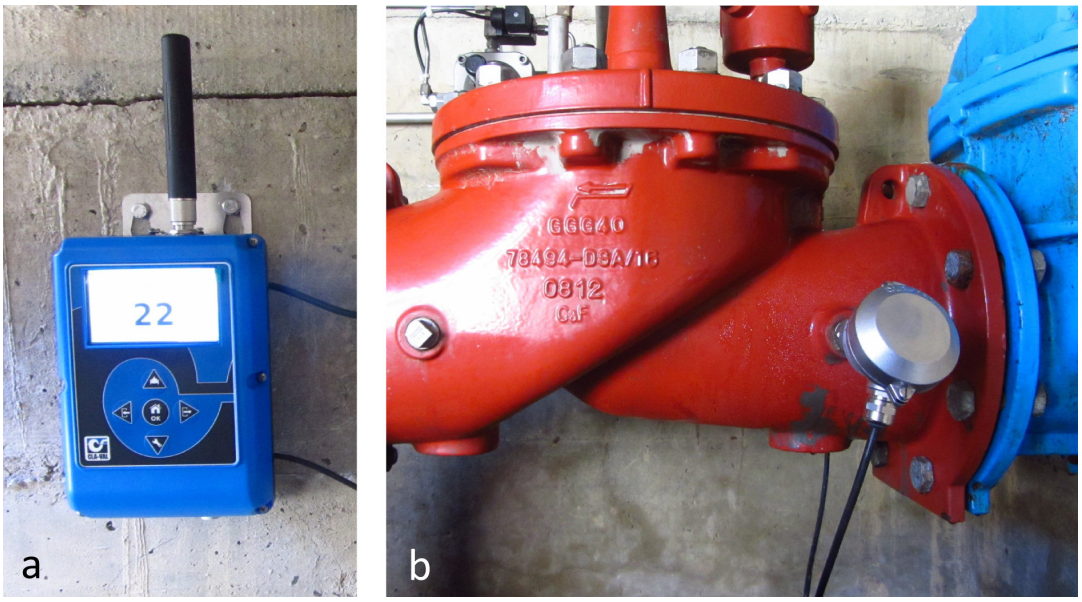


FIGURE 3.28 – Installation de monitoring sur le réseau d'irrigation en amont du vignoble : datalogger (a) et sonde débitmètre insérée dans la vanne coupe-pression (b). Photographies : avril 2015.

Entretiens

Au total, 17 entretiens ont été effectués lors des visites de terrain à Montana et à Megève (voir Fig. 3.24). La plupart des entretiens étaient semi-directifs et concernaient les acteurs de l'irrigation à Montana : des vignerons professionnels et amateurs, un agriculteur-éleveur, le concierge d'un immeuble résidentiel, des représentants de l'office de viticulture du Valais et de Vitival (association des viticulteurs valaisans), un ingénieur agronome et le personnel des services techniques communaux. Chaque entretien a duré environ une heure. Durant les rencontres, je disposais de différentes questions par rapport aux pratiques d'usage et parfois des premiers résultats de mes mesures, ce qui permettait de débuter et guider la discussion. Pour les usages de l'eau potable, j'ai également interviewé à Montana une responsable d'hôtel et à Megève l'office du tourisme, les services de collecte des ordures ménagères (SITOM) et le bureau d'étude chargé d'évaluer la fréquentation touristique de la station. Le reste des entretiens se compose des discussions informelles que j'ai pu avoir avec les techniciens tout au long des campagnes de mesure à Montana et à Megève.

3.2.2 Megève

Monitoring des usages de l'eau potable

A Megève, le monitoring des usages de l'eau potable s'est effectué, d'une part, à haute résolution sur un échantillon de compteurs d'eau à l'aide de dataloggers et, d'autre part, à pas de temps mensuels sur une partie des compteurs équipés d'antennes radio.

Echantillon de dataloggers

Avec l'aide de l'équipe de la Régie des eaux, un échantillon de dix usagers de l'eau potable a été sélectionné pour installer des dataloggers. L'objectif était de choisir des types d'usagers et de bâtiments ayant des profils d'utilisation de l'eau différents. Le type d'habitat

a été pris en compte (collectif ou individuel) ainsi que la permanence des habitants (résidence secondaire ou permanente). Des usages particuliers comme les bureaux, l'élevage et l'hôtellerie ont également été choisis. L'échantillon est le suivant :

- 2 maisons unifamiliales (habitat permanent)
- 2 chalets (habitat temporaire)
- 1 résidence de logements (habitat permanent)
- 1 résidence de logements (habitat temporaire)
- 2 hôtels
- 1 ferme (étable pour l'élevage de vaches laitières)

Les dataloggers choisis sont deux modèles de marque HOBO, l'un étant à la base destiné à une utilisation intérieure (Fig 3.29a) et l'autre étant une boîte 'weatherproof' pouvant résister aux conditions extérieures (modèle Hobo-Station, Fig 3.29b). Ces loggers sont ensuite reliés à une tête de lecture filaire, fixée au compteur d'eau. Cette tête de lecture permet de relever l'index par magnétisme via la rotation de la pastille métallique du compteur. La plupart des lieux où ont été installés les loggeurs sont des regards, c'est-à-dire des coffrets en béton placés sous la surface du sol (Fig. 3.30a). Ces regards permettent un accès à certains compteurs d'eau sans devoir rentrer dans les bâtiments et sont enterrés afin de rester hors-gel.

Malgré l'utilisation des Hobo-Stations censées résister au climat extérieur, les taux d'humidité de certains regards ont provoqué assez des pannes sur les dataloggers. Des solutions de secours se sont finalement montrées efficaces pour protéger les loggers de la condensation, comme par exemple une boîte en plastique (Fig. 3.30b) ou une boîte métallique de récupération (Fig. 3.30c). A noter aussi, le travail à effectuer pour le dégagement des regards lors de la saison enneigée (Fig. 3.31a).

Radio-relèves

Enfin, une relève à pas de temps mensuelle a été effectuée sur les compteurs d'eau de Megève étant progressivement équipés d'antennes radio. Au total, 108 compteurs ont été relevés à distance à l'aide de l'appareil de relève radio de la commune (Fig. 3.31b) entre janvier 2015 et janvier 2016. Dans le cas de Megève, seule la valeur d'index au moment du relevé est envoyée par la tête de lecture radio, ce qui fait qu'une relève de type bi-hebdomadaire comme celle de Montana n'a pas pu être effectuée. De plus, le mode de communication de l'antenne radio réceptrice est manuel : chaque compteur d'eau doit être interrogé individuellement. Cette métode nécessite plus de temps car même en effectuant la relève en voiture, il faut s'arrêter au niveau de chaque compteur pour récupérer son index.

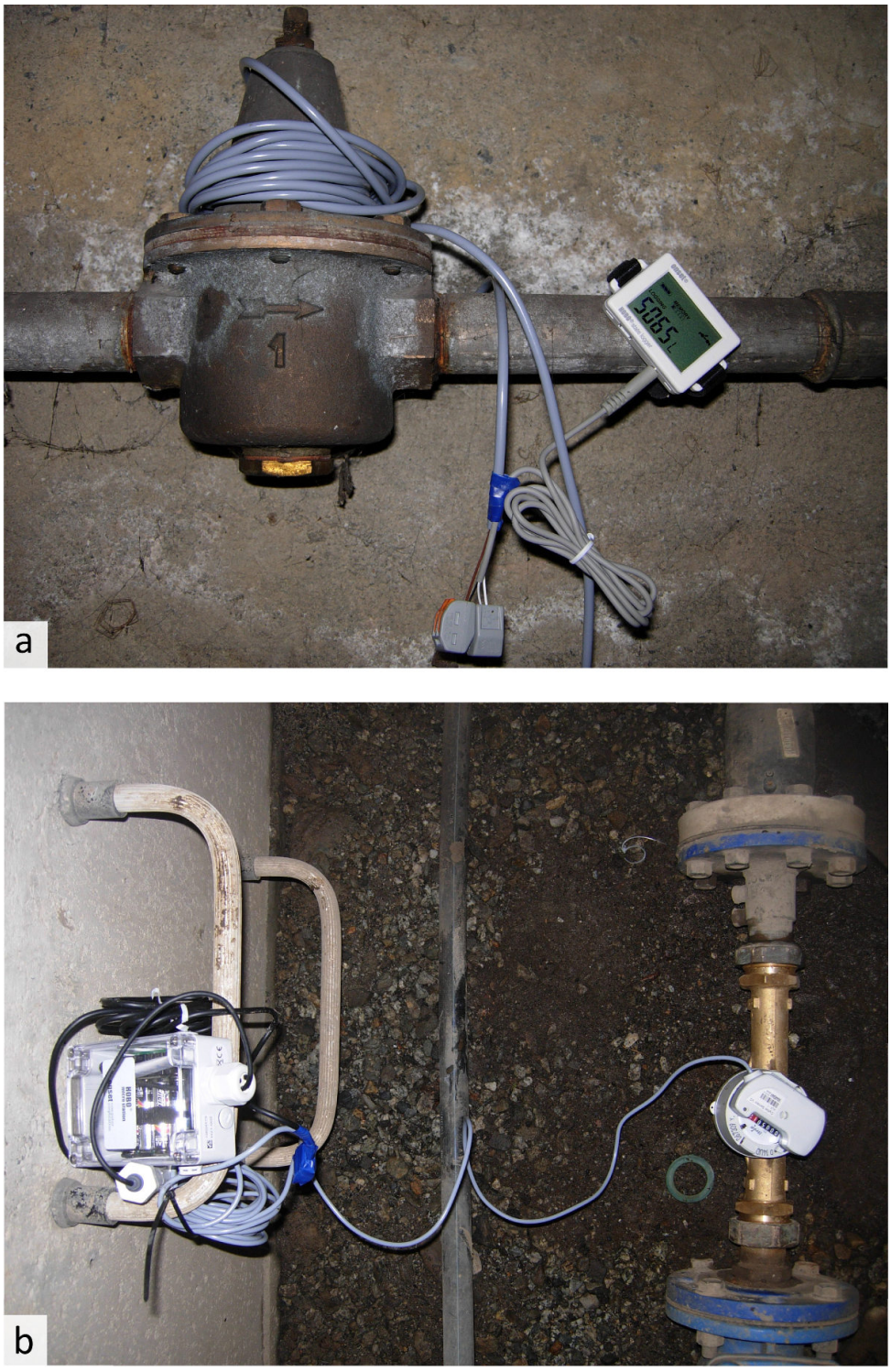


FIGURE 3.29 – Datalogger Hobo d'intérieur dans la cave d'une maison (a) et datalogger Hobo-Station dans un regard (b). Photographies : décembre 2014.



FIGURE 3.30 – Datalogger (modèle d'intérieur) protégé par une pochette plastique, provisoirement installé dans un regard suite à la panne d'un Hobo-Station (a). Ré-installation d'un logger Hobo-Station, mis à l'abri de la condensation dans une boîte en plastique (b). Bricolage inventé par le fontainier communal pour remplacer un loggeur Hobo-Station défectueux par un loggeur Hobo d'intérieur (c).

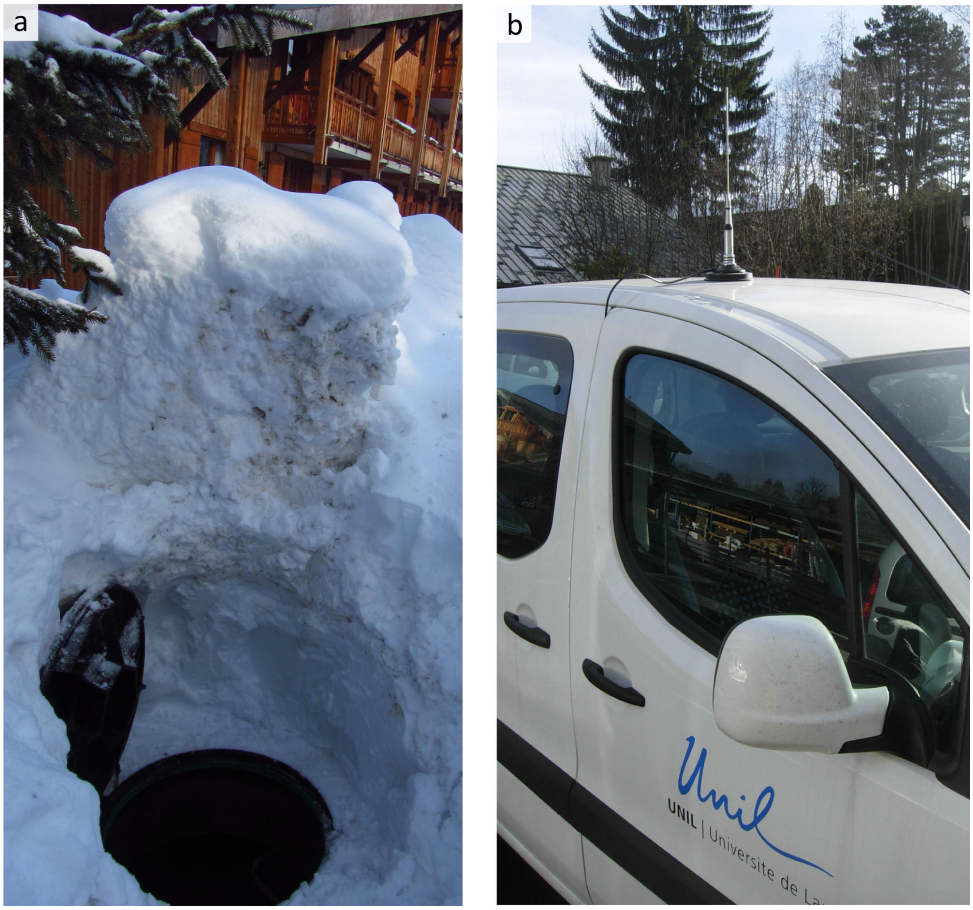


FIGURE 3.31 – Regard dégagé de la neige (a) et antenne réceptrice utilisée pour la relève à distance des compteurs d'eau équipés d'émetteurs radio (b). Photographies : février 2015.

Chapitre 4

Monitoring water use regimes and density in a tourist mountain territory (article 2)

Martin Calianno* : Assistant doctorant, Institut de géographie et durabilité, Université de Lausanne, Bâtiment Géopolis, 1015 Lausanne, Suisse, courriel : Martin.Calianno@unil.ch
Emmanuel Reynard : Professeur, Institut de géographie et durabilité, Université de Lausanne, Bâtiment Géopolis, 1015 Lausanne, Suisse, courriel : Emmanuel.Reynard@unil.ch
Marianne Milano : Première assistante, Institut de géographie et durabilité, Université de Lausanne, Bâtiment Géopolis, 1015 Lausanne, Suisse, courriel : Marianne.Milano@unil.ch

Mise en contexte de l'article dans la thèse

Cet article est la deuxième publication de la thèse. Il présente les résultats obtenus suite au monitoring des usages de l'eau dans la commune de Montana et les concepts développés pour la structuration des données d'usage (régime, densité et bassin). La rédaction de l'article s'est déroulée cette fois-ci sous ma direction. J'ai d'abord écrit l'entièreté de l'article, ensuite le texte a été retravaillé avec la collaboration d'Emmanuel Reynard et de Marianne Milano.

Référence complète de l'article :
M. Calianno, M. Milano et E. Reynard (2018). "Monitoring water use regimes and density in a tourist mountain territory". Water Resources Management, Volume 32, p. 2783-2799.

Abstract

Lack of water use data at the user scale is frequently noted in integrated water management and water demand modelling studies. This situation affects particularly mountain tourist areas, where high seasonal water demand related to the variation of temporary population are rarely documented. Irrigation is also a major water use in moutain territories but is not commonly measured. This paper proposes a framework for local-scale monitoring of seasonal water use behaviours and their territorial inprint. A monitoring strategy was developed to collect water demand data at thin spatio-temporal scales which were analysed using two concepts: (i) the water use regime, describing the dynamics of water uses throughout the year using normalised values, and (ii) the water use density, expressing the

territorial footprint of a water use, in terms of unit area. This strategy was applied in the alpine tourist municipality of Montana (Switzerland). A two-year monitoring campaign of irrigation and drinking water uses was carried out combining in-field measurement (water meters) with interviews of water users. The temporal resolution of the collected water use dataset (bi-weekly, daily) was sufficient to assess the specific water demand patterns and the short-term water use peaks responsible for water stress in Alpine tourist regions. It provided the first irrigation monitoring in the area and a classification of drinking water data according to their spatial distribution, the type of building and the permanency of residents. The water use density method gives a new prespective on the spatial intensity of water uses, highlighting the importance of garden irrigation in Montana. Also, the water use regime method identified July as the period of water demand peaking. The monitoring of water uses at such thin temporal scale constitutes the necessary dataset for the creation of water balance models that accurately reproduce the effective water use behaviours.

4.1 Introduction

In integrated water management studies, the spatial and temporal variability of water uses are more and more implemented in water supply-demand balance at both the regional scale (Collet et al. 2015; Milano et al. 2015) and the catchment scale (Reynard et al. 2014; Fabre et al. 2016). Such approaches evaluate the pressures exerted by climate and society on water resources and the capacity of these resources to meet anthropic and environmental water needs. These works often note the lack of comprehensive knowledge on the dynamics of various water uses in both space and time, at sufficient resolution (Grouillet et al. 2015). Water demand datasets exist at the basin or regional scale and at annual, seasonal or monthly time steps (Romano et al. 2016; Vallès-Casas et al. 2017), but water demand observations at weekly or daily time steps with sufficient spatial resolution (building, end-user scale) need to be developed to identify water stress events happening at small time scales.

This work follows the MontanAqua project (Reynard et al. 2014), which quantified water resources and water demands in the Crans-Montana region (Switzerland) to propose water management strategies according to different climatic and socio-economic scenarios. The MontanAqua project, as many other water management studies in Alpine tourist territories (Paccard 2010; Saulnier et al. 2011; Klug et al. 2012; Magnier 2013; Leroy 2015) was confronted to the lack of data on water uses or their poor spatial and temporal resolution (Bonriposi 2013). In a more general context, studies on water demand management modelling also point out the limitations in data support, leading to major uncertainties (Nazemi and Wheater 2015; Haque et al. 2017).

This work addresses two issues concerning water uses in mountain tourist regions. The first one is the high seasonality and the intensity of some water demands. In mountain territories including a tourist resort, drinking water inter-annual demands are highly variable in relation to the alternating tourist seasons. The variation of temporary population (secondary residents, tourists) is causing water demand variability at short temporal scales (daily) due to weekend visitors and longer temporal scales (monthly) along with tourist seasons: winter ski holidays, summer. Moreover, irrigation of pastures, vineyards and private gardens is common in mountain valleys and are seasonal too. Because water resources in mountain

areas are also very seasonal, with river low flows occurring during high water demand periods in winter and at the end of summer, situations of water stress can happen at very short time scales. To model and forecast such intense scarcity events, water resources in tourist regions are usually monitored at sufficient temporal time steps (daily, up to hourly), but water uses that are commonly measured annually (Gössling et al. 2012; March et al. 2015; Morote et al. 2016; Sax et al. 2016) or monthly (Rico-Amoros et al. 2009; Vanham et al. 2011; Bonriposi 2013) need to be studied with a better temporal resolution in order to identify and manage short time scale water scarcity events. The second issue is the lack of available water use data at sufficient temporal resolution necessary to assess such short-term water demand peaks and to validate water demand models, as noted in previous studies (Milano et al. 2013a; Collet et al. 2015; Fabre et al. 2016). With respect to drinking water uses, data at the end-user scale in mountain areas are most often at insufficient temporal resolution, because they usually come from annual water billing (Calianno et al. 2017). This situation contrasts with high resolution residential water demand datasets available in large cities using smart metering techniques (Gurung et al. 2016). At the scale of water distribution, data can be available at daily time steps or lower as measurement are usually made at the municipal reservoir output (Gargano et al. 2017). But distribution data only give an averaged image of all water use behaviours: they do not describe the spatial variability of water use inside the municipality, nor the different water demand patterns which are usefull for water management. With respect to irrigation, the MontanAqua project (Reynard et al. 2014) simply could not collect any observed data, as no volumetric monitoring was made on irrigation networks. To face this absence of data, Bonriposi 2013 made withdrawal measurements on irrigation channels, but data at this scale overestimated water demand, as these channels convey running water during the whole irrigation season, whether the water is used to irrigate or not. He also modelled crops water needs using the FAO CropWat method (Allen et al. 1998), which overestimated water demand as well. From these issues, two questions are raised. What are the different seasonal behaviours of the multiple uses of drinking water and irrigation in a mountain tourist area? And what is the spatial inprint of these water uses on the territory?

The first objective of this article was to develop a monitoring strategy based on the water use cycle framework (Calianno et al. 2017) to collect weekly water use data at end-user scale and to apply it to a case study, in the Swiss Alps (the municipality of Montana). The second objective was to create analytic tools for the spatiotemporal assessment of water uses: the water use "regime" describing the seasonality of water demand and the water use "density", highlighting the territorial footprint of water use, per unit area (mm).

The next part of this paper presents the study area. The third part describes the methodology used for on-site water use monitoring and defines the concepts of water use regime and density. In the fourth part, the results of monitoring survey are presented and discussed using these two concepts.

4.2 Study area: a tourist mountain territory

The water demand of the Alpine municipality of Montana (Valais, Switzerland) is explored because it includes a tourist resort and irrigated lands, leading to highly seasonal uses of drinking water and irrigation (Reynard and Bonriposi 2012). Montana is located on the

south-facing slope of the Rhone River Valley, forming a 4.9 km^2 vertical strip that ranges from 519 m to 1775 m a.s.l (Fig. 4.1). The higher end of the municipality (1400-1775 m a.s.l.) includes a part of the Crans-Montana tourist resort (5410 tourist beds). In 2013, 2,398 permanent inhabitants lived in the municipality (source: municipality of Montana). Lower in altitude is the historical village of Montana (1200 m a.s.l.), which is surrounded by pastures. The village of Corin, surrounded by vineyards, is situated at the lower end (550-800 m a.s.l.). Because of a rain-shadow effect caused by high mountain ranges enclosing the Rhone River Valley, climate is semi-continental, with hot and dry conditions in summer, cold winters and high vertical rainfall gradients (Calianno and Reynard 2016). Mean annual rainfall ranges from 672 mm in the vineyards (536 m a.s.l.) to 692 mm at the level of Crans-Montana ski resort (1472 m a.s.l) (data: MeteoSwiss, period 1981-2010).

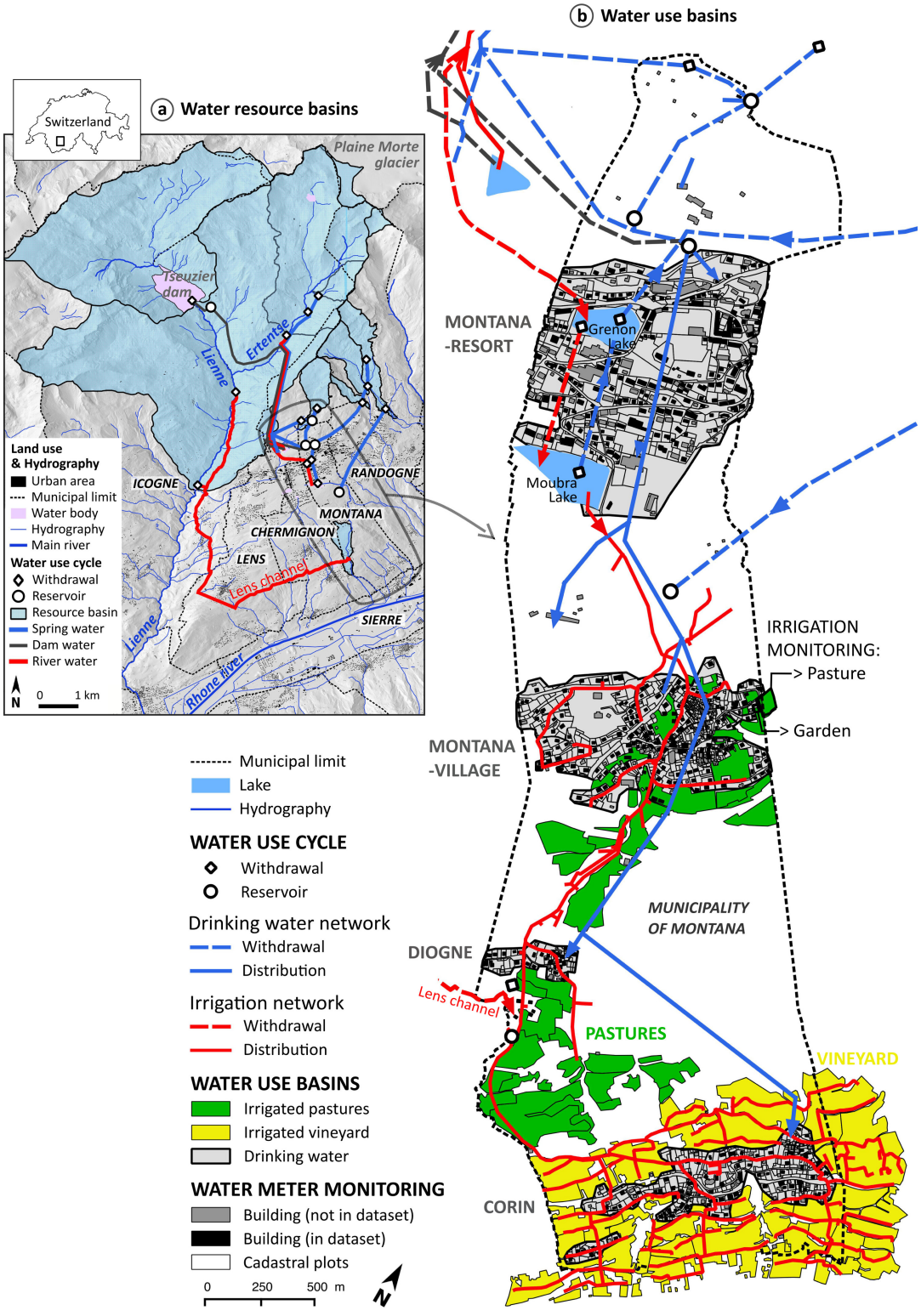


FIGURE 4.1 – Water use cycle in Montana: (a) withdrawals from resource basins, (b) distribution to water use basins

A specific irrigation network supplies the lower part of Montana (pastures and vineyards areas), to which the tourist resort is not connected. This is why in the resort drinking water is used to irrigate gardens and lawns (Reynard and Bonriposi 2012).

Water resource basins withdrawn for Montana's water uses are mapped (Fig. 4.1a) and the spatial distribution of water uses is described using drinking water use basins (Montana's resort, Montana's historic village, and the villages of Diogne and Corin) and irrigation basins (pastures and vineyard) (Fig. 4.1b).

4.3 Methodology

Datasets consisting in water demand time series were first collected through a monitoring campaign set up in the municipality of Montana, on the end-user scale. Then, the concept of the *water use cycle* (Calianno et al. 2017) was further developed to create two analytic tools assessing water uses' spatiotemporal variability: the water use *regimes* and the water use *density*.

4.3.1 Datasets

Collected datasets focus on the utilisations of drinking water and irrigation water and are combined with qualitative interviews.

The first dataset consists in drinking water distribution time series provided by the municipal water services. Time series selected for this study are at daily time steps and range from December 2014 to December 2016 (Fig. 4.2a).

The second dataset consists in drinking water delivery time series collected during the monitoring campaign. Field visits were carried every month during two years (2015-2016) to collect water meter data at the building scale: houses, residential and commercial buildings, hotels. In the water use cycle framework, these water volumes correspond to the *delivery* scale (Calianno et al. 2017). In total, 587 out of the 707 water meters of Montana were monitored. Because Montana's water meters are equipped with radio transmitters, data were collected with the radio antenna usually employed by the water services for annual billing. Radio water meters have the advantage to record the amount of water both for the day of acquisition and for the last day of the previous month. Monitoring visits were then carried out in the middle of each month, allowing to virtually collect data every two weeks. From this raw dataset, a smaller sample (n=390) was selected based on data quality (excluding time series with gaps or errors). Then it was crossed with the Swiss federal register of housing and buildings (StatBL), which provides the number of dwellings per building, the dwelling surface and the number of permanent residents per dwelling. Water use time series were therefore classified by type of building :

- house,
- apartment block,
- winery,
- business,
- hotel

and by the number of permanent residents per dwelling :

- < 1,
- 1-2,
- ≥ 2.

The number of water meters monitored for each class are indicated in Fig. 4.2b. For privacy reasons, spatial analyses were made by aggregating individual time series by water use basins: Montana Resort (n=168), Montana-Village (n=155), Diogne (n=21) and Corin (n=46).

The third dataset consists in irrigation time series collected using metering devices specifically installed during the monitoring campaign. Firstly, at the end-user scale, two radio water meters measured the irrigation delivered to a pasture and a private garden located in Montana-Village (see Fig. 4.1b). The monitoring was made at a bi-weekly time step, with the same methodology as for drinking water meters. The surfaces of the pasture and the private garden were 6700 m^2 and 330 m^2, respectively. Secondly, at the distribution scale, an electronic probe (ClaVal e-FlowMeter) was installed on the irrigation network, upstream of the vineyard area. This non-invasive meter was simply inserted into an existing control valve, avoiding engineering works on pipes. The irrigation distributed to the vineyard area was measured at an hourly time step for the 2015 and 2016 irrigation seasons, from April to October.

Finally, water users were interviewed to document their practices and collect water demand explicative factors:

- 3 municipal water managers,
- 3 professional winegrowers,
- 2 amateur winegrowers,
- 1 residence caretaker,
- 1 farmer.

4.3.2 Analytic tools

Water use regime

The water use regime is a concept proposed in this study to describe the typical temporal variability of a water use. As for the monthly flow coefficient used for characterising river regimes (the average yearly distribution of river stream flows; Kolupaila and Pardé 1933), we suggest analysing water use regimes by calculating a regime coefficient (C_r) based on the ratio of water uses to the mean inter-annual use (Eq. 1).

$$C_r = \frac{\text{Water use}}{\text{Mean inter-annual water use}} \tag{4.1}$$

In this way, normalised time series were obtained and the seasonal variability could be compared between different types of users. Then, the characteristic temporal signatures were identified and classified into different types of water use regimes. Because data were collected from 2015 to 2016, the computation of C_r was based on inter-annual values averaged over these two years.

Water use density

The water use density (WUD) is a variable proposed in this work to analyse the intensity of water uses at the spatial scale, with the aim to evaluate water uses with respect to their spatial extent. The water use density was obtained by dividing the water use by the ground-surface occupied by the water user (i.e., building's property, irrigated fields) (Eq. 2). It is expressed in volume per unit area (l/m^2) or in water heights (mm).

$$WUD = \frac{\text{Water use}}{\text{Occupied ground-surface}} \tag{4.2}$$

From the monitoring campaign, irrigation distribution volumes were transformed into water use densities by dividing them by the total area of irrigated vineyards. Similarly, raw volumes of drinking water deliveries were divided by the area of cadastral plots corresponding to the monitored buildings (Fig. 4.1b).

4.4 Results and discussion

4.4.1 Drinking water use regimes in Montana

This section presents the regimes of drinking water uses monitored in Montana. First, the regime of total municipal distribution is analysed (Fig. 4.2a). Then, the results of the monitoring campaign present regimes of water delivery to the four drinking water use basins (Fig. 4.2b). A focus is also made on delivery regimes by type of building in the Montana Resort basin (Fig. 4.3).

Regime of drinking water distribution

Drinking water volumes distributed to the entire municipality show high variations throughout the year, and dynamics with various frequencies can be observed (Fig. 4.2a). First, a long-period signal indicates a monthly seasonal variability in drinking water distribution. The highest demand season occurs in summer (July-August), with the intensity varying each year. We observe a maximum distribution of 3242 m^3/day in mid-July 2015 and a lower maximum the next year, at 2655 m^3/day in late July 2016. The winter high-demand season also varies each year and is composed of two periods: an important demand peak around the New Year period (2575 m^3/day on 31.12.2014, 2098 m^3/day on 30.12.2015 and 2256 m^3/day on 29.12.2016) and a longer period of high demand (1600-2000 m^3/day) from January to March. Low-demand periods occur in spring (March-April) and autumn (October-early December). Such seasonal regime of drinking water distribution reflects the typical behaviour of mountain tourist resorts, with two high seasons (summer, winter) and two low seasons (spring, autumn). Second, a higher-frequency variability can be observed on a weekly basis and is clearly visible during the mid-seasons (e.g., between March-May 2015 and in January 2016), indicating the increase in occupancy by temporary residents during weekends.

Regimes of drinking water delivery

Figure 4.2b shows cumulative volumes of drinking water delivered to the four drinking water basins monitored.

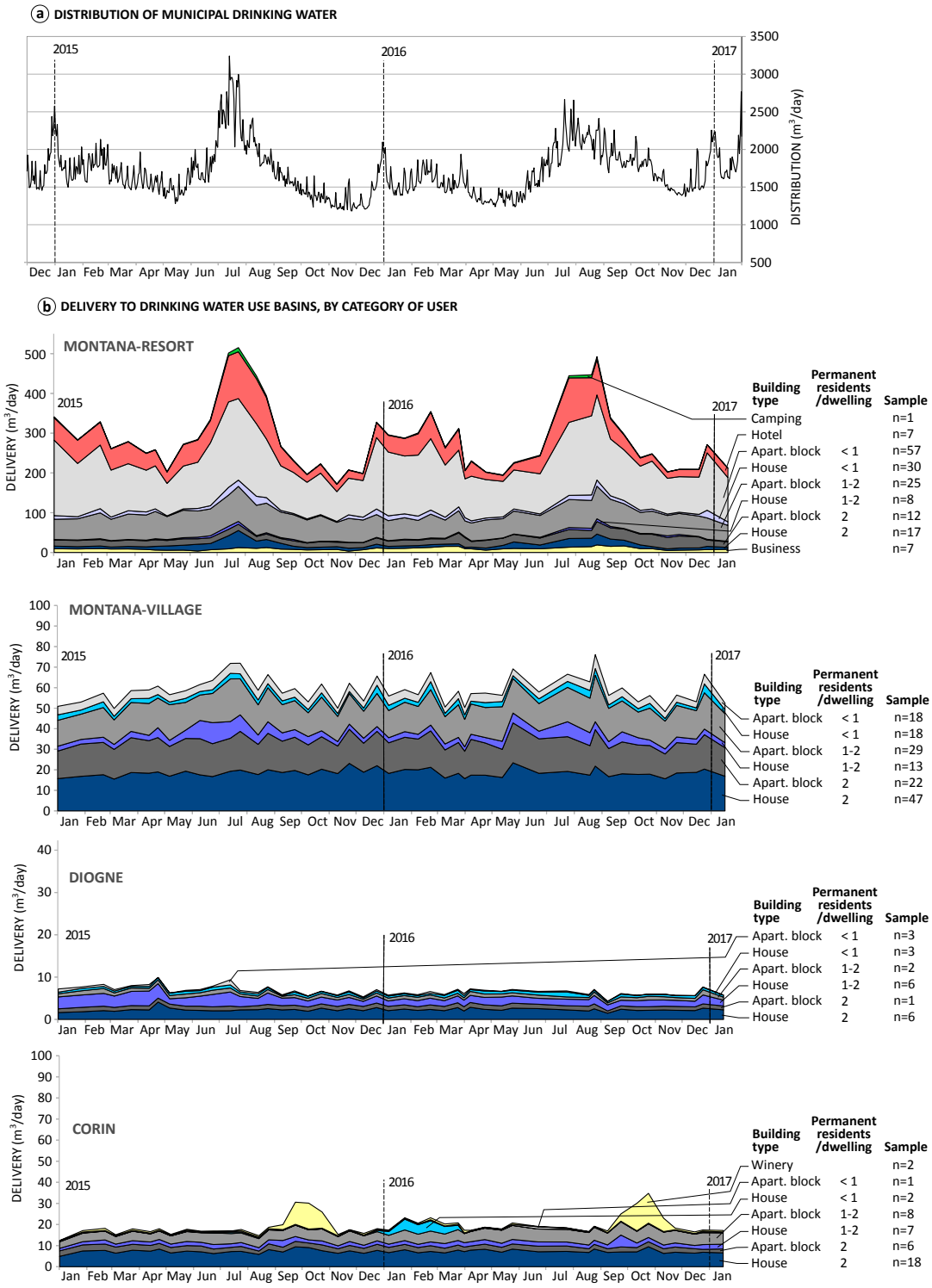


FIGURE 4.2 – Water use regimes in Montana (2015-2016): (a) drinking water distribution, (b) cumulative drinking water deliveries to water use basins, by category of user

In terms of annual volumes, results show that most drinking water (76%) is delivered to the Montana Resort basin, as it is the most important agglomeration in the municipality. The water demand seasonality of Montana Resort has therefore the greatest influence on the distribution regime at the municipal scale.

In terms of temporal dynamics, delivery time series indicate that each drinking water basin has a distinctive seasonal regime. The basins of Montana Village and Diogne do not show much seasonal variability. In Corin, important delivery peaks occur in September and October, corresponding to the increase in demand by wineries after the grape harvest. These peaks are even more significant given that the sample accounts for only two wineries. In the tourist resort, deliveries show very high seasonal variability, with a significant peak between July and August and two other peaks at the end of December and in February, with timing similar to the distribution signal. Both winter and summer increases primarily involve hotels, along with houses and apartment blocks with a very low proportion of permanent residents. This high seasonal variability in the resort is explained by the increase in temporary population due to the high number of buildings with temporary residents, compared with the historical villages, where the majority of buildings are houses with permanent residents. In winter, the observed delivery peak can be directly linked to the presence of temporary inhabitants for ski holidays or for the Christmas and New Year periods. The important summer peak cannot be explained solely by the increase in tourist occupancy because it concerns the same categories of buildings as in winter, plus houses with permanent residents. The greatest driver of water demand during this period is watering of private gardens with municipal drinking water, because the resort is not supplied by a separate irrigation network (Reynard and Bonriposi 2012; Bonriposi 2013). Apartment blocks with a high proportion of permanent residents do not show any delivery increase in summer, which can be explained by the fact that apartment blocks intended for permanent residency are generally located in the town centre and rarely feature irrigated private gardens.

Regimes of drinking water delivery in the tourist resort, by type of building

To highlight the role of the type of habitat on water delivery regimes, the Montana Resort basin was isolated to analyse the distinction between building types and the proportion of permanent inhabitants per dwelling (Fig. 4.3).

With respect to houses (Fig. 4.3a), the same high seasonal variability as for the municipal distribution is observed, with two high peaks (summer-winter) and two low seasons (autumn-spring). The higher is the proportion of temporary residents, the stronger is this bi-modal seasonality. Conversely, permanent residences do not show any winter peak. Because of the significant volumes of water delivered in summer for watering gardens, the summer peak for houses is higher than the winter peak and is observed for both temporary and permanent residences. This summer peak was more important in 2015, because the region experienced a heat wave in June and July (Calianno and Reynard 2016), whereas in 2016 June and July were rainy months. These observations highlight garden irrigation's contribution to the mix of drinking water utilisation in the resort.

Apartment blocks represent the largest deliveries in terms of volumes. This was expected, because apartment blocks have multiple households and, therefore, water delivery measured by water meters at the building scale is multiplied by the number of households. Seasonal variability for apartment blocks is not as strong as for houses (Fig. 4.3b). However, the category with less than one permanent habitant per dwelling shows a marked seasonality, with maxima in summer and winter. Also, summer peaks are less marked for apartment

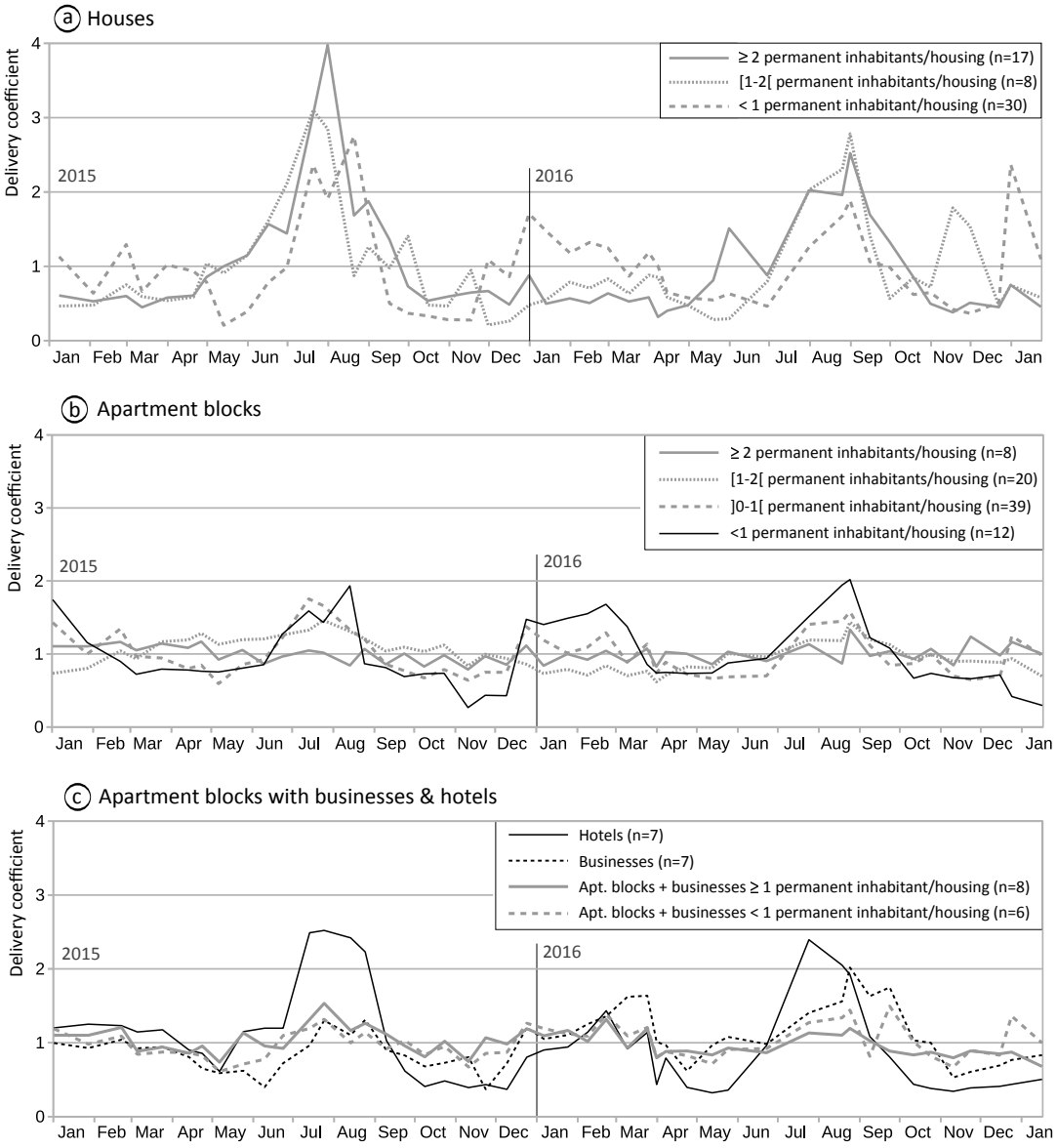


FIGURE 4.3 – Regimes of drinking water delivered to different categories of users in the Montana tourist resort: (a) Houses, (b) Apartment blocks, (c) Apartment blocks with businesses and hotels

blocks than for houses. This is related to the fact that apartment blocks are located downtown and are less likely to have a garden; if they do, watering is diluted in the water demand of multiple households. For this reason, there is less watering in summer relative to the total amount of drinking water delivered to the block.

Apartment blocks with businesses and hotels are presented in Fig. 4.3c. Hotels show a bi-modal seasonality similar to those of houses and apartment blocks with a low proportion of permanent residents, but a longer summer peak, forming a plateau in July and August. They are a good example of tourist water delivery seasonality in mountain resorts, with peaks during summer and winter high seasons and almost zero delivery during low seasons, when most hotels are closed. Apartment blocks with businesses have a relatively steady regime, similar to apartment blocks with higher proportions of permanent residents,

whereas the regime of businesses is clearly seasonal, because their activity depends on the presence of tourists during high seasons.

Such detailed analysis of delivery regimes underlines the important role of habitat configuration (presence of gardens and lawns, type of building, composition of households) and the proportion of permanent and temporary residents in buildings in the seasonality of water demand. Such factors strongly affect water demand regimes. Moreover, because summer 2015 was characterised by a strong heat wave, it exacerbated water uses related to watering and therefore, the role of irrigated gardens or lawns in the mix of water uses. These results complete the calculations made by Bonriposi 2013 and Reynard et al. 2014 on the distribution scale for the entire Crans-Montana resort.

4.4.2 Irrigation regimes in Montana

Here are presented the irrigation delivery regimes for the pasture and garden test plots (Fig. 4.4a) and the irrigation distribution regime for the whole vineyard area (Fig. 4.4b).

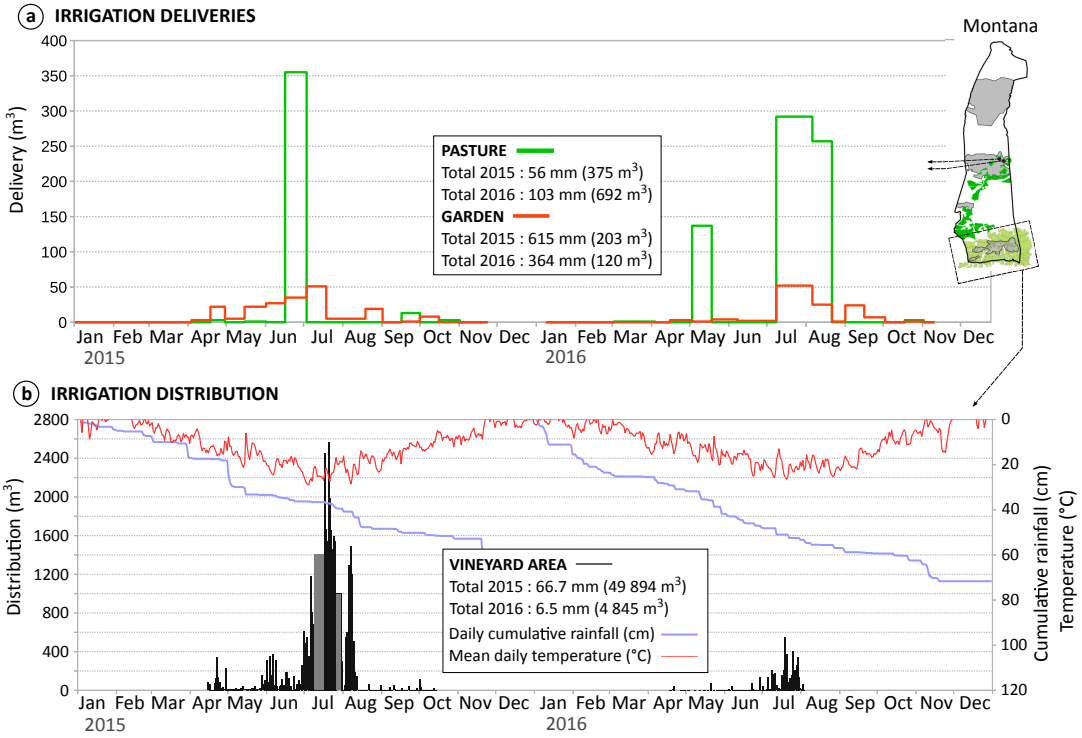


FIGURE 4.4 – Water use regimes in Montana (2015-2016): (a) irrigation water delivered to the pasture and garden test plots, (b) irrigation water distributed to the vineyard area. Grey bars in (b) indicate periods with missing data.

Regimes of irrigation at the end-user scale (pasture and garden)

The water meter installed next to the irrigated pasture shows a different delivery regime than for the garden (Fig. 4.4a).

In 2015, the private garden was watered from April to July, whereas in 2016 it was irrigated from July to September. This is attributable to the heat wave of June and July 2015 and to the humid spring in 2016 (see precipitation in Fig. 4.4b). In total, 203 m^3 were delivered in 2015 and 120 m^3 in 2016.

The irrigation of the test pasture was 375 m^3 in 2015 and 692 m^3 in 2016. The seasonality of pasture irrigation differs from year to year. Knowing that the farmer aims to apply an aerial volume of 40 mm, assuming a part of water is lost during aspersion. The pasture was irrigated once in 2015, at the end of June. In 2016, however, the pasture was irrigated three times: first in May, and mostly in July and August. This result can seem illogical because the year 2015 was much hotter and drier than 2016, but it can be explained by the seasonality of precipitation and the agricultural practices. The farmer usually irrigates twice a year, in May and July, because he makes two cuts for hay production. He explained that in 2015, he did not irrigate for the first hay cut in May, because rainfalls occurred some days before. In August 2016, he chose to put cows grazing in the plot after the hay second cut, so he had to irrigate before installing the cows to make the grass grow again.

The difference between the irrigation of pasture and garden is then really a question of seasonality: the pasture is more intensely irrigated, but only once (2015) to three times per year (2016), whereas the private garden is irrigated with lower intensity but daily for the whole summer season.

Regimes of irrigation at the distribution scale (vineyards)

The irrigation distribution time series (Fig. 4.4b) were completed using mean daily temperatures and daily rainfall, measured at the Sierre-Géronde weather station (542 m a.s.l., 3 km from Corin). Results show a high daily variability of distribution for the vineyard area during the irrigation season, along with a high inter-annual variability between 2015 and 2016.

Three periods of irrigation can be distinguished in 2015. The first was at the end of April (up to 400 m^3/day over 5 days) and was primarily related to the watering of young grape plants. A second period, longer but with the same intensity (100 to 400 m^3/day over 30 days), occurred in June. Between these two periods there was no irrigation, due to two significant rainfall events in May (Calianno and Reynard 2016). The main vineyard irrigation season occurred from 29 June to 10 August, with values up to 2600 m^3/day. The intensity of this irrigation period is a minimum because the flow-meter was blocked twice in July. The volume of irrigation water used during these gaps could be estimated through interviews with local winemakers and water managers. They were set to 1400 m^3/day for the first gap and 1000 m^3/day for the second gap. After this intense irrigation period, the first week of August still showed important distributions, but below the values of July (from 600 to 1500 m^3/day). In 2016 the total annual distribution (4'845 m^3) was lower by a factor of 10 compared to 2015 (49'894 m^3). These two years are two opposite examples of vineyard climate: 2015 was a hot and dry summer, whereas 2016 was a humid and relatively mild summer.

Such results give insights on vineyard irrigation practices in Montana. Local winegrowers believe that 30 to 50 mm of water are needed for a good watering. They irrigate once, or exceptionally twice per season. Examining the results, the maximum distribution rates in

2015 (2600 m^3/day, corresponding to 3.5 mm/day, relative to the total vineyard area) seems very low given the summer heat wave. A reason could be that some plots were not irrigated. Another reason is that not all vineyard plots are irrigated at the same time, given that the municipality enforces an irrigation calendar from July to August, allowing three irrigation *rounds* per vineyard plot distributed through this period. Considering the total irrigation during the 2015 season (66.7 mm), we can estimate that the equivalent of all vineyard plots were irrigated at least once.

2016 was a very humid season. According to our field observations and interviews, there was almost no irrigation of vineyards that year, except for plots with young grapes. The vast majority of irrigation water in 2016 in this area was used for public green spaces (football field, flowerbeds) and private gardens.

4.4.3 Water use density of drinking water and irrigation in Montana

This section presents the annual gross volumes for water uses monitored at the municipal scale (distribution for municipal drinking water and vineyard irrigation) and the water use densities of all uses in 2015 and 2016 (Fig. 4.5a).

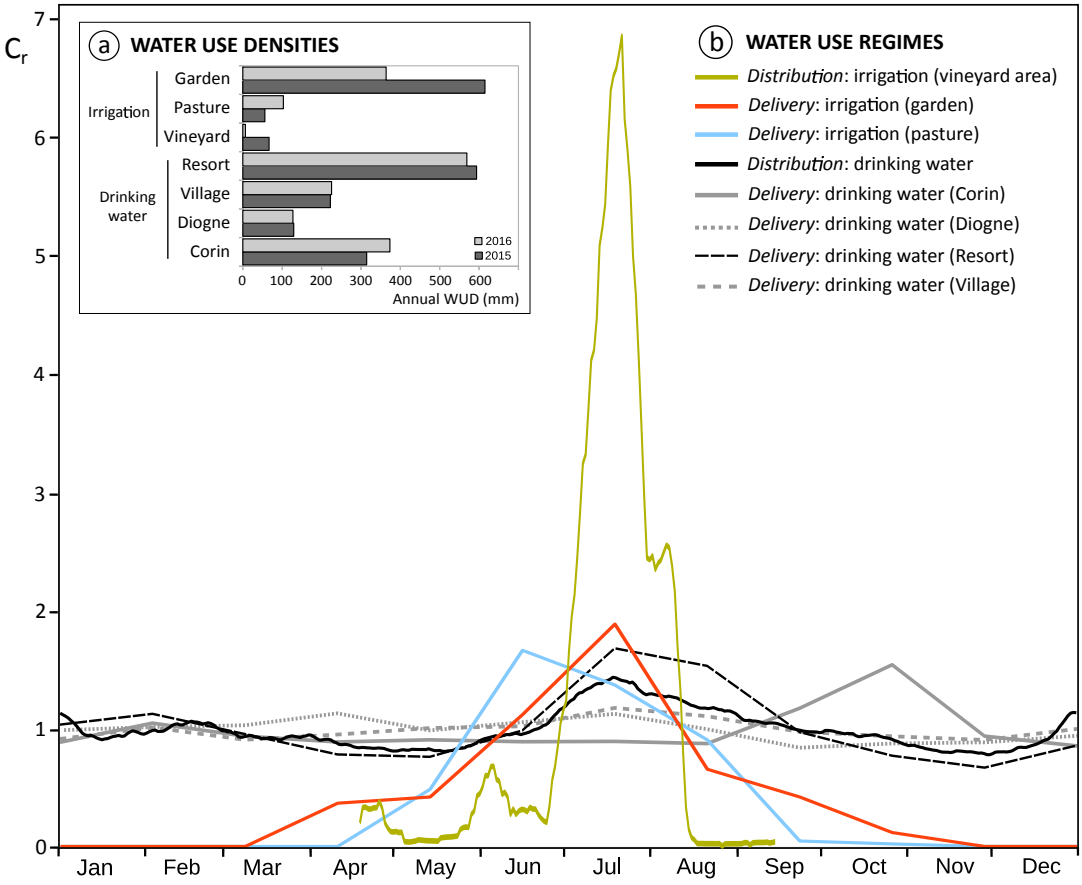


FIGURE 4.5 – Summary of water use dynamics in Montana (2015-2016): (a) water use densities, (b) water use regimes

In terms of gross volumes

The annual drinking water distribution in Montana was 618'501 m^3 in 2015 and 615 430 m^3 in 2016, whereas the irrigation distribution to the vineyard area was 49'894 m^3 in 2015 and 4'845 m^3 in 2016. When looking at the annual scale, drinking water distribution is by far higher than water used for irrigation. Drinking water distribution is constant between 2015 and 2016, whereas there is an important inter-annual variability of vineyard irrigation, related to the seasonal meteorological context.

In terms of water use density

During the 2015 heat wave, the irrigated private garden represented the highest annual water use density, with 615 mm delivered. This value is very high as it corresponds to the annual rainfall average (692 mm) in the area (Calianno and Reynard 2016). In Montana Resort the density of drinking water deliveries relative to cadastral surfaces is also high (566 mm). Values are lower for the other drinking water basins: 286 mm in Corin, 256 mm in Montana Village and 134 mm in Diogne. In comparison, the densities for the irrigation of the vineyard area (67 mm) and the pasture test plot (56 mm) are very low.

In 2016, which had a fresher and more humid summer, water deliveries to the resort represent the highest densities (569 mm), because the garden was less irrigated that year (364 mm). The vineyard area was also much less irrigated than in 2015 (7 mm), whereas water delivered to the pasture almost doubled (103 mm). Aerial annual values for Montana Village and Diogne are almost identical to 2015, and in Corin, they are higher (374 mm).

These results indicate that most of the gardens and lawns in the resort are irrigated whatsoever the climatic conditions (moreover, with drinking water), whereas there was an important decrease in irrigation for the private garden in the historic village and for vineyards with the fresher 2016 weather conditions. With respect to pasture irrigation, it seems to be more influenced by the agricultural practices than by climate conditions.

The irrigation of the garden shows a very high water use density, when compared to pastures. This result is interesting, because it contradicts the representations of local inhabitants, who regularly note the large amounts of water used by the farmers in the municipality. Because farmers' sprinklers are big and irrigate large surfaces, they are more visible than small, private garden sprinklers or vineyard sprinklers, which are spread over the vineyard area. Therefore, pasture irrigation sticks in people's minds as an important water use. In the end, in terms of water use density, garden watering is a much more important water use than was expected and it seems to be quite underestimated by the local community. Nevertheless, because irrigated pastures cover large surfaces, the overall need for pasture irrigation at the municipal scale is still relatively high, as Bonriposi 2013 and Reynard et al. 2014 suggest, throughout the region.

4.4.4 Synthesis of water uses regimes in Montana

In terms of volumes at the annual time scale, the irrigation of vineyards and pastures seems insignificant compared to drinking water uses, but considering that the vineyard covers a large area and that the irrigation regimes are highly seasonal, these quantities of water demand can exert significant additional pressure on the water resource system at precise moments of the year, especially during dry and hot periods. To analyse the role of water

use seasonality, a synthesis graph (Fig. 4.5b) plots all of the regimes monitored: deliveries to the drinking water basins (Montana Resort, Montana Village, Diogne, Corin), deliveries to the irrigated garden and pasture and distribution to the irrigated vineyard. The regimes are computed using Eq. 1 over the monitoring period (2015-2016) to represent the average seasonality of water uses on a single standardised year.

Strong differences in temporal variability are observed between water uses: drinking water is distributed constantly throughout the year, whereas irrigation occurs only during the summer months. The graph also indicates that water demand peaks for all water uses coincide in the same period in July. In Montana's resort, the summer high tourist season is the period of the year when there is a cumulative demand for both irrigation and drinking water, whereas during the winter high tourist season, higher demand for drinking water is compensated by an absence of demand for irrigation. The other villages are less subject to temporal variability, except the vineyard village (Corin), where the autumn grape harvest plays a role in the water regime.

4.5 Conclusion

This article aimed at developing the water use cycle framework (Calianno et al. 2017) at the operational level with a monitoring campaign of water uses at the end-user scale in the municipality of Montana (Switzerland). It provided the first irrigation monitoring in the area and a classification of drinking water data according to their spatial distribution, the type of building and the permanency of habitat. In parallel, interviews with water users and managers helped us to integrate the water user practices and the water management rules in the analysis. The monitoring data were studied using the concepts of water use regime, describing the seasonality of water uses with standardised time-series and the concept of water use density, expressing the territorial footprint of water use, per unit area. These tools provide a framework giving a more accurate view on the diversity and seasonality of water uses in mountain territories: data on water uses are collected at local scale and classified by users and temporal resolution go from bi-weekly to daily time steps.

The water use regime proved to be a useful concept to assess differences in demand seasonality at the intra-annual scale, knowing that water shortages in tourist mountain regions mostly occur for short time periods. Previous studies also analysed water use habits according to the habitat and socio-economic factors (March et al. 2015; Morote et al. 2016), but on an annual temporal resolution. In this work, water use regimes highlighted water demand patterns from different categories of habitat at bi-weekly time step: temporary and permanent residents; houses, apartment blocks and hotels.

Moreover, the roles of each different user behaviour in the alpine resort's global drinking water use dynamic, decribed qualitatively or with monthly data in previous studies (Paccard 2010; Bonriposi 2013; Magnier 2013; Leroy 2015) are here classified and quantified at bi-weekly time-scale through the classification of water use regimes. This local scale approach provides benchmark water use values for regional studies, in which high-frequency water demand variability are often hidden when mean annual data are used (e.g., 120 m^3/year/household) (Barbier and Montginoul 2013) or when unit water demand values (e.g., 150 litres/day/person) are obtained by down-scaling annual or monthly data simply dividing by the number of days in a year or in a month (Rinaudo 2015; Sax et al. 2016).

Nevertheless, the number of temporary residents, responsible for most of the seasonality of drinking water distribution in tourist resorts remain difficult to estimate, as (Leroy 2015) also noted.

The water use density gives a new perspective on the spatial intensity of water uses in mountain territories. The highest densities observed in Montana concern the use of drinking water in the tourist resort and the irrigation of the private garden, whereas the lowest densities are for the irrigation of pastures and vineyards. This an interesting result because these two latter uses are commonly considered as the most important by the local people, due to the impressive aspect of sprinkle irrigation.

Applied at the operational level, water use regimes and densities give a quantitative view on urban water *socio-technical* systems (Bos and Brown 2012) and on the hydrosocial cycle (Linton and Budds 2014) when taking into account all water uses at the territorial scale. Such monitoring at the local scale constitutes the kind of dataset that should be used to develop and validate integrative water management prospective models that aim to evaluate the pressure on water resources at the regional scale and the satisfaction rate for future water uses (Milano et al. 2013a, 2015; Collet et al. 2015; Grouillet et al. 2015; Leroy 2015; Fabre et al. 2016).

Concerning the monitoring, a balance between spatial and temporal accuracy must be found. On the one hand, using water demand determining factors at a rough spatio-temporal resolution enables efficient assessments, but only at large scales. On the other hand, the integration of all components of water demands at high resolution produces extremely detailed models, which, although getting closer to the complexity of human-water systems, may be too elaborated to be applied by stakeholders and difficult to apply on large surfaces due to data collection difficulties.

Acknowledgements

We would like to thank Olivier Bonvin and Bernard Cordonier of the Technical Service of Montana Municipality, and Daniel Rey, of the Municipalites of Crans-Montana Association (ACCM) for their support and transmission of data, along with the municipal technicians José Anchel Rivodigo and Claude Meyrat, for the help in the fieldwork and their knowledge of Montana's water networks. Thanks to Daniel Ré, Steve Werren (Cla-Val) and Sandro Barth (GWF) for their support with monitoring devices and water meters. We also acknowledge the water users interviewed during this work for their personnal contribution to the monitoring exercise: Frédéric Bonvin, Yves-Roger Rey, Jean-Daniel Rey, Christophe Rey, Ismaël Bonvin, Arsène and Francoise Borgeat, Pierre-Louis Mudry, Noël and Placide Cordonier, Corinne Ançay, Christian Blazer, Steeve Maillard and Stéphane Emery. Finally, we thank Georges-Marie Saulnier, André Musy and Aude Soureillat for their input on this research, and Jean-Michel Fallot, for his help in climate data processing.

Chapitre 5

Assessing water demand seasonality in mountain tourist resorts with the water use regime approach (article 3)

Martin Calianno* : Assistant doctorant, Institut de géographie et durabilité, Université de Lausanne, Bâtiment Géopolis, 1015 Lausanne, Suisse, courriel : Martin.Calianno@unil.ch

Mise en contexte de l'article dans la thèse

Cet article est la troisième publication de la thèse, qui sera soumise durant l'été 2018 à la Revue de Géographie Alpine dans le cadre d'un numéro spécial sur la thématique "eau et tourisme". Ce numéro est à paraître fin 2019, suite au colloque "Eau et Tourisme" organisé par l'Université de Lausanne, les 9-10 Novembre 2017. Il reprend les résultats obtenus durant la campagne de monitoring des usages de l'eau à Megève. Je suis cette fois-ci seul auteur pour ce travail. Toutefois, Emmanuel Reynard, en tant que directeur de thèse, a joué pleinement son rôle à renforts de corrections et conseils durant la rédaction.

Abstract

Few integrated water management investigations and water supply-demand balance models include a description of the water demand seasonality at a sufficient time scale (i.e., monthly or smaller). In this study, we apply a monitoring strategy to document drinking water delivery regimes at a daily resolution in mountain tourist resorts, which face high seasonal water demand variabilities due to the substantial numbers of temporary visitors and secondary residents. Different water users and habitats were sampled in the ski resort of Megève (France), after which a typology of water delivery regimes was elaborated. The delivery values were normalised to obtain temporal signatures and reproduce the typical water demand behaviours. The analogous method was developed to simulate the seasonality of the drinking water demand in territories where data are unavailable and for urban planning. This method is based on the use of delivery regimes as patterns to reproduce the municipal drinking water distribution signal. An analysis of the municipal drinking water distribution highlighted the predominant role of tourism seasons on the water demand seasonality relative to determinants such as the meteorological condition or snow quality.

The daily-scale monitoring results underlined the diversity of water use regimes in mountain tourist resorts. Thanks to this high temporal resolution, two types of variability were determined : low-frequency waves (tourism seasons) and high-frequency peaks (presence or absence of weekend visitors). The typology also highlighted the influence of the type of building (i.e., houses, apartment blocks, hotels, and offices) and the habitat permanency on the water delivery regimes.

5.1 Introduction

Water management is a crucial issue for tourist resorts to ensure their overall attractiveness as a tourist resource, for hydrotherapy, landscape and water and snow sports offerings (Reynard 2000b,a), and for drinking water supplies to residential and temporary populations (Gossling 2002; Kent et al. 2002; Reynard and Bonriposi 2012). The modification of visitor rates due to the globalisation of tourism, the rise of comfort requirements and the diversification of tourist resort activities tends to increase the spatial and temporal distribution of drinking water needs (Bréthaut 2012).

Pressures on water resources in tourist areas are generally concentrated during low flow periods, namely, during the summer for coastal Mediterranean resorts (Garcia and Servera 2003) and during the winter and summer for mountain resorts (Marnezy 2008). Tourist water demands may also coincide with high demands from other sectors such as agriculture and may accordingly generate conflict, as was the case for Almeria, southeastern Spain (Buchs 2016). The temporal misfit between the water demand and supply can lead to water scarcity events, which are expected to be more frequent with the predicted levels of urban and demographic growth (Vörösmarty 2000; Buytaert and Bièvre 2012) and the impacts of climate change. Studies showed that a warmer climate could lead to decreases in the water availability in the Mediterranean region (Milano et al. 2012) and shifts in river regimes with drier summers in mountain areas (Saulnier et al. 2011; Schädler et al. 2012; Beniston and Stoffel 2013; Hill-Clarvis et al. 2014). Temperature increases are also likely to increase water needs for domestic use (Montginoul 2013), artificial snow generation (Paccard 2010; Magnier 2013) and irrigation (Fuhrer and Jasper 2012).

To assess the effects of anthropogenic and climate changes on the water balance, models that couple estimations of water resources and demands within an integrated framework help to identify the conditions leading to water scarcity in regions such as the Alps (Reynard et al. 2014; Milano et al. 2015) and throughout the Mediterranean (Collet et al. 2015; Fabre et al. 2015). One remaining issue in these integrated models is the availability of water use data with a sufficient temporal resolution at the local scale. The inter-annual seasonality of the water demand is rarely known, which calls for the development of demand-side approaches (Grouillet et al. 2015) that are able to feed and validate these models with realistic water use behaviours.

The need for data to assess the seasonal variability in the municipal drinking water demand is even greater in the context of tourist resorts to help water managers ensure a sufficient water distribution during high tourist seasons (Leroy 2015).

In this work, mountain resorts are chosen for a case study because of their particular water demand seasonality. The use of drinking water in a tourist resort is similar to that

in a classic urban area and comprises domestic and municipal uses, commercial activities, crafts, water leisure and sports. However, tourist resorts have a high proportion of secondary housing and tourist accommodations, leading to strong seasonal population density variations that impact water demands throughout the year. Water demands can double over the course of a few weeks or even days and can also vary over a few hours in a single day (Bréthaut 2012; Narath and Bréthaut 2016). This seasonality also varies from year to year and depends on the attractiveness of different resorts (i.e., the weather, snow quality, and public events) according to the proportion of temporary housing. Also, the drinking water demand is dependent on the types of users and their practices, which must be identified for specific territories, as well as the spatial distribution of water demands (Calianno et al. 2018).

Previous research on the seasonality of the water demand among mountain resorts described the intra-annual variation in the water demand conceptually (Marnezy 2008). This seasonality can also be assessed using indirect data, such as the tonnage of municipal garbage (Reynard 2000b, 2001), to estimate the tourist population or by collecting available municipal data at a monthly time scale (Bonriposi 2013). Charnay (2010) also collected monthly municipal data to produce an annual balance of tourist resorts' water withdrawals in the Giffre watershed (Haute-Savoie, France).

Other studies simulated the water demand in mountain areas using integrated models. Soboll and Schmude (2011) and Leroy (2015) modeled the tourism water demand among ski areas using a multi-agent approach combining hydrology and climatic processes with demography and economy data, whereas Klug et al. 2012 differentiated residential and tourist water demand rates at the annual scale for the entire Alpine region. In most research, such rates per capita (given in units of litres per day per person) used for the calculation of water demand do not vary in time; instead, temporal water demand changes are govern by the evolution of the population (Vörösmarty 2000; Viviroli et al. 2007; Buytaert and Bièvre 2012). In their rasterised method to evaluate the water demands in the Kitzbühel region (Austrian Alps) Vanham et al. (2011) distinguished between different water uses (i.e., domestic, municipal, industrial and agricultural) at different time scales by applying a fixed per capita rate. Direct measurements of the water demands at relatively small temporal scales (i.e., shorter than the monthly scale) in mountain tourist resorts are still rare. Calianno et al. (2018) proposed a monitoring strategy for the municipality of Montana (Valais, Switzerland) that defines water demands in both space (water use basins) and time (water use regimes) and measures weekly water use time series according to the neighbourhood and the type of habitat.

There are numerous challenges in the assessment of variabilities in the water demands of mountain tourist resorts. The first issue is the availability and heterogeneity of existing data. Commonly, small mountain municipalities that include tourist resorts do not have the technical means to collect data on the drinking water distribution. Some municipalities are still without water metres and apply a flat-rate tariff, which makes water demand data at the user scale unavailable.

However, data can be available at a sufficient temporal resolution (i.e., daily or hourly) for the drinking water distribution when municipal reservoirs are equipped with monitoring systems for the management of water networks. Nevertheless, these data are generally presented at a gross spatial scale, as distribution data encompass entire municipalities. In this case, the existing time series include a multitude of different demand patterns that vary according to the user in the resort (e.g., permanent or temporary residents, hotels, offices,

and shops). Such user-scale data can also be available through individual water invoices (when they exist), but they are most often collected with a poor temporal resolution (i.e., on a yearly basis).

Accordingly, the issue of the availability of water demand data is strongly linked to the scale. For municipalities, data collection at short temporal resolutions and small spatial scales can be achieved with smart metering (Stewart et al. 2010), although this is a costly solution. Consequently, there is a need for more detailed assessments of drinking water uses in tourist resorts at the user scale to make the distinction between different stakeholders' demand patterns at a sufficient temporal resolution.

To offer such a detailed assessment of the water demand seasonality, another challenge that must be met is the estimation of the temporary population in a resort. Indeed, the number of visitors is the factor that will have the strongest effect on the seasonal variations in the drinking water demands, but the temporary population is very difficult to evaluate because it can be measured only through indirect and incomplete means, such as the number of public transport tickets or ski passes sold, the amount of household waste, the data from a tourist information census, the number of hotel bookings, or even the analysis of mobile phone signals.

Finally, the behaviours of water users and their roles on the drinking water distribution and seasonality among tourist alpine resorts are not well documented. Similarly, data regarding their drivers and other explicative factors are not available. Is the water demand variability the same among houses, apartment blocks, chalets and hotels? What are the differences in the water use regimes between temporary and permanent residents? What are the factors (e.g., the weather, quality of snow, holidays, and social events) that explain the attractiveness of a resort and the number of visitors that give rise to the corresponding water demands?

This work addresses the water demand seasonality at the local scale among mountain tourist resorts.

First, a sample of drinking water users is monitored at the tourist resort of Megève (French Alps) at a daily resolution. The time series extracted from this sample are classified according to the type of water use, habitat and residency (i.e., either permanent or temporary). A typology of different temporal water demand signatures is then created using the concept of water use regimes (Calianno et al. 2018).

This typology is then used as a pattern to develop a model capable of reproducing the actual municipal drinking water distribution time series. In doing so, we propose an *analogous method* that is operated using water use time series per "territorial unit" (i.e., the type of housing, residence permanency, or type of activity) rather than values "per capita". This model is intended for decision makers and urban planners, as it is able to predict the water demand seasonality in territories where no water use data are available.

In this paper, the Megève resort case study is presented in the first section. The second section describes the monitoring methodology in addition to the analog method and the computation of the water use regimes. The third section presents and discusses the results.

5.2 Study Area: the Alpine Tourist Resort of Megève

5.2.1 Geographic Context

The municipality of Megève is located in southwestern France, on a pass between the Aravis and Beaufortain alpine foothills with an altitude ranging from 1,027m to 2,485m a.s.l (Fig. 5.1). The tourist resort operates during the winter (with about 445 km of ski slopes) and summer (providing hiking activities, sporting events and music festivals). Given the proximity of the Geneva urban area (including its airport) and various train connections to Paris, the resort also hosts an important component of temporary residents for weekend stays.

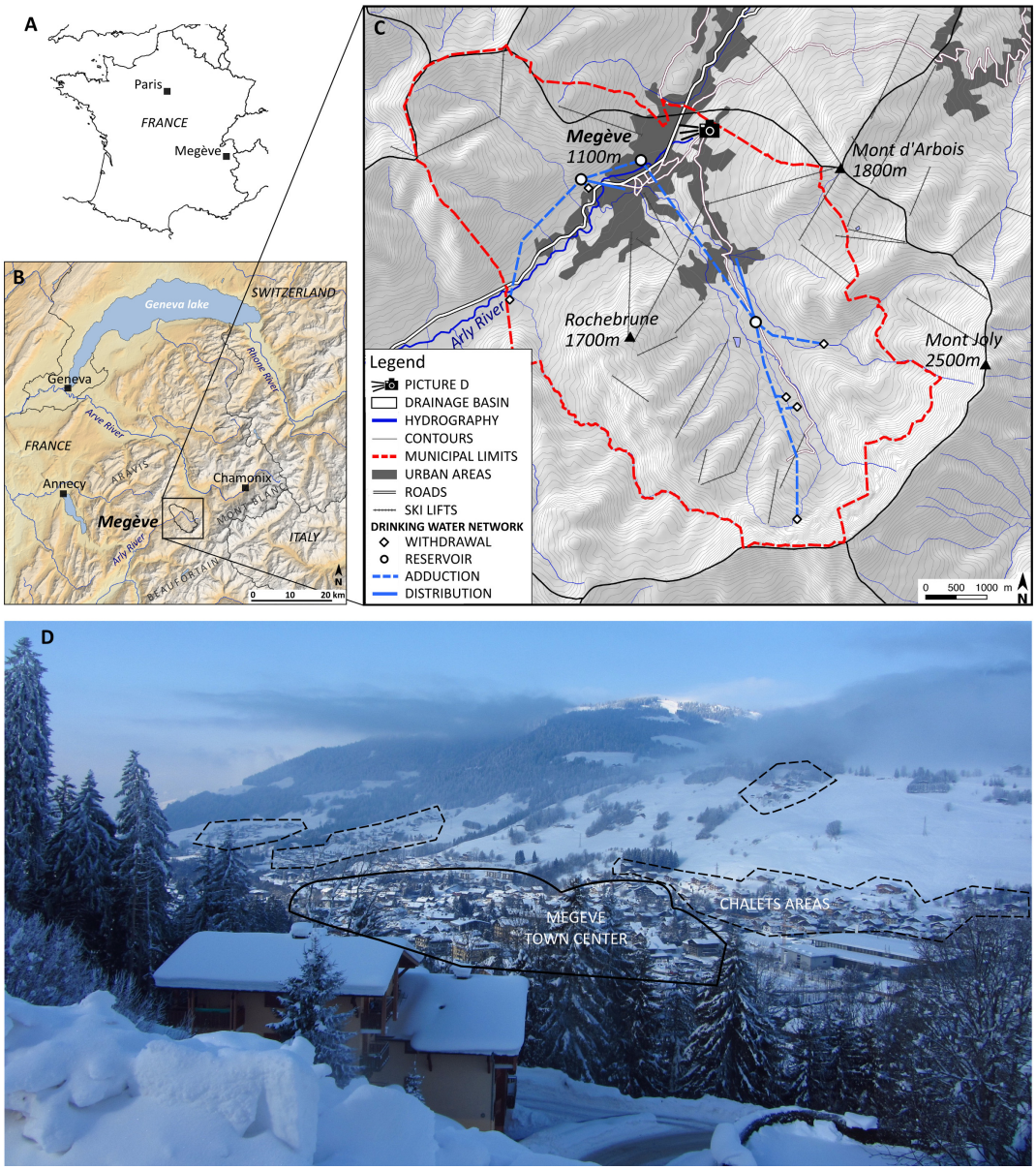


FIGURE 5.1 – Location of the municipality of Megève

The climate in Megève is alpine-continental with marked humidity (annual mean precipitation around 1,600 m; (IGN 1987)) and daily average temperatures ranging from -4.8 degrees C in December to 16.4 degrees C in July (data: MétéoFrance, period 1981-2010). The

municipality is located on the headwaters of the Arly watershed (Fig. 5.1c), which flows southwest along the Beaufortain massif.

Megève is a mountain resort with a high proportion of secondary housing. Temporary residents usually come to their second home during the summertime and during Christmas and New-Year's periods as well as for winter skiing. Megève is internationally known as a luxury ski resort. In terms of territorial development, this corresponds to a concentration of high-standard hotels and an important urban sprawl of second-home chalets. In 2014, the permanent population was 3,292 residents. That same year, the resort's accommodation capacity (comprising secondary residents and tourist beds) was estimated at 48,000 (Branchereau 2015). In addition, from a total number of 9,372 housing units, only 21.6 % consisted of principal residencies, while 76.6 % were secondary residences and 1.8 % was vacant housing (Insee 2016). Regarding the type of habitat, houses represent 18 % while apartments constitute 81 %. Finally, concerning the housing for holiday tourism, the resort had a total of 11,419 professional beds in December 2014 distributed throughout 3-star hotels (7 %), 4-star hotels (4 %), 5-star hotels (7 %), real estate agencies (53 %), tourist residences (15 %) and holiday centres (11 %) (COMETE 2014).

5.2.2 Water Uses

Megève includes a distribution network for drinking water that is described in Leroy 2015, whose work also includes water balance modelling of the municipal drinking water management scheme that required some assumptions concerning the values of drinking water demands. We chose Megève as a case study to deepen the analysis of demand regimes with respect to domestic uses of municipal drinking water.

Most of the water use in Megève is related to drinking water for domestic, leisure (i.e., sport centres and pools), livestock and municipal uses. An important share of the spring water withdrawn by the municipality is also used for hydropower production through a turbine located downstream within the village. The main water resources are withdrawn from springs located throughout the Mont-Joly foothills, which are located inside the municipal territory (Fig. 5.1c).

The delivery of drinking water is a public service that is managed by the municipal administration. The water distribution (i.e., the volumes leaving the principal reservoir to the network) and the water height in the reservoirs are continuously monitored by water authorities to ensure the daily management of drinking water services. Every building connected to the drinking water distribution network has its own water metre for volumetric billing. A binomial pricing scheme is applied with an annual fixed subscription (including the water metre lease) and a volumetric fee (including taxes for drinking water distribution and wastewater treatment). The water metres are controlled manually every year by the municipal water authority to prepare the bills. After 2015, the water service authorities started to equip the water metres with radio transmitters to facilitate data collection. In early 2017, about 450 radio water metres were installed. However, data collection is still conducted on an annual basis.

In 2014, 2,979,228 m^3 of spring water was withdrawn. From this volume, 606,968 m^3 (20.4 %) was distributed for domestic use, 1,970,111 m^3 (66.1 %) was used for hydropower production, 100,242 m^3 (3.4 %) was sold to the ski area company for artificial snow generation purposes, 14,883 m^3 (0.5 %) was employed for technical purposes, 31,491 m^3 (1.1 %) was

used for public fountains and 255,533 m^3 (8.6 %) constituted distribution losses (Branchereau 2015).

In addition to those for drinking water, water uses in the study area include water for cattle in alpine grasslands obtained from surface water and artificial snow generation, which typically uses surface water stored in hill reservoirs. However, when those reservoirs are empty, snow makers can buy water from public drinking water reservoirs provided that there is enough storage to ensure deliveries for domestic uses.

5.2.3 The Water Use Cycle

To describe and assess the uses of drinking water, we base our analysis on the concept of a water use cycle (Calianno et al. 2017), which distinguishes the different water fluxes associated to a water use system : withdrawal (from the resource system), distribution (to the entire network), delivery (at the user scale), demand and need (considered non-measurable) and restitution (to the resource system) (Fig. 5.2). This water use cycle is used to identify the volumes of water that are monitored within a water network system and discern the stages in which those volumes are measured.

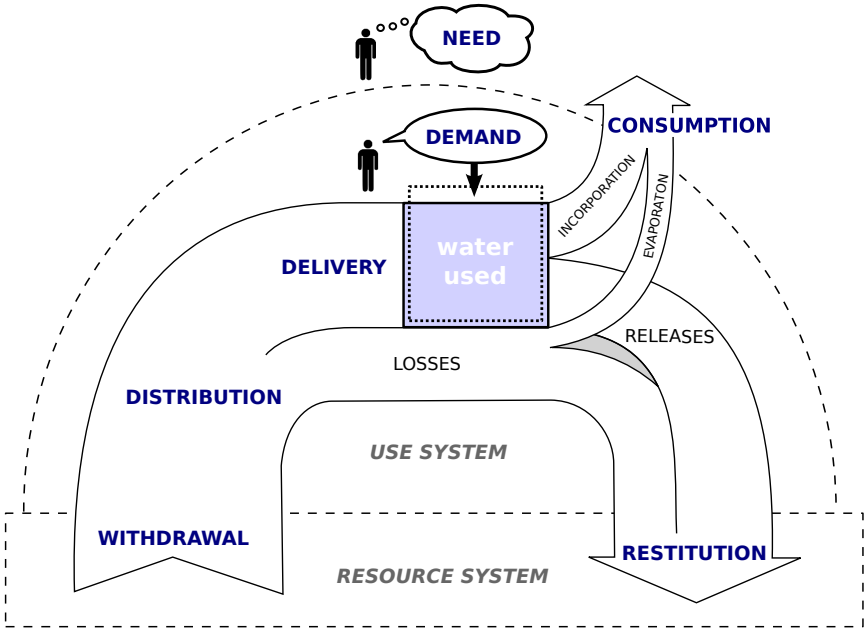


FIGURE 5.2 – Water use cycle

5.3 Methodology

This section presents the collection and analysis of the available distribution data, the monitoring of the water delivery setup on a sample of drinking water users in Megève, and the tools used to evaluate the water demand seasonality, namely, the delivery regime approach and the analogous method (Fig. 5.3).

5.3.1 Municipal Drinking Water Distribution

The daily drinking water distribution time series were collected from Megève's municipal water services during the period from January 2015 to June 2017 (Fig. 5.3a). Explicative

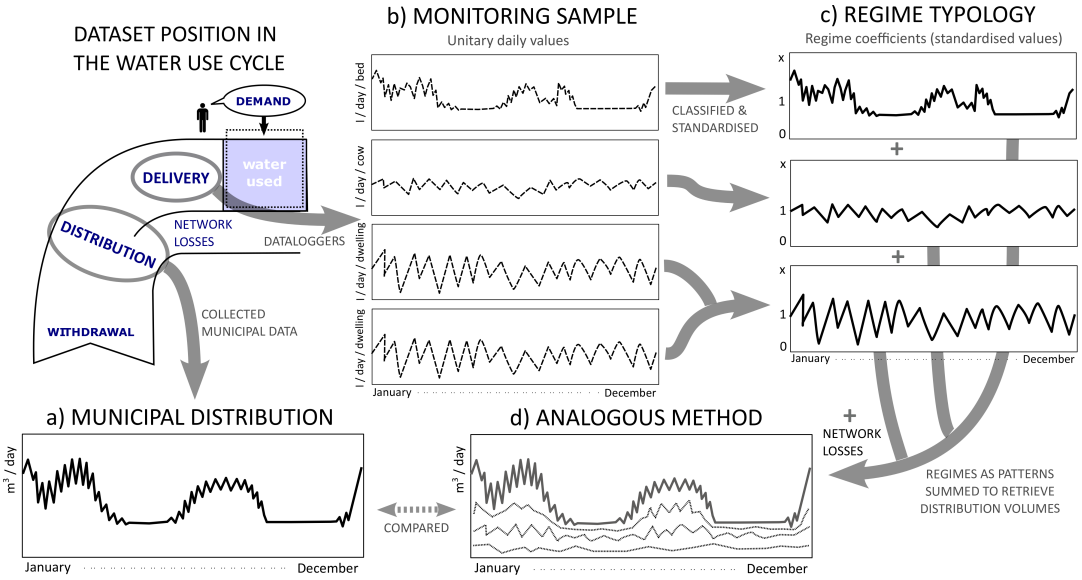


FIGURE 5.3 – Schematic synthesis of the methodology

factors, including temperature, snow height, rainfall, and nebulosity data in addition to bank holidays, school holidays and social events, are added into the distribution time series.

5.3.2 Monitoring of Drinking Water at the Delivery Scale

Data were specifically collected at the delivery scale for this study (Fig. 5.3b) using municipal water metres. Drinking water deliveries were monitored for a specific sample of users to collect hourly time series. The choice of the sample users was made in collaboration with the municipal water services to document the widest variety of drinking water user profiles throughout Megève (Table 5.1). Thus, different characteristics of users are represented, including the type of activity (offices, housing, farms, shops, and hotels), the type of habitat (either a house or an apartment block) and the regime of residency (either permanent or temporary).

	Sample	Residency	Characteristics
A	Offices	Permanent	33 work places
B	House 1 (chalet)	Permanent	garden, outdoor pool
C	House 2	Permanent	garden
D	House 3 (chalet)	Temporary	garden, indoor pool
E	House 4 (chalet)	Temporary	garden
F	Hotel 1	Temporary	4 stars, 280 beds, spa, 2 pools (indoor, outdoor), restaurant
G	Hotel 2	Temporary	5 stars, 48 beds, spa, indoor pool, restaurant
H	Apartment block	Permanent	5 housings
I	Apartment block & shops	Temporary + permanent	39 housings (shops included)
J	Farm (housing)	Temporary	garden
	Farm (barn)	Temporary	31 milk cows, milk room

TABLE 5.1 – Sample of buildings chosen for monitoring.

Data loggers were installed on the water metres of the sample of users. The data loggers were used to measure the water deliveries at an hourly interval following November 2014;

farms, however, were manually monitored in 2015 at a monthly time step. The results are shown here from January 2015 to June 2017.

Hourly data logger time series of the water deliveries were disaggregated into daily time series to obtain a clearer signal over the whole year. To generalise these data, the raw delivery values (in litres/day) were transformed into unitary delivery (UD) values by dividing the raw values by the number of housing units in apartment blocks (litre/day/dwelling), the number of beds in hotels (litre/day/bed), the number of work places in offices (litre/day/work place) and the number of cows in barns (litre/day/cow). A moving average ($\pm$ 4 days) was added to obtain a virtual weekly variability.

5.3.3 Water Delivery Regimes and Typology

The sampled delivery time series were standardised (Fig. 5.3c) to produce water delivery regimes to compare the dynamics between the users of different raw deliveries (Calianno et al. 2018). We used a daily delivery regime coefficient (DRC_i), which is a normalised value obtained by dividing the daily average water deliveries over a certain period by the mean inter-annual value (Eq. 1).

$$DRC_i = \frac{MD_i(daily)}{MD(inter-annual)} \tag{5.1}$$

where:

$MD_i(daily)$ is the value of the delivery on the considered day averaged over several years,

$MD(inter-annual)$ is the mean delivery over the considered period, and

i is the considered day.

Complete annual data were available for 2015 and 2016, and thus, the daily values were averaged over these two years. A DRC_i value of zero represents no water delivery, while a DRC_i value of 1 means that the water delivery is equal to the inter-annual mean.

The regimes were then selected and classified to obtain a typology of the water delivery seasonality corresponding to the specific habitat, water use or residency (i.e., either temporary or permanent).

5.3.4 The Analogous Method

To reconstruct the water use dynamics at the municipal scale when data on water uses are not available for a territory or for urban planning, we propose the analogous method (Fig. 5.3d). This method is based on the typology of water demand regimes at the user scale, previously defined. From this typology, regime patterns are extracted to recreate the municipal distribution signal using the following steps.

1. Define the water delivery patterns (using the regime coefficients) at the user scale to define a typology that represents the diversity of the water use dynamics within the chosen territory.
2. Multiply each pattern by its inter-annual average unitary value (litre per day per dwelling, bed, work place or cow).
3. Multiply each pattern by the number of units, namely, dwellings (temporary or permanent), beds, works places, and cows, present within the territory.

4. Sum the volumetric regimes obtained (in litres/day) to recreate a synthetic drinking water distribution signal, and then add an estimated proportion of network losses (e.g. 20%).

The analog method is formalised in the following equation (Eq. 2).

$$(1 + l/100) * \sum_{pattern=1}^{n} DRC * UMD(inter - annual) * u \tag{5.2}$$

where:

DRC is the normalised daily delivery regime,

$UMD(inter - annual)$ [litre/day/unit] is the unitary mean delivery over the considered period (units can be: dwelling, work place, bed, cow),

u is the number of units present throughout the municipality,

l [%] is the percentage of water loss in the municipal network (from 0 to 100%).

The number of units present in Megève are reported in the following list.

- Houses with permanent residents : 305 dwellings
- Houses (chalets) with temporary residents : 1,388 dwellings
- Hotels : 11,036 beds
- Apartment blocks with permanent residents : 1,367 dwellings
- Apartment blocks with temporary residents : 6,226 dwellings
- Offices : 150 work places
- Barns : 870 cows

We assumed that the municipal proportion of secondary (83%) and permanent residences (18%) were the same for both houses and apartment blocks. We also estimated the number of work places of the municipality (150). The distribution network loss rate was set to 0.2 (i.e., a 20% loss from the principal reservoir during delivery to the users).

5.4 Results

This section presents the results obtained from the analysis of the municipal drinking water dynamics, the typology of water use regimes obtained from the monitoring of drinking water deliveries and the reconstruction of the drinking water distribution dynamics derived using the analogous method.

5.4.1 Municipal Drinking Water Distribution

Dynamics

The time series of the municipal drinking water distribution from February 2015 to June 2017 (Fig. 5.4) has a marked variability with values ranging from 1,500 m^3/day in May 2015 to above 6,000 m^3/day in January 2017.

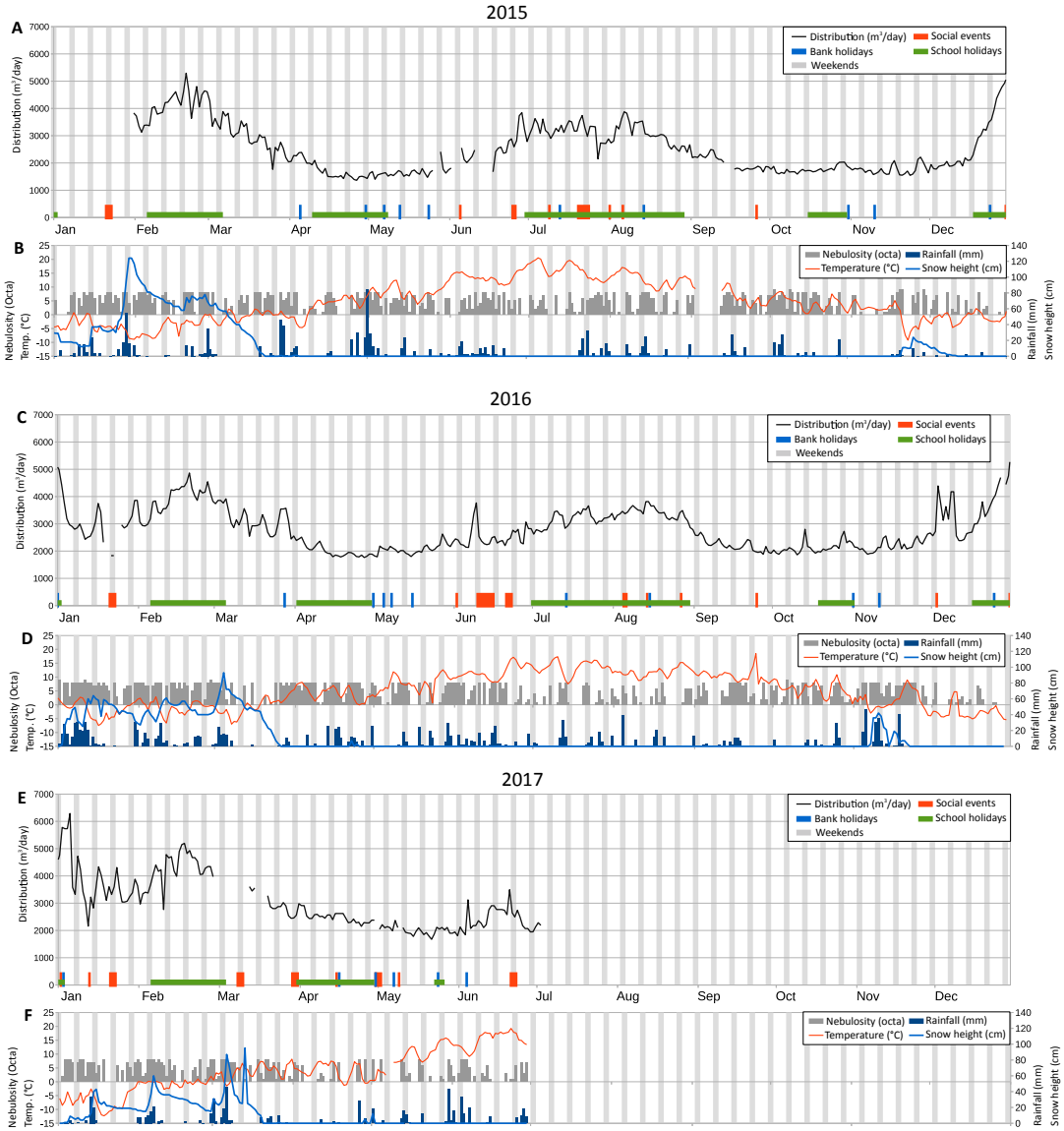


FIGURE 5.4 – Municipal drinking water distribution in Megève and explicative factors. The blank parts in drinking water distribution time series corresponds indicates periods without data.

Two types of dynamics in the drinking water distribution are observed and are closely related to the variation in the temporary population (tourists and temporary residents) present in the resort at both low frequencies (on a monthly scale) and high frequencies (on a weekly scale). Such a regime with two levels of variability is generalised in Fig. 5.5.

The analysed years (2015, 2016 and the first half of 2017) commonly exhibit low-frequency waves with high distribution rates from the end of December to early January, from February to March, and from July to August. These peaks correspond to high tourism seasons, namely, Christmas, New Year's, and school holidays in Februrary for winter sports and in July-August for summer activities. The winter peaks have the highest rates (above 5,000 m^3/day), whereas the summer peaks are lower (from 3,000 to 4,000 m^3/day). The parts of the low-frequency waves with low distribution rates occur from April to June and from September to early December and correspond to low tourism seasons in the spring and autumn.

In parallel, high-frequency peaks with increased distribution rates on the weekends form shark-tooth shapes that are mostly detected during the high tourism seasons (winter and summer) and during the mid-season periods (January, March and December). These high-frequency peaks are stronger during the winter high season than during the summer high season, thereby indicating the stronger influence of visitors coming for weekend ski trips relative to visitors coming for summer weekend trips.

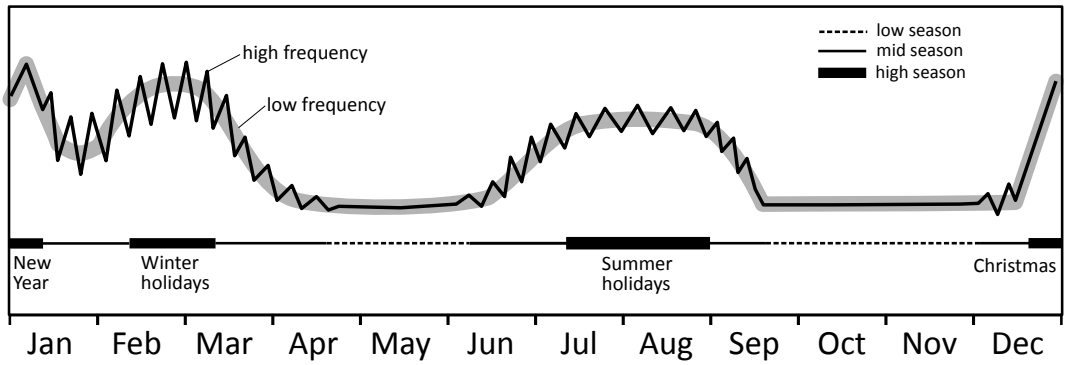


FIGURE 5.5 – Schematic representation of Megève's municipal drinking water distribution dynamic

Determinants

The external factors added in Fig. 5.4 highlight the determinants of the the drinking water distribution.

Tourist seasons linked to school holidays appear to have the strongest influence with low-frequency dynamics during the winter skiing holidays (February), the summer holidays, and the Christmas and New Year's periods (see Fig. 5.5). These seasons are the periods of the maximum tourist occupation in the resort. The amplitudes of the low-frequency waves were similar for 2015, 2016 and 2017, though the climate was quite different between these years. 2015 was characterised by a dry and warm period during the late spring and summer with the occurrence of a heat wave over the plains from mid-June to July. Meanwhile, the spring in 2016 was very humid, and the early spring in 2017 was exceptionally dry and warm. The winter seasons of 2015 and 2016 were quite similar in the sense that the first snowfall occurred very early (November) and was followed by an abnormally dry and warm period in December, which caused the Christmas and New Year's periods to be without (natural) snow in the ski resort. Snow finally fell in January and remained until only mid-March for the three years. 2015 had the better winter skiing season with more precipitation and steadily low temperatures (Fig. 5.4B), whereas 2016 (Fig. 5.4D) was humid and excessively warm, and 2017 (Fig. 5.4F) had a cold period in January with little precipitation, followed by a warm period in February, leading to low snow heights.

Accordingly, the climate (i.e., temperature, nebulosity, snow height and rainfall) appears to have little influence on the low-frequency distribution peaks; tourists seem plan long-duration stays at the resort, regardless of the meteorological conditions during the summer or the snow height during the winter. Such situations are observed for the Christmas and New Year tourist periods of 2015 and 2016, both of which were absent snow but still exhibited important water demand peaks. This is also due to the high proportion of secondary homes in Megève, where families come for the winter and summer holidays, regardless of

the meteorological conditions. Also, it is interesting to note that there was no rise in the distribution during the Easter and Toussaint (autumn) school holidays corresponding to low tourism seasons at the resort, as the ski tracks are closed and the weather is unsuitable for hiking.

However, temperatures, nebulosity conditions, bank holidays and social events play significant roles on the high-frequency distribution dynamics during the summer and mid-season periods (late winter in April and early summer in June). The drinking water distribution at the weekend scale rises even more during a bank holiday weekend, a social event (e.g., music festival or sport tournament) or a sunny, dry and warm period, especially during the mid-season periods (December, January, March and June), but these weekend peaks also add up to low-frequency peaks during the high-tourism summer and winter seasons.

5.4.2 Monitoring Sample : Drinking Water Delivery

The raw samples from the monitored drinking water delivery time series (see Table 5.1) are presented in Fig. 5.6. Continuous daily time series are available from January 2015 to June 2017, although some periods are without data due to technical issues with the data loggers.

Similar to the municipal drinking water distribution regime, high-frequency peaks in the delivery rate are observed for every user. However, low-frequency waves (represented with a greyish moving average line) are observed only for buildings with secondary residents or temporary activities, including secondary houses (Fig. 5.6C,D) and apartment blocks with temporary residents (Fig. 5.6H), hotels (Fig. 5.6E,F) and farms (Fig. 5.6J).

Houses and apartment blocks with permanent residents (Fig. 5.6A,B,G) as well as offices (Fig. 5.6I) show daily rates varying at high frequency on a weekly basis, but their rates remained close to the average throughout the year.

Numerous interesting abnormalities can be observed, and they are discussed hereafter.

- Houses with permanent residents (Fig. 5.6A,B) show short periods without any water delivery; these periods certainly correspond to holiday periods when the houses are empty. These zero-delivery periods are not observed for multi-residence buildings with permanent residents (Fig. 5.6G), indicating that those buildings are not fully vacated by all inhabitants during holiday periods.
- House 2 with permanent residents (Fig. 5.6B) has higher average deliveries in 2016 and 2017 compared to 2015 due to changes in the occupants that can be detected from a one-month zero-delivery period in November. This is an example of the variability in the water demand per dwelling, as the first family was composed of two adults and one child, whereas the second family comprised two adults and two young children.
- House 3 with temporary residents (Fig. 5.6C) is a special case, as it has exceptional delivery peaks (exceeding 20,000 litres/day) during the winter periods. The reason for these peaks is that this chalet is used for luxury rentals and includes an indoor pool that is emptied before every stay. Due to its signal, this temporary residential house is excluded from our typology of delivery regimes.
- Other abnormal peaks, which are probably due to the filling of pools, are observed for House 1 during March 2016 (Fig. 5.6A) and for Hotel 2 (Fig. 5.6F) during the low tourism season in 2015 (spring and autumn) and 2016 (spring). Peaks attributed to leaks are also seen during November 2015 (Fig. 5.6G) and in late January 2016 (Fig. 5.6I).

Aside from House 2, which had a change of occupants, there is no inter-annual variability throughout the three observed years in the sample. The temporary water uses with seasonal low-frequency waves (Fig. 5.6C,D,E,F,H) have the same timing and magnitude over the years, whereas the permanent water uses (Fig. 5.6A,B,G,I) show high-frequency peaks that stay close to the inter-annual mean.

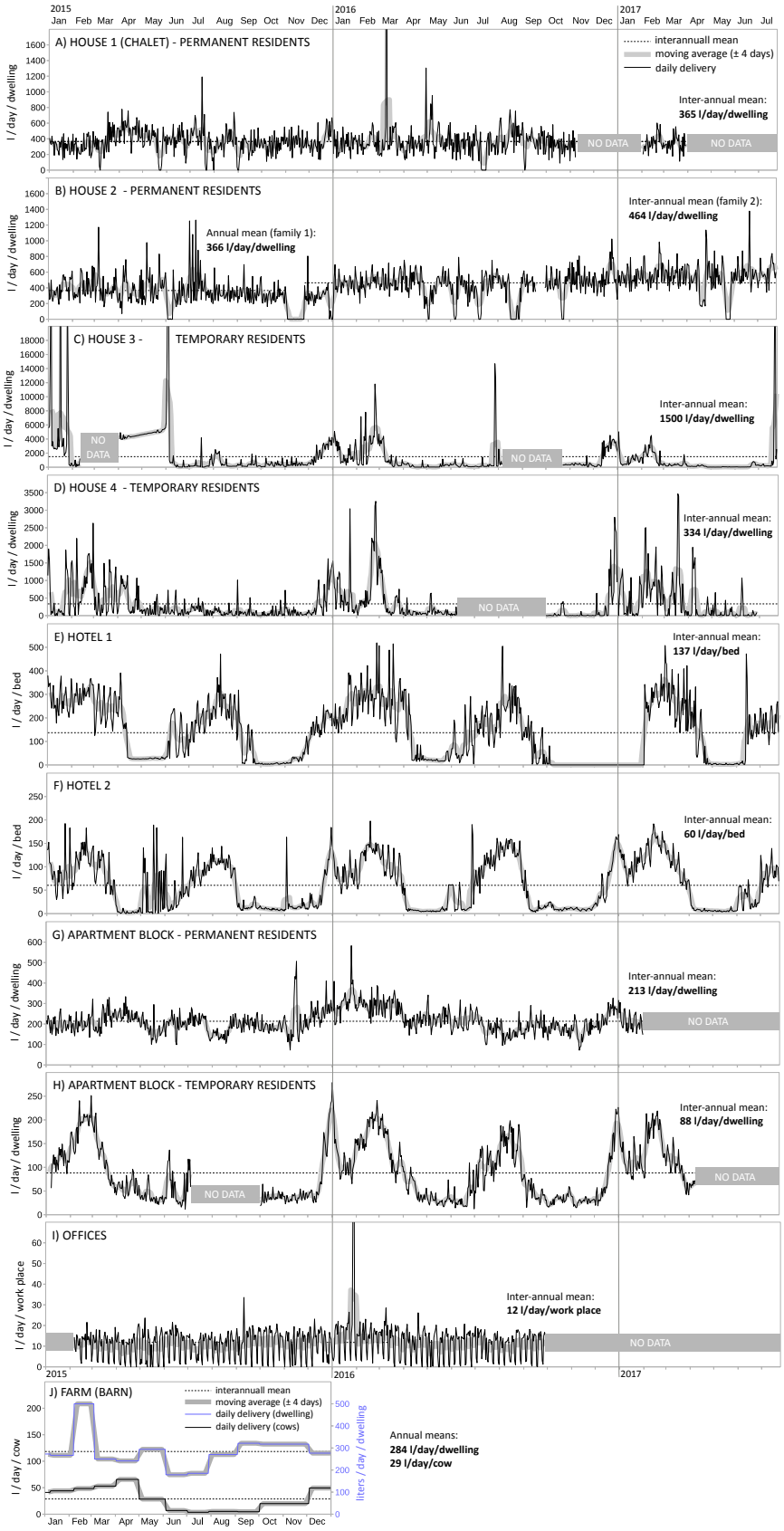


FIGURE 5.6 – Drinking water deliveries to the monitored sample

In terms of their absolute values, House 1 and House 2, both of which have permanent residents, demonstrate similar annual average deliveries of 365 and 420 litres/day/dwelling, respectively. Knowing that two people are living in House 1, the annual average delivery was 183 litres/day/person. Considering the change of occupants in House 2, the first family (3 people) was at 122 litres/day/person, and the second family (4 people) was at 116 litres/day/person. These values are quite in accordance with the French average of 151 litres/day/person for 2008 (Barbier and Montginoul 2013) and with the knowledge that the higher value of House 1 can be explained by the presence of a pool. For House 2, the children are counted as adults, thereby providing "per capita" values that are lower than the national average. It is difficult to know if this is caused by lower water demands from children or if these families simply exhibited lower water demands than the French average.

Although Hotel 1 and Hotel 2 are both classified as five-star hotels, they have quite different annual average deliveries of 137 and 60 litres/day/bed, respectively. This can be explained by the fact that Hotel 2 has more beds than Hotel 1.

5.4.3 Typology of Drinking Water Delivery Regimes

A typology of water delivery regimes was constructed from the sample of drinking water time series monitored at the user scale in Megève. The raw time series were first standardised to obtain the DRC_i values (Eq. 1), after which a selection process was conducted by extracting the most characteristic time series per type of user.

The time series with similar signals (e.g., House 1 and House 2) were averaged together to obtain a single regime per type of user. Also, the time series for Hotels 1 and 2 were averaged to create a single global hotel regime. Moreover, the outlying House 3 time series was excluded, and abnormal peaks due to leaks were removed. The final typology is listed below.

- Houses - permanent residents
- Houses (chalets) - temporary residents
- Hotels
- Apartment blocks - permanent residents
- Apartment blocks - temporary residents
- Offices
- Farms (barns)

The corresponding regimes are presented in Fig. 5.7 and are discussed in the following subsections.

Houses (Permanent Residents)

The single-family house water regime (Fig. 5.7A) shows higher daily and weekly variabilities than those of apartment blocks. The annual unitary average delivery (382 litres/day/dwelling) of the single-family house regime is also higher than that of the apartment block regime due to the presence of gardens and because some water uses (e.g., laundry facilities and central heating) cannot be shared. Periods of non-occupancy as well as Christmas peaks can be observed. However, at the monthly scale, there is no marked seasonality, and the daily variability stays constant around the annual average. This is due to permanent residency,

where the household water demand is sustained throughout the year, except during holiday periods.

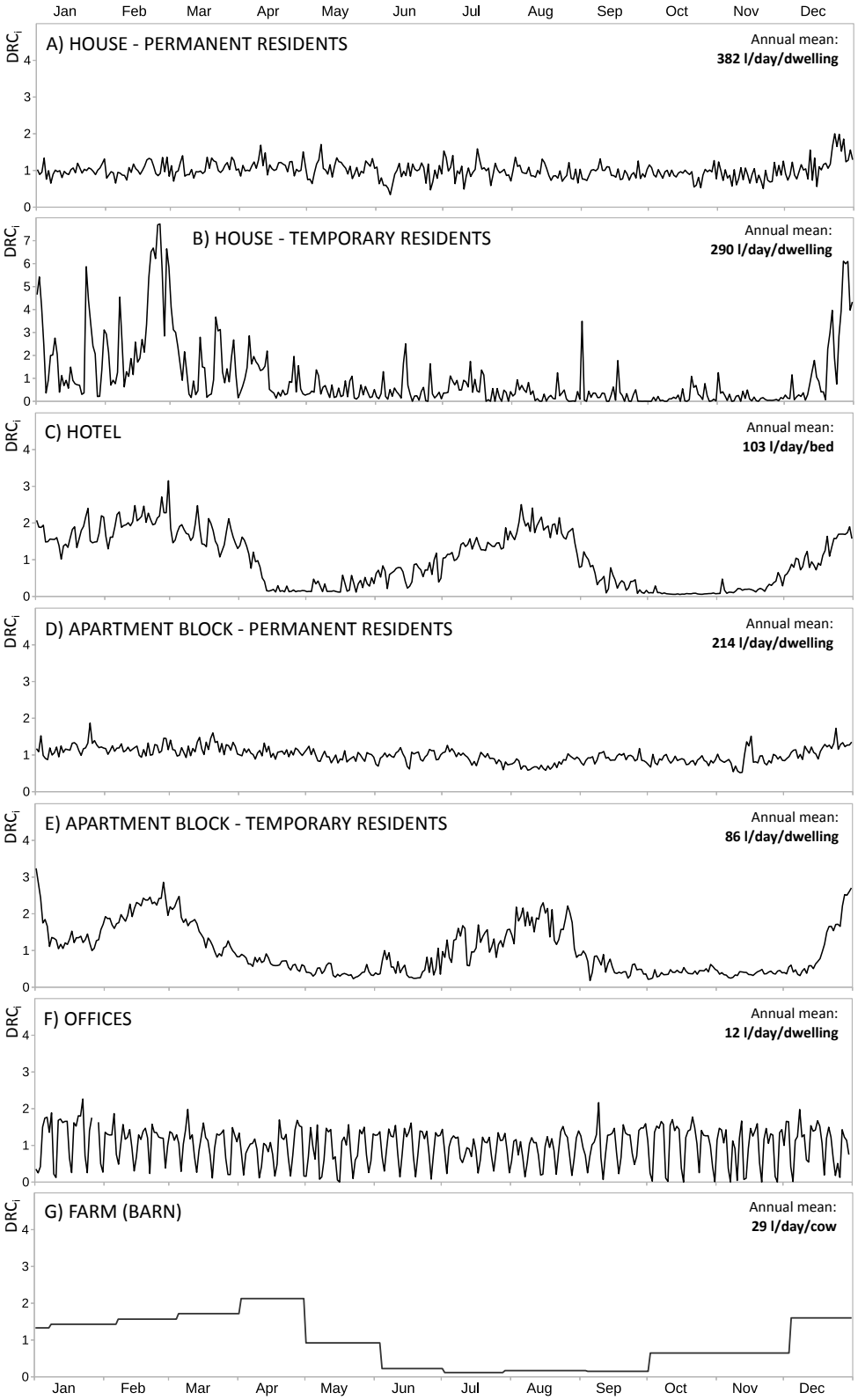


FIGURE 5.7 – Typology of drinking water delivery regimes with their annual mean unit values

Houses (Temporary Residents)

This delivery regime is typical of a single-household, second-home chalet (Fig. 5.7B) with a preference for winter occupation. It shows very large variabilities at both the weekly and the seasonal scale. DRC_i values above 6 are observed during periods of occupancy, which are mostly concentrated during the Christmas and New Year's periods and during the winter season (late February). Weekly peaks are also observed during the winter mid-seasons (in January and from March to April). Throughout the rest of the year, the delivery values are close to zero, although small peaks with DRC_i values of approximately 2, which are probably due to periodical cleanings of the chalet, are constantly observed. The annual average delivery for this regime is 290 litres/day/dwelling, which is quite high since this type of chalet is unoccupied most of the time.

Hotels

The water delivery regime of a seasonal hotel (Fig. 5.7C) shows high seasonal and clear weekly variabilities. The hotels are closed and demonstrate null DRC_i values during low-season periods (late April to early June and October to November) and are busy during high-season periods with ratios of approximately 2 (from July to early September and from December to early April). The weekly variability is mostly observed during mid-season periods in late January and from March to early April, which is when the majority of people stay during weekends. The annual averaged unitary delivery value is 103 litres/day/bed. This value must be taken cautiously, because it is dependent on the fullness of the hotel.

Apartment Blocks (Permanent Residents)

The water delivery regime for an apartment block with permanent residents (Fig. 5.7D) shows two characteristics. First, there is very little variability at the seasonal scale due to permanent residency; the ratios stay close to the annual mean throughout the year (DRC_i values between 0.6 and 1.4). Second, the daily and weekly variabilities are weak. This is due to the steady domestic water demand from permanent residents. Also, because an apartment block is composed of several housing units, the daily and weekly variabilities of each household are averaged together to produce a smoothed signal relative to single-housing habitats, as a water metre takes accounts for the water supply for the whole building. The annual unitary average is 214 litres/day/dwelling.

Apartment Blocks (Temporary Residents)

This regime (Fig. 5.7E) is representative of typical mixed buildings that can be seen in tourist resorts. These buildings are composed of permanent and temporary housing units as well as shops with displays on the street, but most of the housing units are temporary. The water delivery regime for this type of building shows a strong seasonal aspect in contrast to that of a permanent apartment block. Two high-season delivery peaks are visible during the winter from February to March (DRC_i values above 2.5) and in December for the New Year's celebrations. There is also one peak during the summer from July to August (DRC_i values above 2). Two low-season periods are visible with coefficients of approximately 0.5 from April to June and from September to early December. As for apartment blocks with permanent residents, the daily and weekly variabilities seem to be attenuated by the number of households present in the building. Also, because of the high proportion of temporary

residences, most of the housing units are empty for most of the year, leading to very low annual unitary delivery values (86 litres/day/dwelling).

Offices

The delivery regime of an office (Fig. 5.7F) shows a typical signal with a serrated shape at a weekly interval (with DRC_i values of 0 on the weekends and from 1 to 1.5 during the week). However, at the seasonal scale, the delivery stays steady around the annual mean. This regime directly correlates to the life cycles of administrative buildings and businesses, which have constant occupancy rates throughout the year but are unoccupied at night and during the weekends. For that reason, and primarily because water needs in offices are limited in comparison to domestic uses (i.e., offices have no showers or baths, host only one meal per day, and have no washing machines), the unitary annual mean (12 litres/day/work place) is very low.

Farms (Barns)

Finally, municipal drinking water in Megève is also used for cattle watering purposes during the winter, which is when milking cows are brought back from summer alpine pastures to stay in barns (Fig. 5.7G). This seasonal alternation is clearly observed within the water delivery regime, as DRC_i values are close to zero from June to October and begin to rise from November to reach a maximum of 2.1 in April. This regime is interesting because it exhibits the period of water use for cattle watering purposes as well as an increase in the water demand during the early spring, which is when the temperatures gradually increase and the cows need more water.

5.4.4 Reconstruction of Drinking Water Distribution Dynamics Using the Analogous Method

A synthetic signal of Megève's municipal drinking water distribution was created using the analogous method (Fig. 5.8). To facilitate a graphical interpretation, the cumulative water volumes corresponding to each water use regime are ranked from less seasonal to more seasonal.

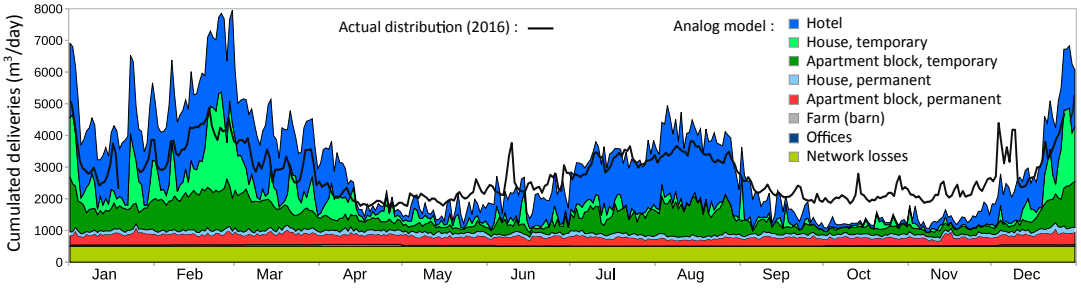


FIGURE 5.8 – Modeling of drinking water distribution dynamics from the water delivery typology, using the analog method

This reconstruction effectively reproduces the dynamics of the municipal drinking water distribution: low- and high-frequency periodic signals corresponding to seasonal- and weekend-scale variations, respectively, are clearly visible. Peaks at the weekend scale are clearly marked and, similar to the original distribution signal, are stronger during winter

than during the summer. In addition, the summer seasonal wave is correctly reproduced as being lower than the winter wave (including the Christmas, New Year's and February school holidays).

Season	Distribution, 2016 (m^3/day)	Reconstruction (m^3/day)	Deviation (%)
Christmas peak	4,059	6,718	+ 40 %
New Year's peak	5,779	6,911	+16 %
Winter holidays peak	4,866	7,952	+39 %
Summer holidays peak	3,815	4,945	+23 %
Spring minimum	1,764	1,210	-46 %
Autumn minimum	1,863	1,062	-75 %

TABLE 5.2 – Evaluation of the reconstruction of drinking water distribution extrema

However, concerning the water volumes, the sum of the water deliveries and the losses obtained using the analogous method are overestimated during the high tourism seasons and underestimated during the low tourism seasons (see Table 5.2). These deviations in the gross volumes are partly caused by the calssification made by the analogous method, which assumes that all temporary dwellings and hotels are occupied at the same rate as the patterns selected in the typology. In addition, because there is no information about the proportion of temporary residents for each category of building in the municipality, the assumption made by fixing the same rate of temporary residents for both building categories may favour temporary residents, which could explain the overestimated seasonal peaks. The underestimation of minimum values can be corrected by increasing the proportion of network losses. Note also that the municipal water demand (i.e., public fountains, road washing, and maintenance) are not taken into account in the typology and should be added as another layer in the drinking water distribution signal.

5.5 Discussion and Conclusion

This article proposes the application of a water use regime (Calianno et al. 2018) for the ski resort of Megève to provide a detailed assessment of the seasonality of drinking water uses in tourist mountain territories.

First, the analysis of Megève's municipal drinking water distribution time series in consideration of external factors highlighted the major impact of the presence of temporary inhabitants (both tourists and secondary residents) during high tourism seasons relative to determinants such as the climate (including temperature, nebulosity, and rainfall), snow height and social events. An interesting result was discovered insomuch that the most important peaks in the drinking water distribution occurred during the Christmas and New Year's periods of 2015 and 2016 despite the absence of snow, which is believed to be the major factor in the resort's attractiveness. Indeed, even if tourists are looking for a snowy Christmas stay, resorts such as Megève are full during the Christmas and New Year's periods regardless of the presence of snow. However, for the winter holidays in February, people mainly come to the resort for skiing, and thus, the quantity and quality of snow plays a role on the resort's occupation and accordingly the overall water demand. From this analysis, a schematic model of the drinking water distribution seasonality was built (Fig. 5.5). It completes the model from Marnezy (2008), as it presents two types of temporal variabilities: low-frequency waves (i.e.,

seasonal variability) and high-frequency peaks (weekly-scale variability).

Second, similar to the historic approach of Grouillet et al. 2015 regarding the reconstruction of the inter-annual water demand in the Mediterranean region, this work aimed to provide a detailed description of the intra-annual variations of water demands in tourist areas while defining seasonal patterns as water use regimes. The monitoring of drinking water deliveries at the user scale and at daily intervals (Fig. 5.6) completes the modelling of Megève's water distribution management performed by Leroy (2015) when data of such a detailed temporal resolution were not available. Such a detailed analysis, even with a small sample, produced continuous water use time series over two and a half years (2015, 2016 and the first half of 2017). The advantage of this approach is that these data are issued from direct observations in comparison to previous research on water uses in mountain resorts (Reynard 2000b; Charnay 2010; Bonriposi 2013) that were based on collected datasets. This dataset also adds the necessary temporal precision to provide insights on the different types of water uses in a tourist territory, the roles of temporary visitors on the drinking water distribution and the diversity of temporal signatures among different water uses, whereas previous studies were limited to globally distributed data or monthly time series (Charnay 2010; Bréthaut 2012).

To highlight the seasonal diversity of water deliveries, the monitoring sample in Megève was chosen to include various types of habitats and water uses, including hotels, houses (including permanent and temporary residents), apartment blocks, offices, and farms. Every type of user has a distinct seasonal signal that demonstrates the influence of i) the residency mode (either temporary or permanent) on seasonal low-frequency waves, ii) the type of habitat (either grouped or single-family housing) on the signal amplitude, and iii) the weekend visits on the high-frequency peaks for temporary residents and hotels. Then, from this monitored sample, a typology of water delivery regimes was constructed using standardised values to extract the temporal signatures associated with each type of user (Fig. 5.7). The specific water demand seasonality observed for office buildings and barn underlines the roles of final water uses in determining the temporal variability in the water demand and the importance of assessing such uses when determining a territorial resource supply-demand balance. Both in that sense and in a more general way, this case study completes the efforts of previous studies with the development of a water balance model that integrates more numerous detailed factors on the demand side (Milano et al. 2013a; Collet et al. 2015; Fabre et al. 2015). This study also adds a supplementary step in terms of the temporal scale (with daily regimes) and spatial resolution (the user and building scales) relative to more global studies that limit the determinants of the water demand to the variation in the population (Vörösmarty 2000; Alcamo et al. 2003; Soboll and Schmude 2011; Vanham et al. 2011; Buytaert and Bièvre 2012).

In terms of the methodology for water use monitoring strategies, this work gives a concrete example of observations made at the delivery step of the water use cycle (Calianno et al. 2017). Such observations at the user scale give measurable values that are more similar to the concept of water demand, i.e., the expression of water needs through requests formulated by the user. The water demand cannot be measured in a water network because the request from a user is not necessarily satisfied and therefore does not always correspond to the volumes of water delivered and transmitted through water metres.

Finally, water use regimes are taken as patterns in the analogous method, which was developed to reproduce the global seasonality of the drinking water distribution of Megève (Fig. 5.8). The analogous method was accurate in reproducing the temporal variability in Megève's drinking water distribution. This indicates a good representativity of the selected delivery regime typology, even if it was built from a small sample. **The representativity of the water delivery sample and the regime selection to build the typology are indeed the most important elements to consider when implementing the analogous method.** In that sense, the analogous method is not a parameterised model, but a statistical process where the sampling and the classification are the points that can be modified to improve the model efficiency. In terms of the volume, this method is still imprecise. Such results would be suitably coupled with the model developed by Leroy (2015), who presented an accurate estimation of the distributed drinking water volumes in Megève, albeit with less precision in the temporal variability. However, the main goal of the analogous method was to reproduce the water demand seasonality based on a dataset that is simple and easy to collect so that it can be used by water managers and stakeholders. The model may be used for any territory without water use data or for urban planning because it is based on water regime patterns that are defined hypothetically. This method would be also a useful tool for comparing the seasonality of drinking water uses, which is mostly dependent on the rates of secondary resident and tourist housing capacities, among different tourist resorts.

Acknowledgements

I would like to thank Emmanuel Reynard for his comments and recommendations. Also, my regards go to Megève's water services team (Emmanuel Gannaz, Sylvie Debièvе, Carole Talotti, Julien Branchereau and Julien Beline) for their invaluable collaboration and enthusiasm during the field visits. Finally, I thank Marianne Milano, Georges-Marie Saulnier, André Musy and Aude Soureillat for their input on this research.

Chapitre 6

Pratiques d'irrigation : de l'usage estimé à l'usage effectif

6.1 Introduction

A l'inverse des usages de l'eau potable au moyen de compteurs d'eau domestiques, les usages de l'eau d'irrigation font rarement l'objet d'un suivi volumétrique à l'échelle individuelle.

Ce chapitre regroupe différentes méthodes d'estimation indirectes des usages d'irrigation et les complète par des mesures directes effectuées sur la commune de Montana. Une attention particulière est également portée aux pratiques des acteurs irrigants, car c'est finalement à ces derniers que revient la décision d'irriguer, ou non, avec leur propre appréciation du climat, des besoins en eau de la plante et en fonction de leurs propres objectifs de production.

6.1.1 Enjeux

L'irrigation souvent estimée via des méthodes indirectes

Un premier enjeu pour la gestion des usages de l'eau d'irrigation est que les mesures directes sont rares. Dans la commune de Montana, comme cela est le cas dans la majorité des réseaux d'irrigation valaisans, il n'y a pas de système de suivi des volumes distribués (compteurs d'eau, débitmètres), car la facturation de l'eau d'irrigation se fait principalement à la surface. Les demandes en eau pour l'irrigation sont alors le plus souvent estimées par des méthodes indirectes ou par des simulations agro-climatiques.

Une méthode indirecte d'estimation de l'irrigation consiste à se baser sur les données de prélèvements disponibles. Par exemple, en France, la collecte des données de prélèvement se fait via les volumes déclarés aux Agences de l'eau (ERHARD-CASSEGRAIN et MARGAT 1983) ou lors des recensements agricoles (LOUBIER et al. 2013). Une autre méthode indirecte consiste simplement à faire le recensement des surfaces des terres agricoles irriguées (MORARDET et al. 1998), bien que celle-ci ne donne pas d'indication en termes de volumes d'eau utilisés.

Les méthodes de type empirique basées sur des coefficients d'irrigation surfaciques sont également couramment utilisées par les bureaux d'étude et par les gestionnaires car elles ont l'avantage d'être simples et rapidement applicables. Elles consistent à multiplier la surface irriguée concernée par une estimation des besoins d'irrigation par unité de surface (RINAUDO 2015).

Une autre manière d'évaluer les besoins d'irrigation est la méthode agroclimatique, qui calcule l'évapotranspiration des plantes en se basant sur les données climatiques et les modèles de croissance des plantes (ALLEN et al. 1998). Les méthodes agroclimatiques s'intègrent aisément dans les modèles d'estimation du bilan hydrique prenant en compte ressources disponibles et demandes en eau des différents usages (eau potable, irrigation, industries), à l'échelle des bassins versants (FUHRER et JASPER 2012 ; MILANO et al. 2013a ; BONRIPOSI 2013 ; FABRE et al. 2015).

Les méthodes indirectes ont l'avantage de pouvoir généraliser les estimations sur des grands espaces, mais ne peuvent reproduire l'irrigation effective conduite sur le terrain par des acteurs irrigants prenant des décisions qui ne sont pas forcément en adéquation avec les modèles théoriques. L'irrigation dépend également de facteurs humains tels que les pratiques culturales, les contraintes du domaine agricole et les règles de gestion. Peu d'études se penchent sur cet usage effectif de l'eau fait sur le terrain.

Une grande diversité des pratiques d'irrigation

Un second enjeu de l'estimation de l'irrigation effective est la diversité des pratiques d'irrigation. Dans une même région (terroir, exposition, sols), à climat comparable et au sein d'un même contexte agricole (même famille de culture, même infrastructure d'irrigation) et à l'intérieur d'un même groupe d'usagers, les demandes et les pratiques d'usages des acteurs sont différentes, en termes de quantité et de timing. C'est le cas en Valais et plus généralement en territoire de montagne, où les structures agricoles sont de petite taille comparées à l'agroindustrie de plaine. On y retrouve un plus grand nombre d'exploitants au kilomètre carré et donc une plus grande diversité dans les façons de pratiquer l'irrigation. Cette diversité est une difficulté de plus pour l'estimation régionale des demandes en eau d'irrigation.

Quelle quantité mesurer : prélèvement, distribution ou apport ?

Un troisième enjeu vient de la complexité des réseaux d'irrigation rendant difficile le choix de l'emplacement des mesures de débit désirées, d'autant que dans la plupart des cas, les réseaux ne sont pas équipés de compteurs d'eau. Il est donc important de définir en amont les volumes que l'on souhaite mesurer : quels sont les usages concernés ? A quelle étape positionner l'instrument de mesure dans le cycle d'usage de l'eau, depuis les prélèvements jusqu'aux restitutions ? A quel volume cela correspond-il ? Par exemple, il y a des différences notables entre le besoin en eau des plantes, les prélèvements, la distribution d'eau d'irrigation dans les réseaux, la demande effective des irrigants, l'arrosage apporté à la parcelle et l'irrigation effectivement profitable aux plantes (CALIANNO et al. 2017).

Pour pouvoir répondre à la question de savoir quel volume d'eau mesurer pour définir les usages d'irrigation, rappelons ici le fonctionnement du cycle d'usage de l'eau d'irrigation, défini plus tôt dans cette thèse (CALIANNO et al. 2017) mis dans le contexte de l'irrigation en Valais. Ce cycle permet de distinguer schématiquement les différents volumes d'eau parcourant les étapes successives des réseaux d'irrigation, depuis les prélèvements jusqu'à l'usage effectif de l'eau par les plantes (Fig. 2.3).

Au centre des vallées de montagne sujettes aux effets de barrage, les prélèvements d'eau pour l'irrigation sont généralement faits en altitude, sur les torrents à régime glacaire ou nival, qui produisent une quantité d'eau suffisante pour assurer l'irrigation lors des mois d'été secs et chauds. En Valais central, les prélèvements d'altitude sont encore pour la plupart des cas convoyés vers les terres agricoles par des canaux d'irrigation à ciel ouvert appelés bisses (REYNARD 2000b ; BONRIPOSI 2013). Ces derniers sont généralement en eau entre avril et octobre et l'eau y coule en permanence durant cette période en direction des surfaces à irriguer ou dans certains cas vers des infrastructures de stockage (lac artificiels, réservoirs). Si l'eau n'a pas été utilisée au cours de son transit ou si les bassins de stockage sont remplis, le trop-plein des bisses est directement reversé dans les torrents. Les quantités d'eau effectivement utilisées pour l'irrigation peuvent donc être largement inférieures aux débits des bisses. Depuis le bisse principal ou le lieu de stockage, l'eau d'irrigation est ensuite distribuée via des bisses secondaires ou via des counduites d'eau sous pression, gérés par les communes ou par des associations d'irrigants, appelés consortages (REYNARD et BAUD 2002). L'irrigation traditionnelle par ruissellement n'est quasiment plus mise en pratique depuis la construction des installations sous pression au cours des annnées 1970, destinées à généraliser l'irrigation par aspersion. Entre le bassin de stockage et le lieu d'irrigation se produisent des pertes dans les réseaux, ce qui différencie le volume distribué et le volume d'irrigation *apporté* au niveau de la parcelle (voir Fig. 6.1). Le volume d'irrigation *demandé* par l'irrigant a lui une valeur plus abstraite, pas toujours mesurable sous la forme d'une quantité tangible car il peut être égal à l'apport (demande satisfaite) ou supérieur lorsque l'eau apportée par le réseau de distribution est inférieur au souhait de l'irrigant (demande insatisfaite). Une fois l'eau apportée à la parcelle, l'irrigant va l'appliquer sur ses terres et à ce moment, de nouvelles pertes se produisent, ce qui nous fait distinguer l'apport et *l'irrigation effective*, qui est la quantité d'eau d'irrigation qui atteindra la plante et sera effectivement utilisée par cette dernière. L'irrigation effective est la quantité d'eau qu'il faudrait ajouter à l'eau des pluies et à l'eau déjà disponible dans le sol pour satisfaire les *besoins en eau des plantes*, qui est notamment fonction du degré de rendement des cultures désiré par l'agriculteur. Ensuite, à l'inverse des *restitutions*, la *consommation* est la quantité d'eau ne retournant pas au système de ressource local (incorporation aux plantes, évapotranspiration).

Au vu des différentes possibilités de mesurer un volume d'eau au cours du cycle d'irrigation, lorsqu'une donnée est récoltée ou lorsque l'on compare deux chiffres d'usage d'irrigation, il est nécessaire de garder à l'esprit à quel endroit du cycle on est situé.

Quel volume devrions-nous mesurer pour caractériser les usages d'irrigation ? Si l'on s'intéresse à la pression sur les ressources en eau, il faut certainement se baser sur les prélèvements. Par contre, si l'on souhaite étudier de manière plus fine les usages et les pratiques particulières d'irrigation qui permettent ensuite d'expliquer les variations de la demande en eau, il faut s'intéresser à l'échelle de l'usager, c'est-à-dire aux apports.

6.1.2 Objectifs

Le premier objectif de ce chapitre est de documenter les pratiques d'irrigation en vigueur à Montana, pour mettre en évidence les facteurs humains et physiques qui commandent l'irrigation. Le second objectif est d'utiliser les facteurs indentifiés pour affiner les méthodes

d'estimation empirique des volumes d'eau d'irrigation. Enfin, le troisième objectif est l'évaluation des méthodes d'estimation de l'irrigation. Pour cela, les différentes méthodes d'estimation de la demande en eau d'irrigation sont comparées avec des observations volumétriques *in-situ*, faites sur la commune de Montana.

6.1.3 Approche multi-méthodes

L'irrigation et les pratiques associées étant dépendantes de mombreux facteurs, naturels et humains, l'approche utilisée dans ce chapitre consiste à exploiter et croiser différentes méthodes et champs de recherche, pour obtenir une image la plus intégrale possible du problème. Le principe de croisement de méthodes utilisé est de se baser sur l'observation des pratiques (partie 1) pour modifier et enrichir les méthodes d'estimation empiriques (partie 2) et comparer avec les résultats des mesures directes (partie 3, monitoring). L'analyse compare quatre méthodes d'estimation de l'irrigation : la méthode empirique, la méthode empirique intégrée, la modélisation agro-climatique et les mesures directes. Ces méthodes et les champs disciplinaires associés sont repris dans un schéma de synthèse (Fig. 6.1), sur lequel est aussi indiqué à quelle étape du cycle d'usage d'irrigation se situe chaque méthode, c'est-à-dire quel volume elle cherche à estimer.

Six entretiens individuels et trois entretiens collectifs ont été réalisés dans la région de Montana-Sierre entre 2015 et 2016 afin de documenter les pratiques des acteurs irrigants. Ils sont repris dans le tableau 6.1. A partir de ces entretiens, plusieurs catégories d'acteurs peuvent être différenciées : vignerons-encaveurs (professionnels), vignerons amateurs, agriculteurs, concierges d'immeubles résidentiels, techniciens communaux (des services de l'eau) et agronomes.

Date	Lieu	Profession
8/01/2015	Corin	Trois vignerons-encaveurs
3/02/2015	Corin	Vigneron-encaveur
3/02/2015	Champzabé	Vigneron amateur
13/05/2015	Diogne	Agriculteur-éleveur
16/06/2015	Montana	Concierge de résidence
17/11/2015	Montana	Conseiller énergie, ACCM Vignerons-encaveurs Président Vitival Agro-technicien, Office Viticulture Valais Dessinateur, Services techniques Montana
2/07/2016	Montana-Village	Deux vignerons amateurs
2/08/2016	Pully	Agronome, Agroscope
24/12/2016	Montana	Technicien communal

TABLEAU 6.1 – Entretiens réalisés concernant les usages d'irrigation.

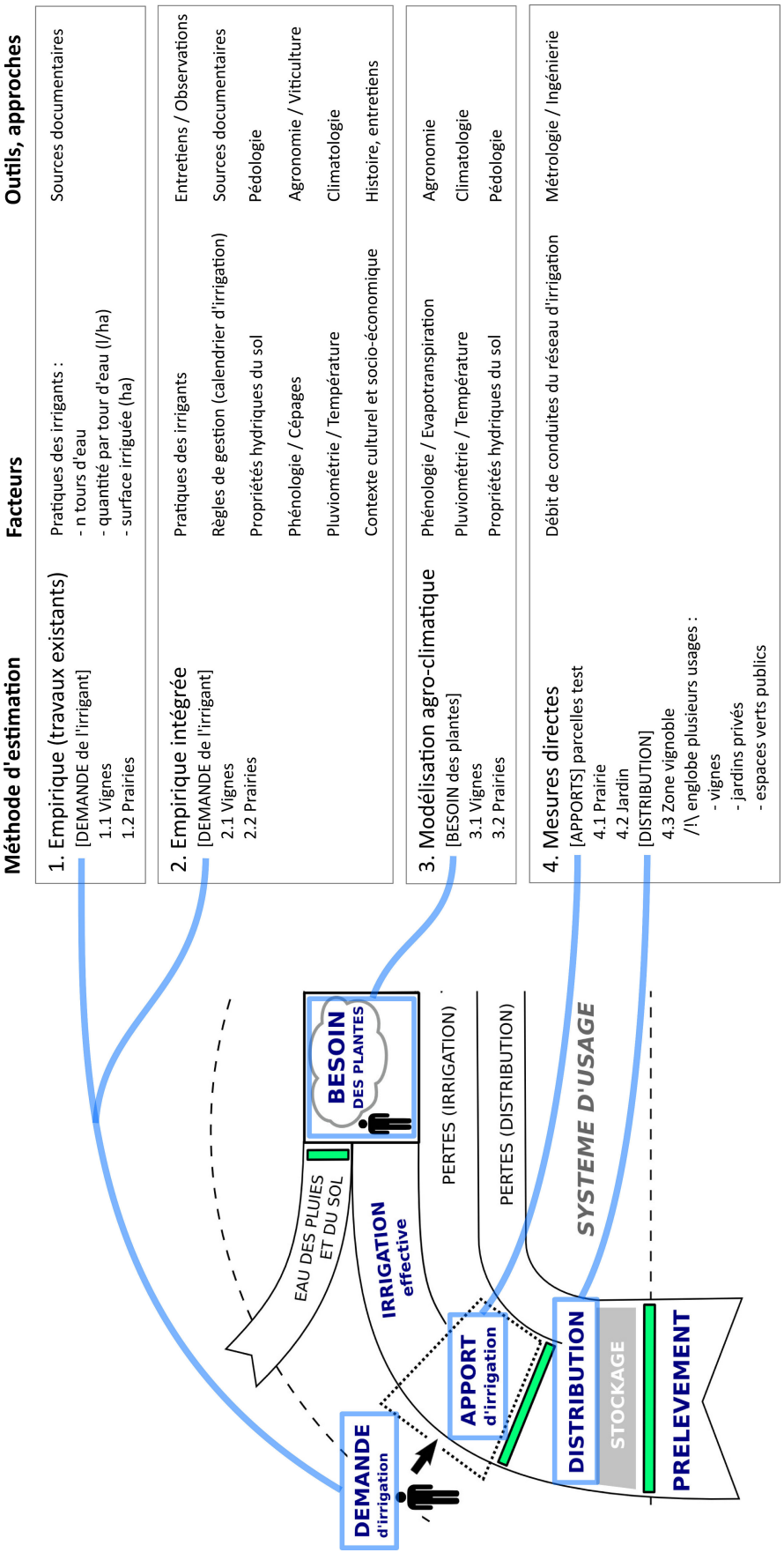


FIGURE 6.1 – Outils et méthodes utilisés pour l'estimation des usages d'irrigation.

6.1.4 Organisation du chapitre

Le présent chapitre est organisé comme suit :

Une première section est consacrée à la description des pratiques d'irrigation de la vigne et des prairies à Montana, sur la base des observations de terrain, de sources documentaires et des entretiens menés auprès des acteurs irrigants de la commune. Cette mise en contexte des pratiques de l'irrigation servira de base pour le développement de méthodes d'estimation de l'irrigation plus proches de la réalité de terrrain.

Une deuxième section dresse un aperçu des méthodes indirectes d'estimation de l'usage de l'eau d'irrigation utilisées dans la littérature scientifique et par les plans directeurs locaux de la région de Montana : méthodes empiriques, agro-climatiques. Ces méthodes sont modifiées et complétées pour proposer une méthode empirique *intégrée* se basant sur les pratiques d'irrigation décrites dans la première partie. Les résultats de ces différents méthodes pour l'estimation de l'irrigation des vignes et des praires de Montana sont ensuite comparés.

Une troisième section décrit le monitoring mis en place à Montana pour la mesure directe de l'irrigation au niveau des apports (prairies, jardins) et de la distribution (vignoble). Les résultats de ces mesures sont comparés avec les volumes obtenus via les méthodes d'estimation indirecte.

Enfin, une quatrième section synthétise les résultats obtenus par chacune des méthodes utilisées et discute de manière plus générale les écarts entre pratiques réelles et estimation des usages. Une synthèse des facteurs déterminant l'irrigation à Montana est également proposée.

6.2 Observation des pratiques d'irrigation à Montana

Dans la commune de Montana, les principaux usages de l'eau d'irrigation consistent en l'arrosage des pâturages et des prés de fauche, du vignoble ainsi que des espaces verts publics et privés.

6.2.1 Ressources, gestion et réseaux d'irrigation

La grande majorité de l'eau brute destinée à l'irrigation est prélevée hors des limites de la commune. Montana reçoit les eaux de surface prélevées dans le Torrent de l'Ertentse (bassin versant de la Lienne), situées à 1600 mètres d'altitude sur la commune d'Icogne et transférées vers le plateau de Crans-Montana via le tunnel du Mont Lachaux (Fig. 6.2a). Ce tunnel remplace depuis 1946 la partie supérieure du bisse du Ro, qui assurait le transfert des prélèvements d'eau brute avant la mise sous pression des réseaux d'irrigation (REYNARD 2000b). Au répartiteur de Plans Mayens, situé sur la commune de Lens, les prélèvements pour l'eau d'irrigation sont partagés en quatre parts égales entre les communes de Lens, Icogne, Chermignon et Montana. Depuis la création de la commune de Crans-Montana en 2017 par la fusion des communes de Chermignon, Montana, Randogne et Mollens, les eaux sont maintenant théoriquement partagée entre trois communes (Icogne, Lens et Crans-Montana). Mais les infrastructures de distribution d'eau restent jusqu'à présent inchangées, ce qui fait que la clé de répartition $1/4$ – $1/4$ – $1/4$ – $1/4$ reste valable pour Icogne, Lens et les territoires formés par les anciennes communes de Chermignon et Montana.



FIGURE 6.2 – Sortie du tunnel du Mont Lachaux (a), au niveau du répartiteur de Plans Mayens (commune de Lens). L'eau brute (visible sur l'image) et l'eau de source (mise en conduites) sont réparties entre Montana, Chermignon, Lens et Icogne. Vue du lac de la Moubra (b), où sont stockées les eaux brutes de Montana.

L'eau brute destinée à Montana est *in fine* stockée au niveau du lac de la Moubra (Fig. 6.2b et 6.3), en contrebas de la station touristique (1425 m).

C'est en aval du lac de la Moubra que démarre le réseau d'irrigation communal, desservant les prairies situées au niveau des villages de Montana et de Diogne (1250 m - 800 m), jusqu'au vignoble de Corin situé dans la partie basse de la commune (800 m - 500 m). Le réseau d'irrigation ne dessert pas la station de Montana, où l'irrigation est assurée par le

réseau d'eau potable : arrosage des pelouses et jardins privés, irrigation des espaces verts publics. L'irrigation du golf de Crans-Montana, dont une partie se situe sur la commune de Montana, est assurée par la commune de Lens via une conduite spécifique.

A mi-parcours du réseau d'irrigation de Montana, le Bisse de Lens est également une source importante d'eau brute pour la commune. Le bisse finit sa course en se déversant dans le torrent de Montana, en contrebas du village de Diogne. Une prise d'eau permet ensuite de prélever les eaux du bisse et du torrent pour alimenter le réservoir d'eau brute de Tsandemier (Figure 6.4a,b), essentiellement destiné à l'irrigation du vignoble. Un dessableur permet d'enlever le plus gros des matières solides charriées par le torrent (Figure 6.4c). Ce réservoir est en priorité alimenté par les eaux du torrent et du bisse, mais peut également l'être par le réseau d'irrigation descendant depuis le lac de la Moubra.

Le réseau d'irrigation de Montana dessert le vignoble situé en contrebas de la commune, entourant le village de Corin, mais aussi une partie des parcelles viticoles situées sur les commune de Randogne, à l'Est et Sierre, au Sud (voir Figure 6.3). La surface totale d'encépagement de cette zone (75 hectares) a été calculée sur SIG à partir d'orthophotographies. En plus des vignes, le réseau d'irrigation est utilisé pour arroser les espaces verts publics et les jardins et potagers privés. Les surfaces de jardins privés irrigués du village de Corin ont également été identifieés à l'aide d'orthophotographies (voir Figure 6.3).

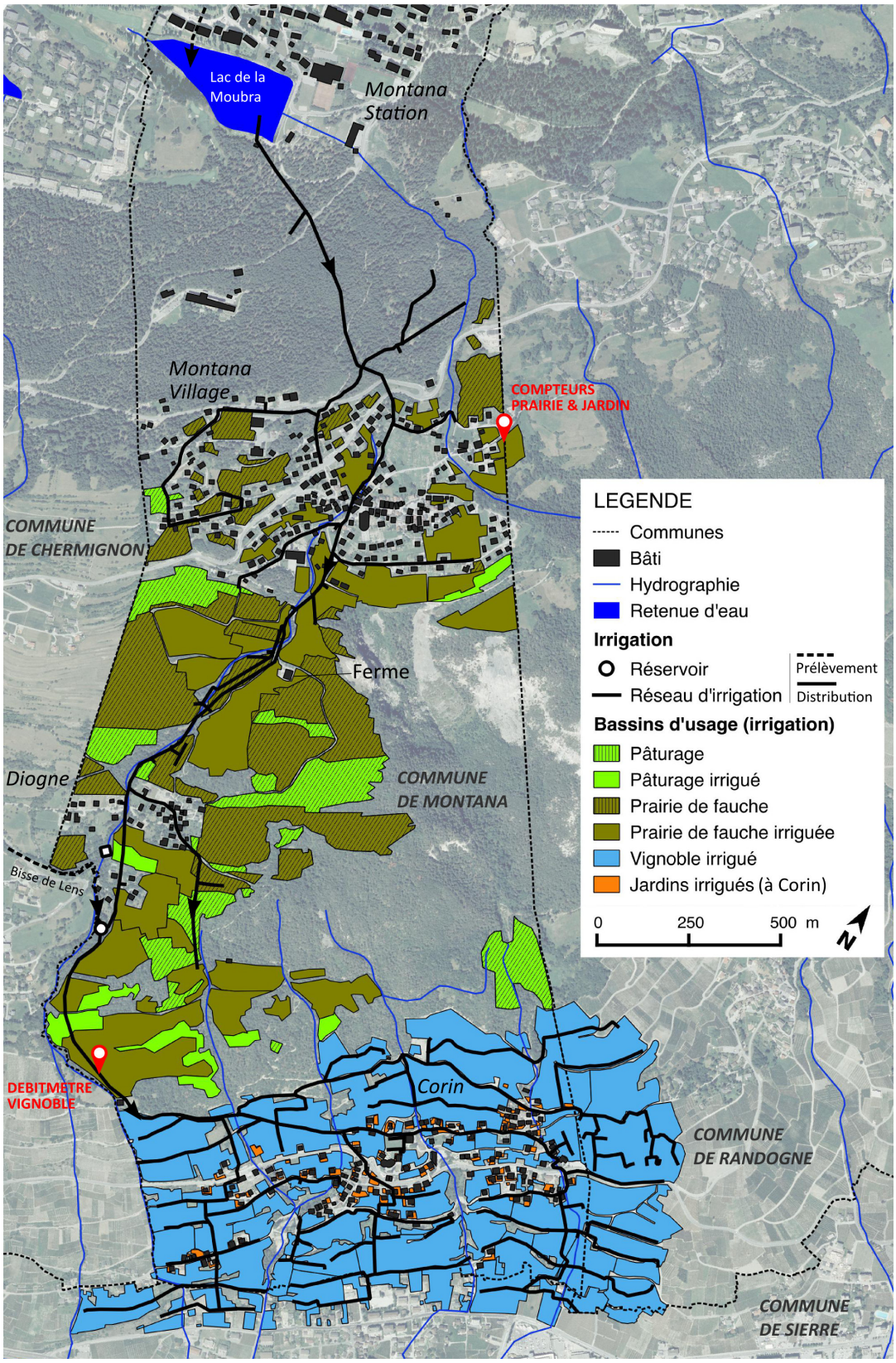


FIGURE 6.3 – Bassins d'usages de l'eau d'irrigation et réseaux d'irrigation à Montana. Les limites communales sont celles valables avant le 01.01.2017.



FIGURE 6.4 – Réservoir de Tsandemier (a), prise d'eau sur le torrent de Montana (b) et dessableur (c). Photographies : mai 2015.

Le réseau d'irrigation est mis en eau de la mi-avril à la mi-octobre. De novembre à mars, les conduites sont vidangées pour éviter les dégats dus au gel.



FIGURE 6.5 – Mise en eau du réseau d'irrigation par le fontainier communal, au niveau des prairies. Photographie : mai 2015.

A Montana, il n'existe pas de mesure de la distribution dans le réseau d'irrigation, ni des apports au niveau des usagers. Il n'y a pas non plus de mesure directe de débit sur les bisses, bien qu'ils soient les plus importants convoyeurs d'eau brute. Dans son travail de thèse, BONRIPOSI (2013) avait installé plusieurs débitmètres dans les principaux bisses du plateau de Crans-Montana pour chiffrer les prélèvements. Durant les mois de juillet et août, le Bisse de Lens a transporté 693'315 m^3 en 2010 et 474'965 m^3 en 2011.

La facturation de l'eau du réseau d'irrigation est effectuée selon la surface irriguée, sur la base du règlement communal d'irrigation du vignoble, prairies et jardins (MONTANA 1987). Les propriétaires de terrains raccordés au réseau versent une taxe de raccordement, payable une fois au moment du raccordement de leur conduite, et une taxe de consommation annuelle correspondant aux surfaces irriguées (surface cadastrale). Lors des années pluvieuses, par exemple, si l'irrigation n'est pas nécessaire pour certaines propriétés, la taxe annuelle est toutefois due intégralement.

6.2.2 Pratiques d'irrigation des prairies

L'irrigation des prairies ne fait pas l'objet d'un encadrement particulier par la commune (ex : tours d'eau, quotas) ; l'arrosage est libre durant toute la période de mise en service du réseau d'irrigation.

L'entretien avec le dernier agriculteur à temps plein encore actif à Montana (entretien du 13/05/2015) a permis de mettre en évidence les pratiques actuelles d'irrigation des prairies sur la commune. L'exploitation compte environ 70 génisses et la ferme est située à mi-hauteur entre Montana-Village et Diogne (Fig. 6.3).

Différents types de parcelles de prairies sont présentes à Montana :

- Pâturages : terrains enherbés destinés uniquement à faire paître le bétail.
- Prairies de fauche : terrains enherbés destinés à la production de fourrage pour l'alimentation d'hiver, lorsque les vaches sont à l'étable.
- Prairies de fauche extensives : prairies fauchées une fois par an.
- Prairies de fauche intensives : prairies fauchées deux fois par an.
- Prairies de fauche intensives 'mixtes' : prairies intensives qui servent également de patûrage une fois les coupes effectuées.
- Prairies et pâturages sec (PPS) : terrains enherbés (Fig. 6.6) classés d'importance nationale et protégés par une ordonnance fédérale (DIPNER et al. 2010). L'irrigation, la fertilisation et l'emploi de produits phytosanitaires y sont interdits.



FIGURE 6.6 – Parcelles de pâturages non irrigués (pâturages secs) sous la ferme, en contrebas de Montana-Village.

Le fermier utilise ces parcelles soit pour faire paître ses génisses, soit pour la production de fourrage. L'irrigation est nécessaire afin d'assurer la qualité de l'herbe pour les pâturages avant d'y installer les vaches et pour les prairies fauches intensives, qui sont arrosées avant chaque coupe. Les prairies de fauche intensive "mixtes" sont irrigués jusqu'à trois fois par saison lorsque deux coupes sont effectuées et que les vaches y sont ensuite re-mises en pâturage. Les prairies et pâturages secs et les prairies de fauche extensives ne sont pas irrigués.

L'arrosage des prairies et pâturages est donc une irrigation très variable dans l'espace et dans le temps. Toutes les parcelles ne sont pas irriguées, et les parcelles irriguées ne le sont pas toutes au même moment. Pour connaître les volumes d'eau d'irrigation des prairies, il faut connaître le calendrier des travaux de l'agriculteur : alternance des pâtures, fauches et déplacement des vaches de parcelles en parcelles jusqu'à l'alpage.

Les pratiques de pâturage de l'agriculteur démarrent au printemps (entre fin avril et début mai) ; il commence par mettre les génisses à paître sur les parcelles les plus basses en

altitude, au dessus des vignes de Corin (voir Fig. 6.3). Ces parcelles sont équipées d'installations fixes d'irrigation : 5 arroseurs sur pipes de 2.5 pouces, avec des buses de 16 mm. Ces asperseurs ont un rayon d'arrosage de 80 m (voir Figures 6.7a,b). Les bêtes ont fini de brouter après environ deux semaines. Ensuite, il les monte de parcelles en parcelles, jusqu'à arriver aux alpages en juillet. Les parcelles suivantes sont les parcs à génisses à Diogne et sous la ferme (située entre Diogne et Montana), qui sont des pâturages secs, donc non irrigués (Fig. 6.6). Les vaches mettent environ un mois pour brouter les deux parcs, de mai à début juin. Ensuite, les vaches montent jusqu'aux pâturages de Montana-Village, qui sont des parcelles irriguées par des arroseurs mobiles sur pipes de 0.75 pouces avec des buses de 6 à 10 mm, dont le rayon d'arrosage est d'environ 20 m (Fig. 6.7c). Les bêtes y paissent de mi-juin à début juillet, à raison d'à peu près une semaine par parcelles, qui sont de tailles plus modestes. Ensuite, de juillet à août, les vaches sont montées aux alpages de Cry d'Er, sur le domaine skiable de Crans-Montana. S'il est trop tôt pour monter aux alpages à cause de la neige, l'éleveur a la possibilité de refaire un cycle de pâturage d'une à deux semaines en recommençant d'en bas par les pâturages de Corin. Après la désalpe, au début septembre, les vaches sont remises à paître sur les prairies fauchées de Montana-Village et de Diogne, jusqu'au début octobre.

Parallèlement, les travaux sur les prairies de fauche intensives démarrent en juin avec la première coupe. La deuxième coupe a lieu au début août. Ces parcelles sont situées principalement à Montana-Village et Diogne et sont équipées des mêmes petits arroseurs mobiles que les pâturages. L'irrigation des parcelles est faite en 4-5 heures d'arrosage. L'agriculteur estime qu'un bon arrosage des prairies est de l'ordre de 40 mm (40 litres/m^2). Il contrôle même ces quantités à l'aide d'un pluviomètre. L'irrigation de la totalité des prairies de fauche se fait sur trois jours environ. Les prairies extensives, non irriguées, sont fauchées au début juillet.

Au cours de l'année durant laquelle a eu lieu l'entretien (2015), des pluies importantes sont tombées au début mai (113 mm) ; l'agriculteur n'a donc pas arrosé les prairies de fauche intensive pour la première coupe de l'année.



FIGURE 6.7 – Arrosage des prairies et pâturages : buse d'aspersion (a) en haut de Corin (b) et installation mobile d'arrosage à Montana Village (c). Photographies : mai 2015.

En résumé, les divers moments d'irrigation des parcelles se produisent selon le calendrier suivant (voir aussi Fig. 6.8) :

Début mai : irrigation des pâturages de Corin (avant le premier tour de pâture en mai) et des prairies de fauche intensives (avant la première coupe de juin). Surface de pâturages : 33'400 m^2, surface de prairies : 251'400 m^2.

Début juin : irrigation des pâturages de Montana-Village (avant le tour de pâture de fin juin). Surface : 251'400 m^2.

Mi-juillet : prairies de fauche intensives (avant la deuxième coupe de début août). Surface : 251'400 m^2.

Mi-août : prairies de fauche intensives (suite à la deuxième coupe, pour pouvoir être pâturées après la désalpe). Cette surface est estimée équivalente aux pâturages de Corin : 33'400 m^2.

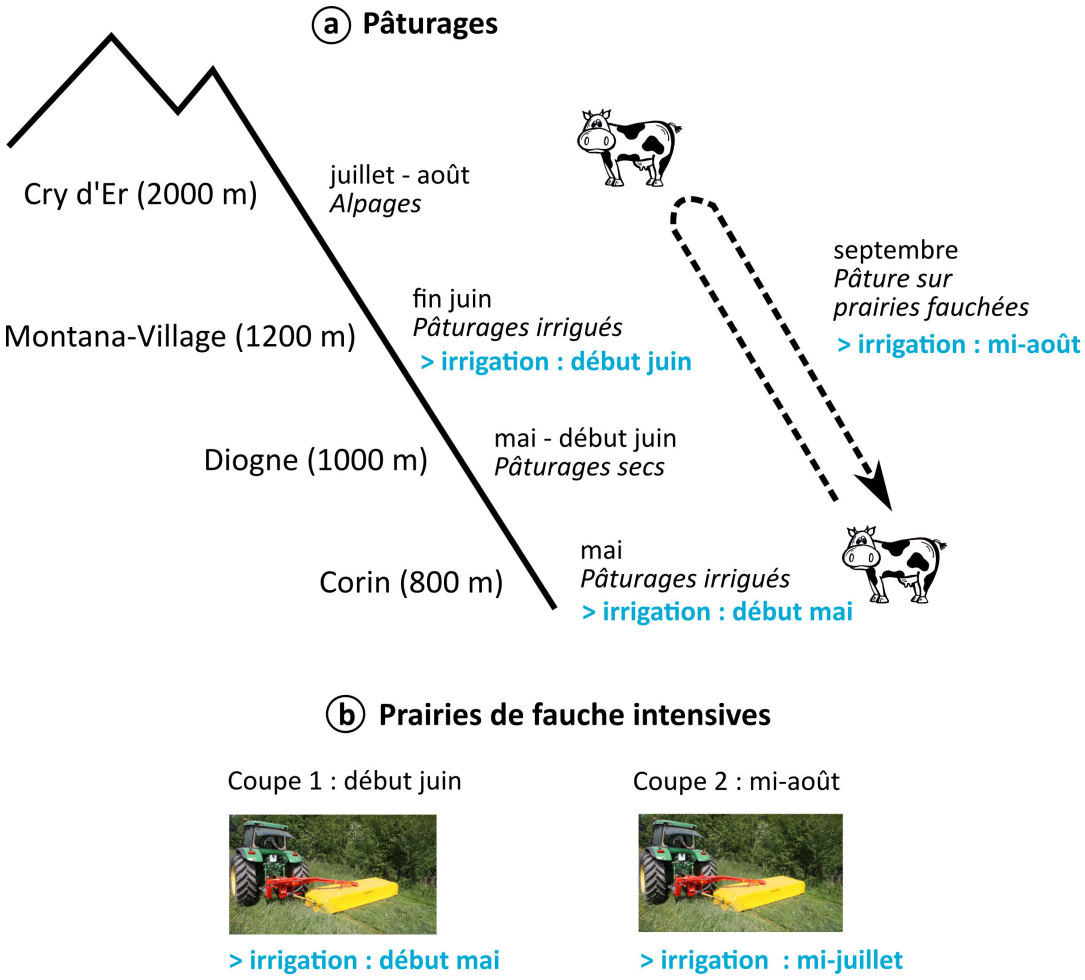


FIGURE 6.8 – Cycles de rotation des vaches sur les pâturages (a) et des coupes des prairies de fauche (b), avec les moments d'irrigation associés.

6.2.3 Pratiques d'irrigation des vignes

Les pratiques d'irrigation des vignes sont multi-factorielles. Dans cette partie, nous nous intéressons aux techniques d'irrigation, à la quantité d'eau utilisée par arrosage et au lien entre cépages et besoins en eau.

Ensuite, les facteurs déterminant la répartition spatiale de l'irrigation sont abordés : le rôle de la pédologie pour la capacité de rétention en eau des sols, les règles de gestion du réseau d'irrigation, et les différences de pratiques entre vignerons professionnels et amateurs.

Enfin, les facteurs déterminant la temporalité de l'irrigation sont abordés : les règles de gestion (calendrier d'arrosage), les étapes de croissance de la vigne et les pratiques particulières des vignerons.

Techniques d'irrigation

La grande majorité du vignoble de Corin (Fig. 6.9a) est irriguée par aspersion (Fig. 6.9b). L'irrigation par ruissellement a pratiquement disparu depuis la construction du réseau d'irrigation sous pression. Quelques parcelles sont équipées d'un système de goutte-à-goutte (Fig. 6.9c) ; ce sont principalement les parcelles du consortage de Temploz sur la commune de Randogne, soit environ 2 hectares. Ces parcelles arrosées par goutte-à-goutte représentent un peu moins de 3% de la surface totale du vignoble irrigué par le réseau de Montana (75 hectares).

D'après un des vignerons-encaveurs de Corin (entretien du 03/02/2015), le système idéal est le goutte-à-goutte car il est plus économe en eau, mais il coûte cher (d'après lui, c'est son seul désavantage). De plus, à Corin, l'infrastructure par aspersion est déjà en place, ce qui ne pousse pas les vignerons à investir dans un autre système.

Selon le vigneron amateur de Champzabé (entretien du 03/02/2015), une difficulté de l'irrigation par aspersion est le vent qui peut « *souffler l'eau ailleurs* ». Il ajoute : « *des fois, tu crois que tu as bien arrosé, mais en fait rien du tout. Alors, on laisse parfois couler par terre (comme anciennement)* ». Ce viticulteur irrigue donc occasionnellement par ruissellement, mais indique par ailleurs que cette méthode a le désavantage de créer de l'infiltration. « *Le problème, [...], c'est que l'eau descend deux mètres (sur la parcelle), ça rentre dans la terre puis ça s'écoule en suivant le roc dessous donc ça va pas plus loin*. » Il indique également parfois irriguer après les vendanges « *pour humidifier le terrain comme ça (en hiver), le sol gèle en profondeur et le pied ne gèle pas* ».



FIGURE 6.9 – Vue générale du vignoble de Corin (a), irrigation par aspersion sur une parcelle de jeunes vignes (b) système d'irrigation par goutte-à-goutte (c). Photographies : juin 2016 (a,b) et juillet 2015 (c).

Quantités d'eau par arrosage

D'après les vignerons-encaveurs rencontrés (entretien du 08/01/2015), la quantité d'eau nécessaire pour une irrigation par aspersion est de 30 à 50 mm. Un autre vigneron-encaveur (entretien du 03/02/2015) parle d'une fourchette comprise entre 40 et 60 mm, nécessaires pour récupérer « *le déficit en eau* ». Par expérience, les vignerons-encaveurs savent que cela suffit pour les parcelles sèches. Ces volumes correspondent à l'irrigation effective visée par le vigneron (voir Fig. 2.3), il faut donc y ajouter un pourcentage de pertes dues à l'aspersion pour obtenir les valeurs d'apport d'irrigation. Les vignerons amateurs de Montana-Village (entretien du 02/07/2016) parlent de 30-35 mm par arrosage et indiquent que s'il a plu 25-30 mm en une nuit, il n'y a pas besoin d'arroser. D'après eux, la capacité d'infiltration des sols joue aussi sur l'efficacité des pluies : « *Une bonne pluie de 8 heures, c'est suffisant, ça vaut un arrosage [pour les prairies]. Pour la vigne, y'a des bons morceaux qui prennent facilement [l'eau], comme celle qui a du 'brisier' [les calcaires schisteux] et que le sol prend tout, il ne coule pas d'eau [l'eau ne ruisselle pas].* » A l'inverse, d'autres vignes sont sur « *une terre 'béton', sorte de glaise, terre d'alluvions, qui devient dure et hermétique. Alors ça ne fait que ruisseler là. Pour que ça pénètre il faudrait presque plusieurs pluies pendant quelques jours pour préparer le sol puis après une grosse [pluie] qui pourrait pénétrer.* »

Par ailleurs, le vigneron amateur interrogé à Champzabé (entretien du 03/02/2015) indique qu'il est « *difficile d'obtenir la bonne quantité d'eau. Si la vigne ne reçoit pas assez d'eau, le raisin est trop petit et trop dur, il ne mûrit pas, [on dit qu'] il a 'fêré'. Si les feuilles au fond sèchent et deviennent jaunes, c'est presque déjà trop tard. Donc, parfois il y avantage à arroser un peu plus, un peu avant [3-4 semaines avant la vendange].* »

L'arrosage doit faire l'objet d'une surveillance continue car les buses et les tuyaux peuvent se boucher à cause de la charge en suspension présente dans l'eau du réseau d'irrigation.

Les vignerons (amateurs) de Montana-Village (entretien du 02/07/2016) racontent que lorsque l'irrigation se faisait encore par ruissellement via des 'bissettes', le repère pour savoir quand il fallait arrêter d'irriguer était d'enfoncer le manche d'un pic pour voir à quelle profondeur le sol était mouillé : « *quand on rentrait le pic de 30 cm en bas de la parcelle, c'était assez arrosé* ». Lorsque l'irrigation par aspersion a été introduite : « *on mettait une boîte d'un litre et on voyait quand elle était remplie. On était pas habitués aux jets, alors on faisait ça pour tester.* »

Capacité de rétention des sols

Les caractéristiques hydriques des sols sont bien connues par les viticulteurs professionnels (vignerons-encaveurs). D'après un des vignerons-encaveurs (entretien du 03/02/2015), « *la terre à Corin est graveleuse, légère, calcaire et avec peu d'argile. C'est une situation idéale pour le pinot noir.* » Les propriétés hydriques des sols vont ainsi définir différentes zones du vignoble, plus ou moins 'séchardes'. Selon les entretiens avec les vignerons-encaveurs, le vignoble de Corin est séparé en deux parties distinctes.

A l'Est, les parcelles sont plus humides car les sols sont argileux et il y a des sources qui démarrent plus haut au niveau de Montana-Village et qui passent sous le glissement de terrain du Boup jusqu'aux vignes (entretien du 02/07/2016) : « *c'est du tuf, du plâtre (il faut voir la route qui est bosselée) et humide en dessous.* » Dans cette zone, il n'y a, selon eux, pas ou très peu d'irrigation.

A l'Ouest, les parcelles sont plus sèches car les sols sont peu épais, caillouteux et plus exposés. Cette zone est irriguée. La présence des murets de soutènement en bas de parcelles jouerait également un rôle : à cet endroit, d'après un des vignerons amateurs interrogés (entretien du 03/02/2015), les sols sont plus exposés à la chaleur et il faut arroser d'avantage.

L'analyse de la pédologie du vignoble permet de décrire plus finement la répartition spatiale des réserves en eau potentielles des sols. Elle donne une indication sur les types de sols, leur profondeur, leur texture, le niveau d'enracinement de la vigne et la réserve en eau possible. Tous ces facteurs donnent une indication sur la capacité des sols à retenir l'eau de pluie et permet d'identifier des zones du vignoble plus ou moins sèches, susceptibles d'être irriguées avec plus ou moins d'intensité.

Une variété importante de sols est reportée sous le vignoble de Corin (LETESSIER et MARION 2007), dont une représentation simplifiée est faite sur la figure 6.10. Les unités de sols sont décrites par un code à 4 chiffres, dont les deux premiers indiquent la roche-mère à l'origine du sol, le troisième traduit le degré d'évolution du sol et le quatrième reflète la profondeur d'enracinement possible. Une estimation de la taille du Réservoir Utilisable (RU) est représentée par des profils hydriques, tenant compte de la texture, de la quantité d'éléments grossiers et de la colonisation observée des racines. Ce réservoir indique la quantité d'eau stockée dans le sol et utilisable directement et assez facilement par la plante. Ce n'est bien sûr que lorsque ce réservoir est rempli qu'il devient une réserve pour la vigne, en fonction des années et de l'efficacité des pluies d'hiver.

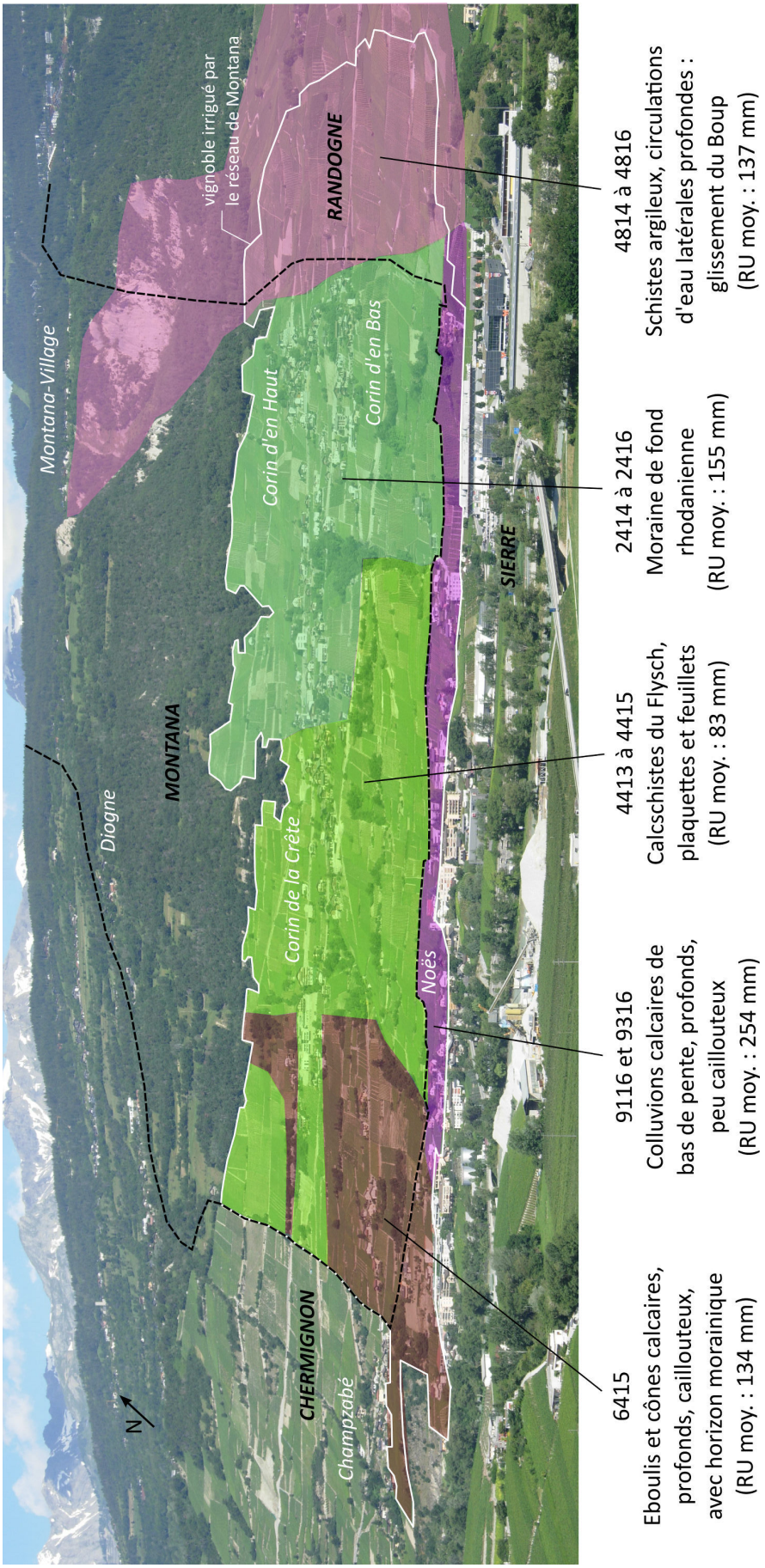


FIGURE 6.10 – Vue simplifiée des sols et des réserves utiles en eau moyennes, sous le vignoble desservi par le réseau d'irrigation de Montana. Photographies : Martin Calianno, 2016. Données pédologiques : LETESSIER et MARION 2007.

Lors de leur campagne de terrain sur l'ensemble des terroirs valaisans, LETESSIER et MARION (2007) ont observé des sols avec des valeurs de réserve utile variant entre 30 et 350 mm. Ils ont également pu discuter avec les vignerons de la relation entre réserve des sols et irrigation effective souhaitée :

« *Lorsque les réserves utiles (et le sol) sont supérieurs à 120mm, avec une profondeur d'enracinement au delà de 80 cm, les vignerons ont confirmé qu'il est possible de se passer d'irrigation la plupart des années, en prévoyant un peu d'eau sur les plantiers et les années très sèches comme 2003. [...] cette appréciation dépend énormément du rendement visé. Les réservoirs supérieurs à 150-170 mm permettent de 'passer' pratiquement chaque année, moyennant un production raisonnée, les gros réservoirs supérieurs à 180-200 mm à plus forte raison et peuvent supporter l'enherbement. Pour les sols à très faible réserve (inférieures à 70-80 mm), accompagnés d'une profondeur d'enracinement moyenne ou faible, l'équilibre pluviométrie/charge/sol ne peut être atteint qu'avec des rendements très faibles (2 à 300 g par* m^2*) avec des risques de contrainte hydrique précoce et intense, connue pour être peu favorable à de nombreux cépages blancs, le fendant et le sauvignon par exemple. L'irrigation y est donc nécessaire d'un point de vue économique et parfois qualitatif.* »

Ces relations entre réserve utile et besoins d'irrigation sont reprises dans le tableau 6.2.

RU	**Irrigation**
< 70-80 mm ; enracinement moyen à faible	Irrigation nécessaire
> 120 mm ; enracinement > 80cm	Possible de se passer d'irrigation la plupart des années, sauf plantiers et années très sèches
150-170 mm	Possible de se passer d'irrigation pratiquement chaque année (si production raisonnée)
> 180-200 mm	Irrigation non nécessaire, supporte l'enherbement

TABLEAU 6.2 – Relation entre réserve utile des sols (RU) et irrigation effective souhaitée, d'après LETESSIER et MARION 2007.

Par ailleurs, puisque la RU est une réserve théorique, il faut tenir compte du remplissage des parties profondes de ces réservoirs qui est fonction de la pluviométrie hivernale :

« *Les sols à faibles réserves, assez profonds, rechargeront leur petit réservoir chaque hiver, car il est bien rare que 100 à 150 mm ne tombent pas durant cette période. Ces sols sont de toute façon très souvent irrigués. Les sols à réserve moyenne, 120 à 150 mm, non irrigués nécessitent une recharge optimale qui peut être insuffisante si les facteurs externes sont défavorables : porosité de surface fermée (gel, tassement), protection insuffisante contre le dessèchement par le foehn (mulch de plaques/cailloux ou de sarments) et si la pluviométrie hivernale est faible. Les recharges des sols à réserve forte (supérieures à 200 mm) sans arrivées latérales, seront aussi dépendantes des millésimes hivernaux et de l'ouverture de la porosité de surface, mais comme ils ont plus de marge, seuls les hivers suivis de printemps très secs pourront poser problème. En général les hivers un peu secs seront même favorables à la qualité de leurs produits. Les sols des zones concaves bénéficient généralement d'apports latéraux souterrains, qui les rendent indifférents aux millésimes hivernaux, sauf hivers exceptionnellement secs et peu enneigés.* »

Si l'on revient à notre cas du vignoble irrigué par le réseau de Montana, dont la pédologie a été synthétisée sur la figure 6.10, il existe une grande diversité d'unités de sol et donc de réserves utiles. Ce sont des sols très peu évolués, dits calcosols (troisième chiffre de la

nomenclature = 1) et de profondeurs très variables. D'Ouest en Est, les unités pédologiques suivantes sont rencontrées (LETESSIER et MARION 2007) :

6415 : à l'Ouest de Corin de la Crête, jusqu'à la limite avec Chermignon et en contrebas du hameau de Champzabé. Sols peu évolués, issus d'éboulis à éléments calcaires sur loess puis moraines, profonds (100-180 cm). Réserve utile moyenne : 134 mm.

9116 et 9316 : en bas de coteau, entre la limite avec la commune de Montana et le village de Noës (Sierre). Colluvions calcaires de bas de pente, peu caillouteux, très profonds (> 150 cm) et de pente inférieure à 5-10%. La réserve utile moyenne est très élevée (254 mm), indiquant que ce secteur n'aurait en principe pas besoin d'être irrigué.

4413 à 4415 : au niveau de Corin de la Crête jusqu'à la limite sud de Montana et également en hauteur plus à l'ouest, jusqu'à la limite avec Chermignon. Sols peu évolués, issus des calcschistes du Flysch Valaisan (plaquettes et feuillets, à passées gréseuses plus dures), de profondeurs très variables (70 à 180 cm). Les variantes les moins profondes (4413 ; 70-100 cm) ont une réserve utile de 50 à 70 mm tandis que les plus profondes peuvent aller jusqu'à 150 cm. La réserve utile de ces unités est difficile à chiffrer au vu de la variabilité des profondeurs. La valeur moyenne est de 83 mm et ce sont les terroirs les plus secs de la zone irriguée par le réseau de Montana.

2414 à 2416 : au niveau de Corin d'en Haut et Corin d'en Bas, à l'est de la commune de Montana. Sols peu évolués, issus de moraine de fond rhodanienne, de profondeurs très variables (de 40 à plus de 150 cm). La réserve utile moyenne de ces unités est de 155 mm, laissant penser que cette zone pourrait se passer d'irrigation pratiquement chaque année, dans le cadre d'une production raisonnée. Malgré tout, l'hétérogénéité des profondeurs de sols fait que les besoins d'irrigation sont en réalité à évaluer parcelle par parcelle.

4814 et 4816 : à l'Est de Corin, principalement sur la commune de Randogne. Sols peu évolués, issus de schistes argileux, avec présence de poches de gypse, de profondeurs très variables (40-150 cm) et sur une pente moyenne à faible. Cette zone est sujette à un glissement de masse lent, mais actif car les schistes ont un pendage parallèle à la pente. La réserve utile moyenne de ces unités est de 137 mm. Ce secteur présente pourtant des sols très humides car ils sont sujets à des circulations d'eau latérales profondes, provenant d'infiltrations au niveau de la zone de décrochement située en contrebas de Montana-Village.

La plupart des RU des unités de sol rencontrées dans la zone d'étude sont supérieures à 120 mm, ce qui les positionnerait dans les catégories de terroirs pouvant se passer d'irrigation la plupart des années. Cependant, la diversité des sols rencontrés à Corin met en évidence une situation complexe, avec une forte diversité des réserves en eau théoriques, d'autant plus que la plupart des sols ont des profondeurs très variables. Les besoins d'irrigation devraient pour bien faire être estimés parcelle par parcelle, ce qui revient à se positionner à l'échelle de décision du vigneron. Néanmoins, des zones de sols simplifiées (Fig. 6.10) ont été sélectionnées d'après l'inventaire de LETESSIER et MARION (2007) et permettent d'affiner la répartition spatiale des besoins d'irrigation du vignoble en se basant sur les relations entre réserves utiles des sols et besoins d'irrigation (Tableau 6.2) :

- Calcschistes du Flysch (44) ; RU = 83 mm : les sols les plus secs du vignoble. Irrigation nécessaire chaque année (sauf année humide). Surface d'encépagement : 163'700 m^2.

- Eboulis calcaires (64) ; RU = 134 mm : possible de se passer d'irrigation la plupart des années, sauf pour les jeunes vignes et les années sèches. Surface d'encépagement : 100'800 m^2.
- Moraines de fond (24) ; RU = 155 mm et schistes argileux (48) ; RU = 137 mm. Situées à l'Est du vignoble, il est possible de se passer d'irrigation pratiquement chaque année (si production raisonnée), si l'on prend en compte les circulations d'eau latérales sous le glissement de masse des schistes. Surface d'encépagement : 428'000 m^2.
- Colluvions calcaires (91/93) ; RU = 254 mm : en bas de pente, l'irrigation ne devrait en principe pas être nécessaire. Surface d'encépagement : 53'600 m^2.

Stress hydrique et besoins en eau de la vigne

Un autre moyen d'évaluer les quantités nécessaires pour l'irrigation du vignoble est de s'intéresser aux besoins en eau de la vigne et à sa capacité de résistance au stress hydrique. Les questions suivantes ont été posées durant les entretiens :

> Comment la vigne s'adapte-t-elle au stress hydrique ?

D'après un des vignerons-encaveurs (entretien du 03/02/2015) : « *... la vigne aime de manière générale les sols aérés, légers et filtrants. Si on habitue le plant de vigne à moins d'eau, il ira la chercher en profondeur (en développant ses racines). La vigne est une plante qui est censée bien s'adapter au manque d'eau.* » Il soutient également que « *... sur certaines vignes, on n'arrose presque plus. Mais attention, tous les vignerons ne vont pas être d'accord là-dessus !* »

> Quels sont les besoins en eau de la vigne ?

L'entretien effectué auprès de Vivian Zufferey, ingénieur agronome à Agroscope Pully (entretien du 02/08/2016) a permis de collecter des informations concernant les besoins en eau de la vigne et le stress hydrique. Selon lui, les besoins en eau de la vigne varient entre 300 et 600 mm par an durant la période végétative (avril - septembre). La limite des 300 mm concerne plutôt les climats méditerranéens (secs et chauds), car la vigne s'adapte aux conditions climatiques et va réguler sa transpiration. La limite des 600 mm concerne plutôt les climats tempérés (humides), car si la vigne a de l'eau à disposition, elle va l'utiliser. En Valais (400-500 mm), le climat est intermédiaire : il y a une tendance méditerranéenne, mais avec des périodes sèches moins précoces et des printemps plus humides et frais qu'en Espagne, Argentine ou Californie. « *Les conditions idéales de développement de la vigne (pour une bonne qualité du vin) sont d'avoir un déficit hydrique 'modéré' durant l'été. Ce déficit hydrique 'modéré' est difficile à évaluer !* » A l'inverse, un logiciel de modélisation agroclimatique des besoins en eau des cultures tel CROPWAT (ALLEN et al. 1998) va se baser sur un rendement à 100 %.

> Comment évaluer la contrainte hydrique ?

ZUFFEREY et MURISIER (2004) détaillent dans leur étude des terroirs viticoles vaudois le juste équilibre à trouver pour les besoins en eau de la vigne : « *Les excès comme les manques d'eau sont généralement néfastes à l'obtention d'une vendange qualitative. Une alimentation hydrique non limitative tout au long de la saison induit un excès de vigueur qui altère la qualité de la récolte :*

*hausse des rendements, compétition accrue pour la répartition des sucres entre partie végétative et reproductive, phénomènes de dilution, réduction de la coloration des vins, altération du microclimat de la zone des grappes et développement de parasites... (*CHAMPAGNOL *1984 ;* PAYAN *et* SALANÇON *2002). Une contrainte hydrique progressive (dès la floraison) et modérée conduit par contre à un ralentissement ou à un arrêt de la croissance végétative autour de la véraison (*CARBONNEAU *1998) et favorise ainsi la production de raisins plus riches en sucres réducteurs, en anthocyanes, en composés phénoliques et moins acides (*VAN-LEUUWEN *et al. 1998). A la véraison, la fourniture en eau doit être suffisante pour compenser l'évapotranspiration, mais insuffisante pour assurer la croissance (*BESSIS *et* ADRIAN *2000).* »

Deux manières de calculer la contrainte hydrique de la vigne sont couramment utilisées :

Le déficit hydrique cumulé est la somme des écarts entre les pluies (P) et l'évapotranspiration de référence (ET_0) depuis le 1er janvier.

$$\text{Déficit hydrique cumulé} = \sum(P - ET_0) \tag{6.1}$$

Les observations réalisées sur le vignoble vaudois de La Côte par ZUFFEREY et MURISIER (2004) aident à mettre en contexte cet indicateur et font le lien avec les caractéristiques pédologiques abordées dans la partie précédente de ce chapitre. « *Dans les sols à grand réservoir d'eau (RU > 150 mm), la contrainte hydrique demeure faible tant que le déficit hydrique s'avère inférieur à 300-320 mm. Au-delà, la contrainte devient modérée et même forte avec des déficits avoisinant les 400-420 mm. Dans les moraines compactes de pente [semblable aux sols 'béton' à faible infiltrabilité décrits lors de l'entretien du 02/07/2016] dont la RU estimée s'élève entre 70 et 150 mm, la contrainte modérée est atteinte vers [un déficit hydrique de] 200-250 mm.* »

Le bilan hydrique potentiel rajoute la réserve utile des sols (RU) à la somme des écarts entre les pluies et l'évapotranspiration potentielle.

$$\text{Bilan hydrique potentiel} = \sum(RU + P - ET_0) \tag{6.2}$$

Si le bilan hydrique potentiel est positif, la contrainte hydrique est faible à nulle, quel que soit le type de sol ou la RU des sites. Si le bilan est autour de -150 mm, la contrainte hydrique est modérée dans la majorité des cas d'étude. Par rapport au calcul des précipitations et à leur efficacité, Vivian Zufferey remarque qu'il faut faire attention aux courtes pluies d'orage ne s'infiltrant pas et qui atteignent à peine la RU des sols.

> Quels facteurs influencent les besoins en eau de la vigne ?

- Le cépage. La relation n'est pas toujours claire et directe entre type de cépage et résistance au stress hydrique, mais certaines tendances existent. Par exemple, des cépages rouges comme le Pinot noir aiment le sec, alors que des cépage blancs comme la Petite arvine sont sensibles au stress hydrique ;
- Le porte-greffe ;
- L'âge de la vigne ;
- Les techniques culturales (hauteur de la vigne, espacement des ceps, écartement des lignes) ;

- La réserve en eau utilisable du sol (RU), qui dépend à son tour du type de sol, sa profondeur et sa porosité ;
- Le climat. Les températures, les précipitations, l'ensoleillement et le vent qui, ensemble, déterminent l'évapotranspiration de la vigne.

Règles de gestion communales : calendrier et zones d'irrigation

Lors des années de grande sécheresse, l'infrastructure d'irrigation n'est pas suffisamment dimensionnée pour arroser l'ensemble des parcelles en même temps durant la période principale d'irrigation (de la fin juin à la mi-août). C'est pourquoi des règles de gestion communales de l'irrigation ont été mises en place pour le vignoble et contrôlent la répartition spatiale et temporelle de l'irrigation. L'irrigation des plantations est autorisée à tout moment. L'irrigation des vignes adultes est libre de l'ouverture du réseau (courant avril) jusqu'au 29 juin et dès le 1er semptembre jusqu'à sa fermeture (fin octobre). Durant ces deux périodes, il y a habituellement peu d'irrigation. Entre le 29 juin et le 1er septembre, un système de tournus d'irrigation est mis en place par la commune (Fig. 6.11) sur la base d'une répartition du vignoble en quatre secteurs d'arrosage. Chaque secteur correspond à une zone alimentée par une des ramifications du réseau, pour laquelle l'irrigation est partagée en 18 tours (un tour = un jour d'arrosage). Le calendrier communal indique les bornes hydrantes de chaque secteur ayant le droit d'irriguer au tour correspondant. Du début juillet à la fin août, chaque tour dispose de trois dates pour irriguer, pouvant être espacées de 21 à 24 jours suivant les différents cas de figure (par exemple, il n'y a pas de tour le dimanche et les jours fériés).

Il est intéressant de noter que lors de l'entretien avec les vignerons amateurs de Montana-Village (entretien du 02/07/2016), ceux-ci ont assuré ne jamais avoir vu ce calendrier et donc ne l'avoir jamais utilisé. De plus, les techniciens du service communal des eaux (entretien du 17/11/2015) racontent qu'il y a une certaine tension due à la compétitivité entre vignerons et leur suivi des tours par rapport à la disponibilité en eau : « *s'il y a assez d'eau, les vignerons ne suivent pas trop les tours, mais s'il y a peu d'eau, ils font attention* ». Les vignerons-encaveurs rapportent également que « *lors de la canicule de 2003, il fallait bien respecter le tournus pour garder assez de pression dans le réseau* », ce qui laisse entendre que durant les années sans canicule, le tournus n'est pas aussi bien respecté.

Ces différents témoignages indiquent donc que le suivi du calendrier d'irrigation par l'ensemble des vignerons est probablement à mettre en question.

MUNICIPALITÉ DE MONTANA

COMMUNE DE MONTANA

PROGRAMME 2015

IRRIGATION DU VIGNOBLE

TOURS	DATES			SECTEUR 1 HYDRANT No	SECTEUR 2 HYDRANT No	SECTEUR 3 HYDRANT No	SECTEUR 4 HYDRANT No
1	29.06	20.07	11.08	101 - 102 - 103 - 104 105 - 106 - 125	201 - 202 - 203 - 204	363 - 364 - 365	424 - 470
2	30.06	21.07	12.08	107 - 108 - 109 - 110	205 - 206 - 207 - 211 212 - 213	366 - 367 - 368 - 369	
3	1.07	22.07	13.08			306 - 307 - 308 - 354 355 - 356 - 357 - 358	462 - 463 - 464 - 465 466 - 467
4	2.07	23.07	14.08	111 - 112 - 113 - 114 115	208 - 209 - 210	353 - 359 - 360 - 361 362	
5	3.07	24.07	17.08	116 - 117 - 118 - 119	214 - 215 - 216	301 - 302 - 303 - 304 305	405 - 406 - 407 - 408
6	4.07	25.07	18.08	120 - 121 - 122 - 123	217 - 218 - 219 - 229 230		418 - 419 - 421 - 423
7	6.07	27.07	19.08	129 - 130 - 131 - 132 133 - 134 - 136 - 137 138	220 - 221 - 222 - 223 220b	312 - 346	401 - 402 - 403 - 404
8	7.07	28.07	20.08				425 - 426 - 427 - 428 429 - 430 - 431 - 432 433
9	8.07	29.07	21.08	144 - 146			434 - 435 - 436 - 437 444 - 445 - 446 - 447 454 - 455
10	9.07	30.07	22.08	139 - 140 - 141 - 142 148 - 150	225 - 236 - 237 - 238 239	313 - 314 - 315 - 345	412 - 413 - 414 - 415
11	10.07	31.07	24.08	145 - 147 - 149	233 - 234 - 235	316 - 343 - 344 - 347	417 - 420 - 422
12	11.07	3.08	25.08			309 - 310 - 311 - 348 349 - 350 - 351 - 352	458 - 459 - 460 - 461
13	13.07	4.08	26.08	124 - 125 - 126 - 127 128 - 143	226 - 227 - 228	317 - 318 - 341 - 342	409 - 410 - 411 - 416
14	14.07	5.08	27.08	152 - 153 - 154	231 - 232 - 240	319 - 320 - 321 - 322	438 - 439 - 440 - 452
15	15.07	6.08	28.08	151 - 155 - 156	233 - 234 - 235	323 - 324 - 325	441 - 442 - 443
16	16.07	7.08	29.08	161 - 339		326 - 327 - 328 - 329 340 - 341	453
17	17.07	8.08	31.08	159 - 160		330 - 331 - 332 - 333	448 - 449 - 450 - 451
18	18.07	10.08	1.09	157 - 158 - 163		334 - 335 - 336 - 337 338	

2.07	13.07	23.07	1er tour	TEMPLOZ
4.08	14.08	26.08	2ème tour	TEMPLOZ

FIGURE 6.11 – Calendrier communal 2015 des tours d'eau d'irrigation du vignoble de Montana.

Différences de pratiques entre vignerons amateurs et professionnels

Les pratiques différentes des vignerons-encaveurs (professionnels) et vignerons amateurs peuvent également influencer la répartition spatiale de l'irrigation du vignoble.

D'après les entretiens auprès des vignerons-encaveurs, les viticulteurs professionnels seraient plus attentifs, plus fins dans la conduite de la vigne : ils connaissent leurs sols et les besoins de la vigne. Ils relatent également « *qu'aujourd'hui, on irrigue pour faire du vin de qualité et pas comme avant ou c'était pour faire de la quantité, du rendement* ». Le vigneron encaveur rencontré au cours de l'entretien du 03/02/2015 explique que de manière générale il arrose peu : « *juste les parcelles sèches* ».

Par contre, les coopératives, elles, seraient d'après lui plus orientées « *business* ». Le terroir serait moins bien connu car elles « *... emploient généralement des viticulteurs qui ne sont pas de la région* » (entretien du 03/02/2015). Le travail de la vigne serait donc moins fin et plus orienté sur la quantité que la qualité, ce qui engendrerait plus d'irrigation pour obtenir plus de rendement. Les vignerons amateurs, toujours d'après lui, irriguent par effet de 'mimétisme' : ils observent les autres vignerons pour voir quand ils irriguent ou viennent demander aux vignerons professionnels s'il faut arroser.

De manière similaire, les vignerons amateurs rencontrés à Montana-Village (entretien du 02/07/2016) expliquent que la prise de décision d'arroser se fait quand ils voient que quelqu'un a irrigué : « *c'est de l'imitation. Et on ne discutait pas tellement avec les autres.* » Ils ajoutent : « *Le déclenchement de l'eau était sûrement de l'imitation des autres. Mais pour le premier qui commençait, c'était assez empirique : on avait le sentiment du sec, ou la réalité du sec. Les critères étaient très simples : la feuille.* »

D'autres facteurs influencent aussi les pratiques d'irrigation, comme par exemple la tarification à la surface. D'après un des vignerons professionnels (entretien du 03/02/2015), il existe une génération 'on a payé la taxe, donc on arrose' qui fait que certains vignerons vont arroser leur vigne dans tous les cas. L'aspect habituel de l'irrigation jouerait également un rôle : c'est le travail routinier d'arrosage, effectué chaque année. Similaire à la mémoire du risque, « *les traces des années sèches, qui marquent les esprits* » joueraient également un rôle dans l'acte d'irriguer. Enfin, « *certains [souvent, les plus âgés] ont la 'phobie de la sécheresse' : ils irriguent systématiquement* ».

Le vigneron amateur de Champzabé (entretien du 03/02/2015) reconnaît qu'il arrose « *des fois un peu au bol* ». Par ailleurs, il indique que l'on pourrait distinguer deux types de vignerons amateurs : les occasionnels (soignant les vignes après le travail et les weekends) et ceux à temps plein (majoritairement les personnes retraitées).

La conclusion qui peut être formulée est que les professionnels (les vignerons-encaveurs) connaissent mieux leur sol, sont mieux formés au techniques agronomiques et ont intérêt à porter attention à la qualité de leur raisin car ils vendent leur propre vin. Ils préfèrent ne pas trop irriguer pour garder une bonne teneur en sucre du raisin : ne pas le 'diluer'. A l'inverse, les vignerons amateurs vendent leur raisin au kilo à un grossiste, ce qui laisse penser qu'ils sont moins attentifs à la qualité du raisin, en irrigant plutôt pour assurer une quantité suffisante pour atteind4re les quotas de production fixés par le canton.

Selon les viticulteurs-encaveurs interrogés, ces dernières années, il aurait de plus en plus de vignerons professionnels et donc, de moins en moins d'irrigation systématique.

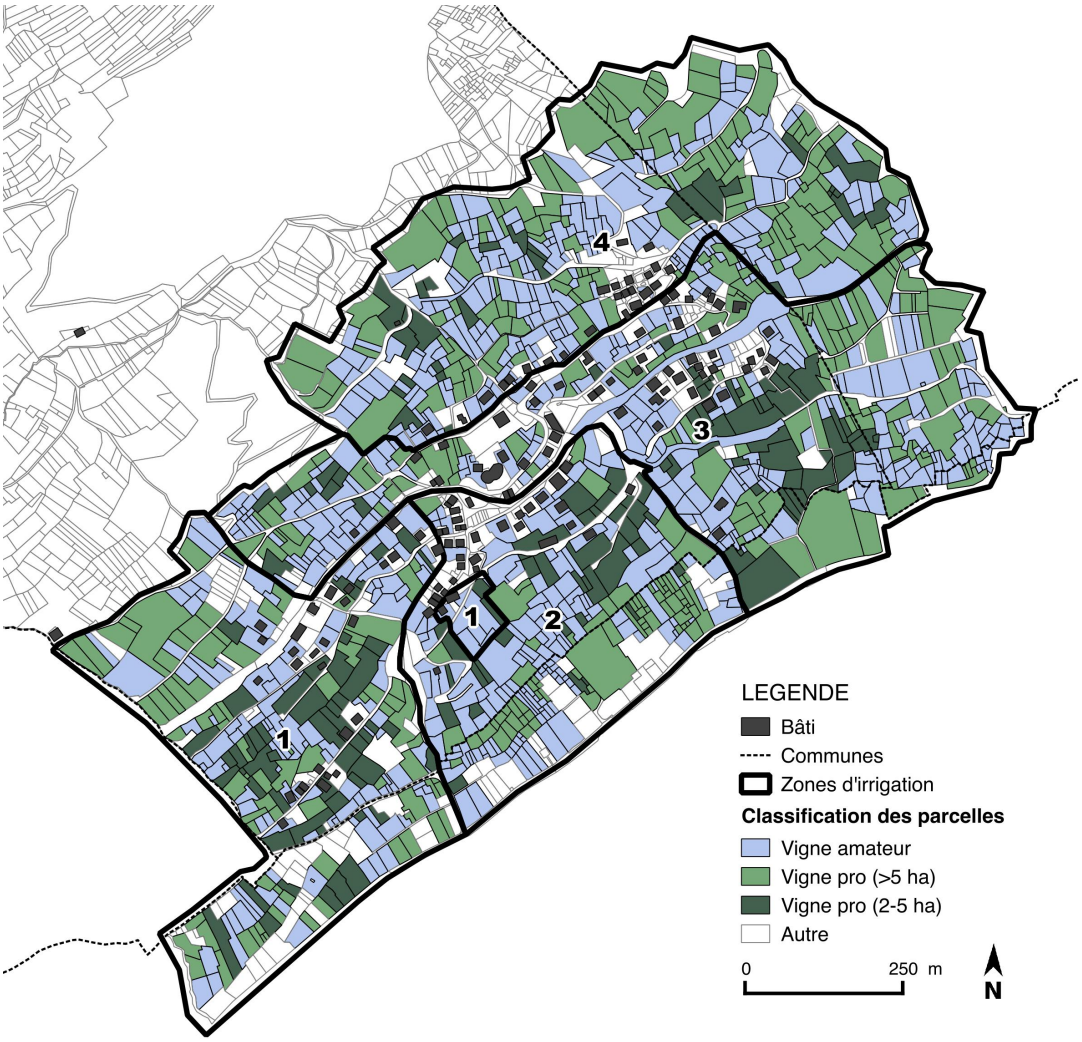


FIGURE 6.12 – Zones d'arrosage du vignoble irrigué par le réseau de Montana et classification des parcelles suivant le type de viticulteur (professionnel ou amateur). Cartographie : Martin Calianno. Source : Service de l'agriculture, Canton du Valais (données 2015).

La cartographie du vignoble sur la Figure 6.12 distingue les parcelles soignées par des professionels ou des amateurs, sur la base du registre des paiements directs. Les paiements directs sont des subventions cantonales ayant pour objectif, d'une part, de séparer la politique des prix et des revenus et d'autre part, de rétribuer les prestations fournies dans l'intérêt général : maintien de la diversité des paysages cultivés, contribution à la sécurité alimentaire, soutien à la biodiversité, promotion des mode de production respectueux de l'environnement et utilisation durable et efficiente des ressources (SCA 2017). Les vignes en pente faisant l'objet de ces subventions, le registre des parcelles du vignoble de Montana recevant des paiements directs a été récupéré auprès du Service cantonal de l'agriculture. Les contributions ne sont versées que si la surface viticole en pente est d'au moins 10 ares par exploitation et seules sont prises en compte les surfaces des parcelles d'au moins 1 are d'un seul tenant. Ces registres ont été anonymisés, mais pour chaque parcelle est indiquée la surface totale d'exploitation pour laquele le viticulteur a droit aux subventions (y compris hors de la zone d'étude), ce qui permet de différencier un exploitant professionel d'un non-professionnel. En prenant pour base la classification faite par le Service de l'agriculture, le seuil de 2 hectares a été choisi pour différencier les exploitants : en dessous, ceux-ci

sont considérées comme amateurs, au-dessus, comme professionnels. Sur la carte, la classe 'professionnelle' a été subdivisées en deux, pour donner trois catégories au total : vigne entretenue par un amateur (exploitation totale < 2 ha), vigne entretenue par un professionnel (exploitation totale 2-5 ha) et vigne entretenue par un professionnel (exploitation totale > 5 ha).

Selon cette méthode, on arrive à un résultat d'environ 50/50 pour le type de parcelles : 39 ha sont cultivées par des amateurs et 44 ha par des professionnels. On peut également observer que les parcelles exploitées par des vignerons amateurs sont plus morcelées et proches des habitations que les parcelles soignées par des viticulteurs professionnels.

Temporalité des arrosages : pratiques des vignerons

Pour se faire une idée du nombre réel de tours d'arrosage par an et comprendre les temporalités plus courtes (de l'ordre du jour ou de l'heure), il faut s'intéresser aux pratiques particulières des vignerons.

> Combien d'arrosages par an ?
> Comment décider de déclencher l'irrigation ?

Par rapport au nombre de tours d'arrosage par an, le calendrier communal d'irrigation (Fig. 6.11) prévoit trois périodes d'arrosage par parcelle, mais d'après les entretiens faits auprès des vignerons, ceux-ci irriguent au maximum deux fois par saison.

Selon un des vignerons-encaveurs (entretien du 03/02/2015), sur les parcelles calcaires (à l'ouest du vignoble) équipées de terrasses et grands murs, la rétention en eau du sol est faible. Il arrose donc une ou deux, voire trois fois, mais généralement, un arrosage suffit.

L'agronome (entretien du 02/08/2016) a listé certains facteurs participant au processus de décision d'irrigation :

- L'observation de l'état de la vigne par le viticulteur : jaunissements, flétrissement des feuilles ;
- Les prévisions météorologiques, tenant compte du climat des jours précédents ;
- Les tours d'eau. Lorsque le tour d'eau arrive, certains viticulteurs peuvent avoir tendance à irriguer par précaution. « *Par exemple, si la météo prévoit du chaud et sec, il peut y avoir de l'arrosage préventif pour profiter de son tour* » ;
- L'effet 'mimétisme' : « *on arrose lorsque l'on voit son voisin arroser* ».

Les vignerons-encaveurs rencontrés à Montana (entretien du 17/11/2015) estiment eux que si d'avril à septembre il y a eu un cumul de précipitations supérieur à 400 mm, il n'y a pas besoin d'irriguer.

A Montana-Village deux vignerons amateurs de générations différentes ont été interviewés (entretien du 02/07/2016) : le père de famille (proche de 50 ans) et le grand-père (proche de 75 ans). Le père indique que de manière générale sur le vignoble de Montana, un

premier arrosage est fait à la fin juin. Les critères de décision sont les prévisions météorologiques, l'état de la feuille et l'observation des pousses (sont-elles fraîches ?). Si la repousse de la vigne est rapide, cela signifie qu'il y a assez d'eau, donc pas besoin d'arroser. Inversément, une repousse lente indique un manque d'eau. Un deuxième arrosage a généralement lieu à la mi-juillet (15-20 juillet). Les critères de décision sont l'observation des sarments (les rameaux verts que la vigne produit chaque année), de la vivacité des feuilles, du bourgeon (a-t-il tendance à devenir bois et à prendre la couleur qu'il a lorsqu'il est sec ?) et de la grappe (a-t-elle tendance à se ratatiner ?). Enfin, un troisième arrosage peut avoir lieu au début août. Le grand-père ajoute que « *maintenant, les gens n'arrosent plus qu'une seule fois* », et que « *le dernier arrosage est avant le 5 août, après faut plus faire* ». Le père indique que « *maintenant que l'on a le souci de la qualité du raisin, on ne va pas le gonfler d'eau, donc on n'arrose plus en août, car à ce moment, ça n'apporte que de l'eau à la baie* ».

Le vigneron amateur (père) a décrit son propre processus de prise de décision pour l'arrosage. Il raconte ne pas avoir de formation viticole professionnelle, qui fonctionne « *par héritage, tradition, par écoute, avec internet* ». Pour lui, le déclenchement de l'irrigation se fait 'à l'oeil' : « *avec l'expérience, l'oeil me montre que depuis 2003 [année de grande canicule], il n'a pas été nécessaire d'arroser* ». Mais « *ça dépend aussi très fort des personnes et de leur rapport à l'eau. Il y a très bien des personnes qui disent 'je fonctionne à l'oeil', et l'oeil m'a dit qu'il fallait mettre de l'eau !* » Le déclenchement de l'irrigation est donc un processus de décision directement lié aux perceptions et aux expériences vécues par les vignerons.

Le grand-père, lui, arrose jusqu'à trois fois par an. « *Ca, c'est pour ceux qui arrosent le plus.* » Il indique par ailleurs que « *ça dépend des parcelles aussi [les plus sèches]* ». Les moments d'irrigation sont également dépendants des dates de sulfatage de la vigne. Il faut éviter d'irriguer juste après un sulfatage pour ne pas les lessiver. Pour ce faire, il indique qu'il connaît les dates de sulfatage à l'avance (tous les 10-15 jours) et qu'il sait qu'un arrosage tient trois semaines.

> A quel moment de la journée irriguer ?

Les vignerons-encaveurs rencontrés (entretien du 08/01/2015) expliquent arroser le matin très tôt car à ce moment-là, il y a peu de vent (ce qui évite d'arroser les parcelles voisines) et les températures sont basses (pour limiter les pertes par évaporation). L'arrosage est continu et dure de 4 à 6 heures. Le viticulteur amateur de Champzabé (entretien du 03/02/2015) explique de son côté qu'il arrose toute la nuit (environ 8 heures), une fois par saison, voire deux fois maximum, si c'est vraiment sec. Les vignerons amateurs de Montana-Village (entretien du 02/07/2016) racontent qu'ils irriguent toute la nuit (8 heures environ), quand il n'y a pas de vent (ils précisent aussi que la nuit, il y a moins de vent). « *Et ça tient trois semaines. Au mois d'août, si les grappes étaient un peu ratatinées, séchées, on mettait l'eau pendant 5 heures.* »

Temporalité des arrosages : phénologie de la vigne

Pour comprendre la temporalité de l'irrigation du vignoble, il faut connaître les étapes de croissance de la vigne, c'est-à-dire, les stades phénologiques. Les étapes de croissance végétale varient d'une année à l'autre suivant le contexte climatique. L'échelle dite BBCH décrit

ces étapes qui sont reprises dans le tableau 6.3.

Stade 0	Débourrement	Reprise végétative, gonflement et ouverture des bourgeons.
Stade 1	Développement des feuilles	Croissance des nouvelles pousses et feuilles.
Stade 5	Apparition des inflorescences	Développement de la future grappe.
Stade 6	Floraison	Ouverture des fleurs.
Stade 7	Développement des fruits	Fécondation, grossissement des ovaires et apparition des baies ("nouaison"), la grappe s'incline vers le bas et se ferme (les baies grossies se touchent).
Stade 8	Maturation des baies	Les baies commencent à devenir translucides et/ou changent de couleur, deviennent molles au toucher. A maturité maximale, l'augmentation des sucres et la diminution de l'acidité se stabilisent.
Stade 9	Sénescence	Maturité des bois, chute des feuilles, début du repos végétatif.

TABLEAU 6.3 – Stades phénologiques de la vigne, modifié d'après BLOESCH et VIRET (2008).

Lors de sa période de développement (d'avril à septembre), il y a deux moments où la vigne est particulièrement sensible au stress hydrique (Fig. 6.13) :

1. Au printemps (avril - mai), pour les jeunes plantations, durant la période végétative. Un arrosage est effectué une fois les jeunes vignes plantées et ensuite tous les 15 jours (entretien du 17/11/2015). Ces irrigations représentent de petits volumes car à ce moment, les racines ne sont pas encore en profondeur.
2. En été (fin juin - mi août), c'est la période de développement du raisin. Suivant les conditions climatiques et lorsque le vigneron estime que sa vigne pourrait subir un stress hydrique, un à deux arrosages sont effectués.

Ensuite, à partir du moment où le raisin a atteint sa maturité (mi août - début septembre), les vignerons ont pris l'habitude de ne pas irriguer, pour éviter le pourrissement du raisin dans le cas où des pluies importantes venaient à se produire avant les vendanges.

Les dates des différentes étapes de croissance végétative sont bien sûr dépendantes des conditions climatiques. Les observations phénologiques de la vignes faites à Châteauneuf (VS) par Agroscope sur le chasselas (fig. 6.13) résument bien l'évolution des saisons 2015, 2016 et 2017. L'année 2015 a été marquée par une importante canicule au cours du mois de juin jusqu'à la mi-juillet (voir Fig. 6.17). Cette période de chaleur a provoqué une maturité précoce de la vigne, observée dès le 11 août. L'année 2016 a, elle, été caractérisée par des mois de mai et juin frais et pluvieux causés par des passages répétés de perturbations, ce qui a retardé les stades de fin de développement de la vigne : véraison (8 août) et maturité (7 septembre). Enfin, l'année 2017 a été caractérisée par un début de printemps exceptionnellement sec et doux, ce qui a engendré des débourrements et des floraisons très précoces (4 avril et 30 mai, respectivement). Des retours de gel à la mi-avril ont par ailleurs causé passablement de dégâts sur la vigne et les abricotiers en Valais.

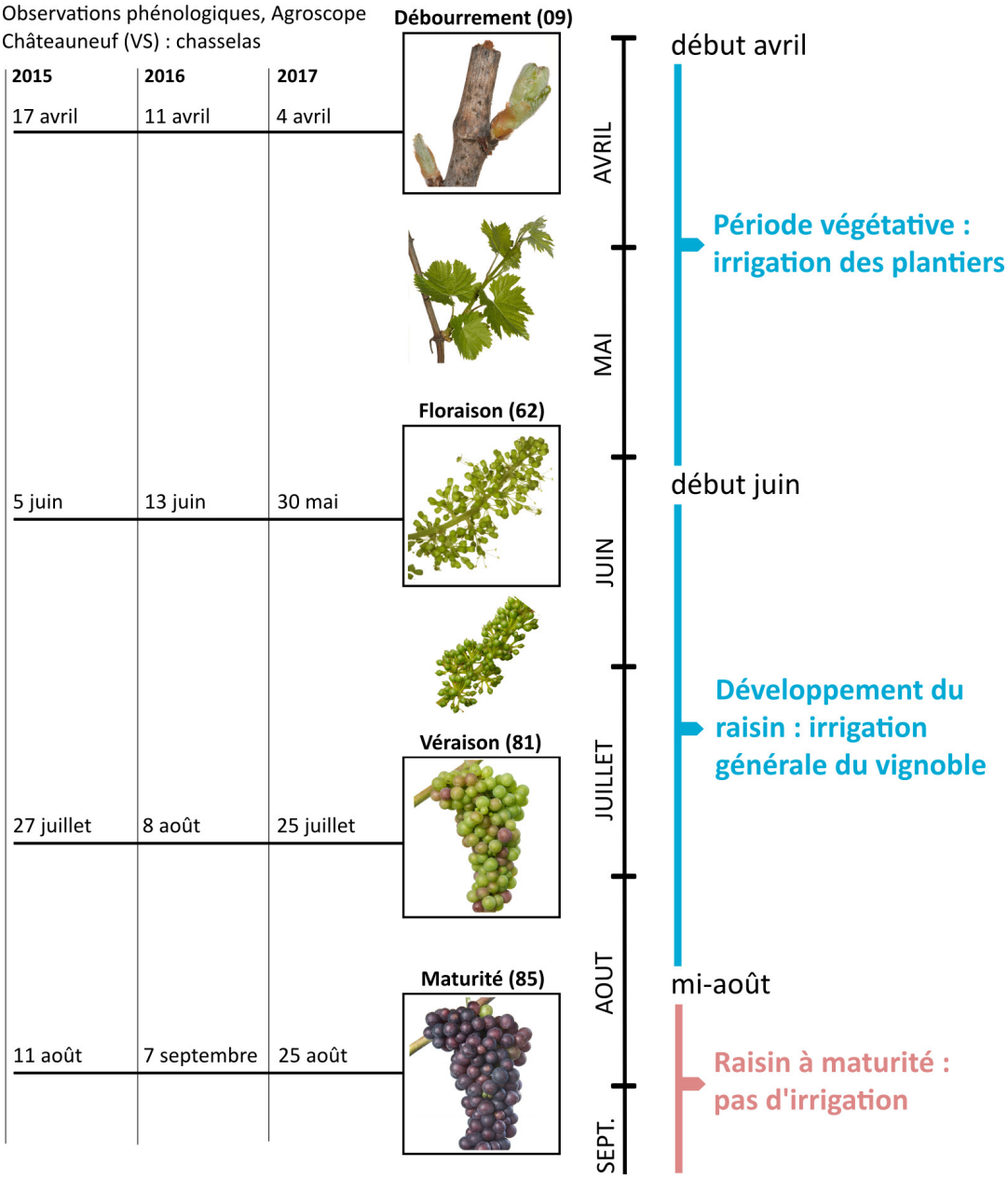


FIGURE 6.13 – Stades phénologiques de la vignes et moments d'irrigation.
Source des images (pinot noir) et des observations (chasselas) : Agroscope.
Réalisation du schéma : M. Calianno.

6.2.4 Influence du contexte historique et économique sur les pratiques d'irrigation du vignoble à Montana

Parmi les facteurs influençant les besoins en eau de la vigne et les pratiques des irrigants, certains sont relativement bien étudiés et modélisés, comme par exemple les paramètres climatiques, agronomiques et pédologiques, ou les calendriers de tours d'eau. Par contre, la prise de décision des irrigants d'arroser ou non est un facteur humain qui peut modifier très fortement les quantités d'eau effectivement demandées. C'est le cas du vignoble valaisan qui est très morcelé et possède une grande densité de vignerons différents, ayant chacun leur propre perception de l'état de leur vigne et leurs propres besoins en eau d'irrigation. Dans la partie suivante, un petit historique des modes de vie à Montana permet de mettre

en contexte les différences de comportement observées entre irrigants de générations différentes.

Facteurs culturels et économiques influençant les pratiques d'irrigation

Un bref historique de l'évolution des modes de vie à Montana au cours du siècle précédent a été reconstruit à partir des entretiens avec les acteurs de l'irrigation. Cette mise en contexte permet de mettre en lumière certains facteurs culturels et économiques ayant influencé les différentes générations d'irrigants à Montana et donne certaines raisons expliquant pourquoi des acteurs irriguent beaucoup et d'autres très peu.

Jusqu'au début du 20^{e} siècle, les territoires de montagne en Valais étaient basés sur une économie de subsistance. L'eau était considérée comme un élément sacré, indispensable à la survie. Le vigneron amateur de Montana-Village (entretien du 02/07/2016) raconte : « *j'ai été élevé avec le sentiment que la terre était une ennemie, c'est une méchante qu'il faut combattre : elle est maigre, elle est avare, il faut la nourrir, l'enrichir et il faut se battre avec elle. On n'est plus dans cette perspective-là maintenant. Si [mon père] met de l'eau, c'est en partie pour ne pas en laisser au voisin, dans le système !* » L'irrigation par ruissellement, alimentée par les bisses, était la pratique d'arrosage communément employée.

A partir de 1960, le développement des domaines skiables dans les stations touristiques de montagne et de l'industrie en plaine change la donne économique : de nouveaux emplois sont créés. Parallèlement à la mécanisation de l'agriculture en plaine, les villages traditionnels de montagne sortent de l'économie rurale et une déprise des surfaces agricoles de subsistance s'enclenche. On observe une diminution massive du nombre d'exploitations d'élevage bovins et une régression des surfaces cultivées et fourragères, alors que dans le même temps, les surfaces de vignes et de zones à bâtir augmentent (ARCALPIN 2010). Il y a également une baisse de diversification de la production végétale et une augmentation de la taille moyenne des exploitations. Il est nécessaire de trouver d'autres sources de revenus : l'agriculture à plein temps devient une agriculture à temps partiel.

Dans les années 1970, avec le développement des réseaux d'irrigation sous pression, l'irrigation par aspersion se généralise et améliore les rendements d'arrosage. La production de raisin devient une source de revenus appréciable pour les particuliers qui travaillent la vigne de manière occasionnelle. Les rendements de production des vignes (et l'irrigation) sont alors tirés au maximum car en Valais, la tradition la plus répandue est de revendre les raisins à des grossistes et cette revente se fait au poids. Beaucoup de vignerons amateurs font tout de même leur propre vin, mais il est principalement destiné à la consommation familiale. D'après le vigneron amateur de Montana-Village (entretien du 02/07/2016) : « *entre 1975 et 1982, mon père produisait autour de 3.3 kg/m^2 pour un prix maximum de 4.50 francs/kg [pour le Chasselas]. Cela produisait un vin bon, dans les critères de l'époque. Au total des parcelles, cela lui rapportait environ 18 000 francs. Donc pour beaucoup de paysans vignerons, ça a été un moyen de s'enrichir et de progressivement atteindre le niveau de vie des autres. Mon père était à mi-temps paysan et cantonnier sur la route. Et à un moment donné, la campagne a rapporté plus que sur la route. A cette époque-là, la viticulture était une production intensive.* »

En 1982 éclate en Valais la 'crise des piscines', une crise viticole due à une production excessive de raisin. Le vigneron de Montana-Village explique ce terme : « *on a eu tellement*

de moût qu'on ne savait plus où le mettre, alors on le mettait dans des piscines ». Les prix se sont alors effondrés et des quotas de production ont été mis en place : « *ça n'a pas été facile, on est passé de rendements de 3 kg/m^2 à moins de 1.6 kg/m^2, [...], à environ 2.90 francs/kg. Ce qui fait que pour l'ensemble de mes vignes, qui sont toutes petites, quand tout va bien [pas de maladies, etc], mon revenu brut est de l'ordre de 5000-5500 francs.* » Depuis cette crise des surplus et la mise en place des quotas, la viticulture s'est progressivement désintensifiée et l'irrigation également. Les pratiques d'arrosage se sont modifiées : « *les quotas ne nécessitent plus d'arroser tant : on privilégie maintenant la qualité du raisin sur la quantité* ». Le grand-père ajoute : « *maintenant, c'est les plantations qui prennent l'eau, pour la reconstitution du vignoble. On arrose beaucoup moins qu'avant. L'irrigation se fait à l'eau claire, avec les tuyaux, c'est plus facile. Avant on arrosait beaucoup parce qu'ils [les grossistes] payaient beaucoup.* »

Le vigneron amateur (père) explique ensuite : « *Je crois, de manière empirique, qu'on a gardé le réflexe de l'eau quelques années encore après que la loi sur l'agriculture ait changé et que nous ayons du changer complètement notre mode de production. Cela n'a pas été facile. On s'est retrouvé à ne pas savoir travailler la vigne de cette manière-là : il nous restait énormément de grappes. On a essayé de faire toutes sortes de choses avant de rentrer dans le rang : recycler en douce, vendre, faire du jus de raisin. Ce qui n'était pas du tout le cas dans le canton de Vaud car les vignerons vaudois par tradition font leur vin, alors qu'en Valais ils sont fortement liés à des coopératives [par exemple, Provins]. En Valais, il n'y avait pas le souci du produit fini, puisqu'on nous donnait le maximum d'argent [au kilo]. Donc on s'en fichait de la qualité finalement, malgré le fait qu'à l'achat il fallait quand même un minimum de degrés de sucres. Pour plus de rendement, on plantait les vignes plus serrées, beaucoup de ceps sur peu d'espace. Aussi, pendant l'année, on arrosait et on sulfatait beaucoup, plus énormément d'engrais. Maintenant, on sait que les grosses baies nuisent à la typicité du vin. Alors à l'époque quand on arrosait on allait à l'encontre de ce principe. L'idée c'était de faire du poids et donc de l'argent. [Par ailleurs], on sait qu'un manque d'eau peut avoir un effet négatif aussi sur le vin, donc il y a un équilibre à trouver.* »

Après l'instauration des quotas, une grande quantité de vignerons ont enlevé une ligne de ceps sur deux. Aussi, d'après un des vignerons encaveurs (entretien du 03/02/2015), après les années 1990 s'est dévelopé un esprit plus qualitatif. « *Il y a une nouvelle génération de vignerons, formée aux bonnes pratiques d'irrigation*. »

Depuis les années 2000, il semble que les nouvelles générations de viticulteurs tendent à irriguer de moins en moins. Le vigneron amateur (père) de Montana-Village (entretien du 02/07/2016), lui, a décidé d'arrêter d'irriguer sa vigne depuis l'année de la grande canicule (2003). « *Quand j'ai vu que la vigne résistait cette année-là, je me suis dit que ce n'était plus nécessaire d'arroser.* » C'est un constat personnel, mais pour lui 2003 est un point de repère. Il est d'une certaine manière le prototype de ceux qui arrosent très peu maintenant. « *J'ai vécu les deux époques [avant et après la crise des surplus des années 80]. Avant je faisais ce qu'on me disait de faire. Puis quand j'ai eu une vigne, un peu après la crise, j'ai arrosé très peu. Et depuis la canicule de 2003 je n'ai plus du tout arrosé sauf, comme le disait papa, lorsque j'ai des plants jeunes. Et là j'arrose en général deux fois. Ce sont mes seuls usages à l'heure actuelle de l'installation d'arrosage collectif.* »

Son père, par contre, arrose beaucoup plus. « *Mon père et l'agriculteur de Montana [qui est de la même génération] aiment bien irriguer, ça c'est sûr !* » Lors de ma visite à Montana-Village pour interviewer les vignerons amateurs, le grand-père était d'ailleurs en train d'arroser son

potager alors qu'il pleuvait ce jour-là. On peut donc retenir que les générations qui ont vécu la période de subsistance d'avant les années 1960 ont tendance à irriguer beaucoup plus que les nouvelles générations.

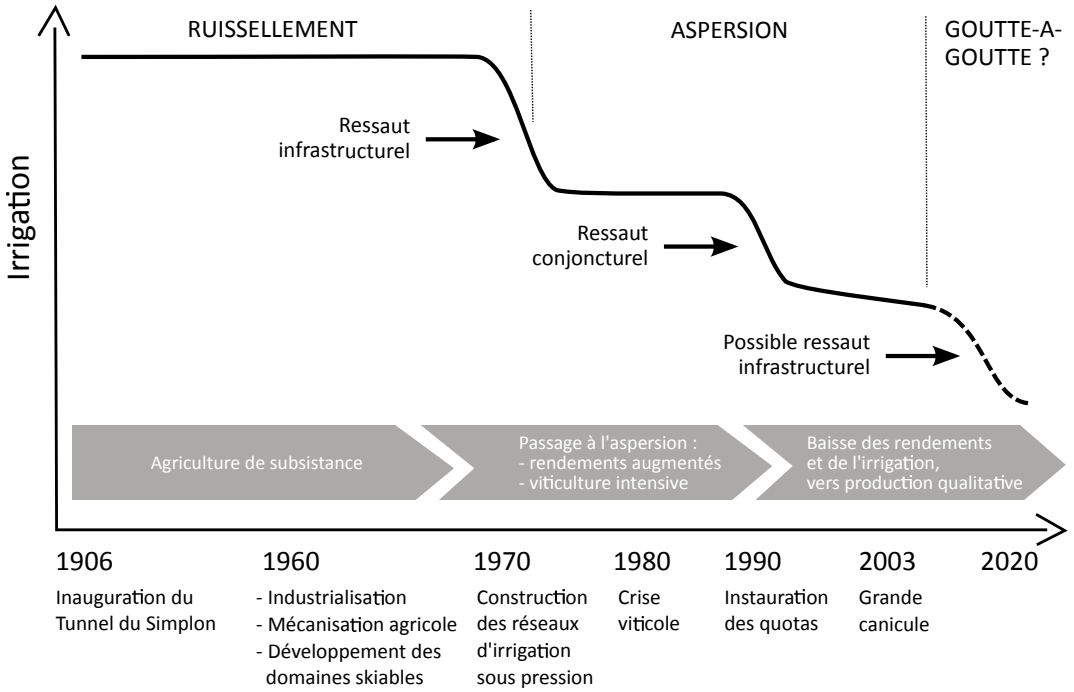


FIGURE 6.14 – Evolution de l'irrigation du vignoble au cours du 20e siècle.

En résumé (Fig. 6.14), il est possible d'affirmer que depuis la moitié du vingtième siècle l'irrigation du vignoble valaisan n'a fait que graduellement diminuer avec l'abandon de l'irrigation par ruissellement au profit de l'aspersion (ressaut infrastructurel) et plus tard, en raison de l'instauration de quotas de production suite à la crise viticole (ressaut conjoncturel). Aujourd'hui, les infrastructures d'irrigation au goutte-à-goutte sont encore trop anecdotiques dans la région pour pouvoir passer à un nouveau ressaut de diminution de l'irrigation, mais celui-ci pourrait se produire dans les prochaines années.

Les profils-types d'irrigants de la vigne

Après ce bref historique et d'après les pratiques décrites dans les parties précédentes, il est possible de classifier différents profils d'irrigants, même s'ils sont en réalité presque aussi divers qu'il y a de viticulteurs ou d'agriculteurs. D'après le technicien communal en charge des réseaux de distribution d'eau (entretien du 24/12/2016) : « *il y a des fous de l'eau qui irriguent ou qui m'appellent dès qu'ils voient le soleil pointer et d'autres vignerons qui n'irriguent pas du tout. Il y a de tout.* »

Par rapport aux générations, on peut distinguer :

- La génération ayant vécu la période 'économie de subsistance', qui a tendance à arroser beaucoup (prairies, vignes et jardins privés), car pour eux, arroser est synonyme de 'survie'.
- La génération ayant vécu la mise en place du système d'irrigation par aspersion et la période de viticulture intensive aurait tendance à arroser systématiquement chaque

année. Pour eux, 'ouvrir les jets' est devenu une habitude, durant les années où l'objectif était de produire le maximum de raisin possible. De plus, la mise en place des réseaux d'irrigation sous pression a été financée par les collectivités et la tarification est faite par rapport à la surface des parcelles, qu'elles soient effectivement irriguées ou non. Ce contexte fait que certains vignerons ont tendance à irriguer tous les ans, par habitude et parce qu'ils payent l'eau de toute manière.

- La génération post-crise viticole aurait tendance à arroser peu. Elle considère les besoins en eau de la vigne dans un contexte de production qualitative des raisins, plus concentrés en sucres et donc moins arrosés. Certains vont même plus loin et estiment que la vigne peut supporter le stress hydrique valaisan sans irrigation.

6.2.5 Pratiques d'irrigation des jardins privés

Dans la station de Montana, la plupart des maisons et chalets individuels sont équipés de systèmes d'arrosage par aspersion à déclenchement automatique, branchés sur le réseau d'eau potable. L'usager programme le système en déterminant la durée de l'arrosage et sa fréquence. Etant donné qu'il y a une grande proportion de résidences secondaires dans la station, il n'est pas rare d'observer des arroseurs automatiques en action alors même qu'il pleut, car les résidents ne sont pas là pour régler le système en fonction de la météo.

Les immeubles d'habitat collectifs de la station sont, eux, généralement pris en charge par un concierge, ce qui signifie que l'irrigation des espaces verts fait l'objet d'un suivi. C'est le cas par exemple de l'une des résidences de la station de Montana (entretien du 16/06/2015), où le concierge déclenche manuellement l'arrosage (Fig. 6.15b) des pelouses et des jardins. Les pelouses (Fig. 6.15a), couvrant une surface d'environ 1000 m^2, sont arrosées par des gicleurs alors que les parterres de fleurs sont pour la plupart arrosés au goutte-à-goutte (Fig. 6.15c). Le concierge raconte avoir utilisé 9 m^3 lors de l'arrosage qu'il a effectué en juin 2015. Rapportés à 1000 m^2, cela représente 9 mm d'apports. Concernant ses pratiques d'irrigation, il ouvre les vannes pendant une heure et pour un bon arrosage, il compte environ 20 mm. Les pelouses et jardins sont irrigués de juin à septembre. « *Une fois la neige fondue [en mai], il ne faut pas tout de suite arroser. Par contre, à partir de juin, il faut arroser car les averses ne font que mouiller les feuilles.* » Cette remarque est intéressante car, comme le soulignait l'agronome Vivian Zufferey (entretien du 02/08/2016), cela pose la question de l'efficacité des pluies intenses lors des averses orageuses. C'est pourquoi dans certains modèles agroclimatiques, les pluies d'une trop forte intensité ne sont pas prises en compte à 100% pour la recharge des réserves en eau du sol. Concernant la fréquence des arrosages, il explique que lors des années sèches, il arrose deux fois par semaine et si l'été est très sec, trois fois par semaine.

Dans les villages situés en contrebas de la station, l'irrigation des jardins se fait via le réseau d'irrigation communal. La proportion de résidences secondaires est moins importante que dans la station, ce qui suppose que les résidents effectuent un suivi plus régulier des systèmes d'irrigation, qu'ils soient automatiques ou manuels.



FIGURE 6.15 – Irrigation des jardins aux résidences Hauts de Crans : pelouses (a), vanne d'arrosage (b) et système d'arrosage sous pression (c). Photographies : juillet 2015.

6.2.6 Pratiques d'irrigation des espace verts publics

Au niveau du village de Corin, les espaces verts publics sont irrigués par aspersion : terrain de football, places de jeux, pelouses et parterres de fleurs (Fig. 6.16). L'arrosage est déclenché manuellement par les techniciens communaux. Les moments d'irrigation se situent donc pendant les heures de travail, entre 9h et 16h. Cette temporalité permet de différencier les arrosages des espaces verts publics par rapport à l'arrosage des vignes, qui se fait principalement la nuit ou très tôt le matin.



FIGURE 6.16 – Arrosage des espaces verts publics à Corin : a) place de jeux ; b) parterre de fleurs et c) terrain de football. Photographies : juillet 2016.

6.3 Estimation des demandes en eau d'irrigation

Dans cette section, trois types de méthodes d'estimation des demandes en eau d'irrigation sont comparées : les méthodes empiriques, les modèles agroclimatiques et les mesures directes.

6.3.1 Méthodes empiriques

Estimation des prélèvements

Le moyen le plus simple d'évaluer les demandes en eau d'irrigation est de se baser sur les estimations des prélèvements d'eau brute destinés aux divers usages du territoire concerné. Plusieurs études se sont déjà penchées sur l'évaluation des prélèvements pour l'ensemble des communes de la région de Crans-Montana-Sierre. Les volumes de ces études sont repris ici en évaluant la part destinée à l'(ancienne) commune de Montana, qui effectue ses prélèvements d'eau brute principalement via le Grand Bisse de Lens et via le captage des eaux de surface dans le vallon de l'Ertentse qui transitent par le tunnel du Mont-Lachaux. La possibilité de prélèvement sur le torrent de Montana (en étiage durant l'été) n'est pas prise en compte car il représente un débit négligeable par rapport aux volumes d'eau transférés vers la commune.

CROOK (1997) a procédé à des mesures de débit sur le Bisse de Lens entre 1986 et 1995. En moyenne sur ces dix ans, 1.13 millions de m^3/an s'écoulent dans le bisse, avec une valeur maximale de 1.94 millions de m^3 en 1989. Comme le suggère REYNARD (2000b), les débits prélevés en 1989 peuvent être considérés comme représentatifs d'une année sèche. Par ailleurs, REYNARD (2000b) se base sur les travaux du Consortium d'ingénieurs (REY-FAVRE-BONVIN-CORDONNIER 1984) pour évaluer les débits écoulés moyens via le tunnel du Mont-Lachaux à 2.13 millions de m^3/an.

Dans le plan directeur 'eau' de l'Association des communes de Crans-Montana (ACCM), le bureau d'étude ARCALPIN (2008) évalue, lui, à 0.3 millions de m^3 l'eau brute prélevée annuellement dans l'Ertentse via le tunnel du Mont Lachaux et à 2 millions de m^3/an l'eau amenée par le Bisse de Lens.

Enfin, BONRIPOSI (2013) estime à 1 million de m^3/an le volume d'eau brute amené au travers du tunnel du Mont-Lachaux, en se basant sur les débits de l'ancien bisse du Ro mesurés en 1925. A l'aide de stations hydrométriques, les volumes d'eau transportés par le Bisse de Lens ont pu être mesurés en 2010 (1.08 millions de m^3/an) et en 2011 (1.30 millions de m^3/an), ce qui donne une moyenne de 1.19 millions de m^3/an.

Pour isoler les volumes destinés à Montana, on sait déjà que l'eau transitant par le tunnel du Mont-Lachaux est répartie à sa sortie en quatre parts égales entre les (anciennes) communes de Lens, Icogne, Chermignon et Montana (MABILLARD 1997). Concernant l'eau du Grand Bisse de Lens, qui dessert également ces quatre communes et finit sa course à Montana, la répartition exacte des volumes n'est pas connue ; nous ferons donc l'hypothèse que Montana reçoit 1/4 des débits du bisse. En divisant par quatre les volumes transitant par le Grand Bisse de Lens et le tunnel du Mont-Lachaux donnés par chacune trois études, les prélèvements estimés pour Montana sont alors respectivement de 815'000 m^3/an (REY-FAVRE-BONVIN-CORDONNIER 1984 ; CROOK 1997 ; REYNARD 2000b), 575'000 m^3/an (ARCALPIN 2008) et 548'000 m^3/an (BONRIPOSI 2013) (Tableau 6.4). Il est intéressant de remarquer les importantes différences d'estimation des débits du tunnel du Mont-Lachaux suivant ces auteurs. Les débits estimés pour le Grand Bisse de Lens restent par contre dans le même ordre de grandeur. Il est à noter que ces valeurs de prélèvement donnent un ordre d'idée des besoins maximum en eau d'irrigation, car une partie de l'eau n'est pas utilisée immédiatement si elle stockée et une autre partie n'est pas utilisée du tout si elle est restituée au réseau hydrographique via les trop-pleins des réservoirs et des bisses.

Prélèvements d'eau brute ($10^6 m^3/an$)	Tunnel Mt-Lachaux	Bisse de Lens	**vers Montana** (1/4 du total)
REY-FAVRE-BONVIN-CORDONNIER 1984 CROOK 1997 REYNARD 2000b	2.13	1.13	**0.815**
ARCALPIN 2008	0.3	2	**0.575**
BONRIPOSI 2013	1	1.19	**0.548**

TABLEAU 6.4 – Estimations des prélèvements en eau brute destinée à l'irrigation dans la commune de Montana.

Prairies : estimation empirique selon les densités d'apports d'irrigation

Une autre manière d'estimer les demandes d'irrigation, cette fois-ci à l'échelle de la parcelle, est de se baser sur une valeur de densité d'apport déjà connue pour la culture et la région concernée et de multiplier cette valeur par la surface de culture irriguée.

Pour estimer les apports d'irrigation aux prairies de Montana, la première méthode appliquée ici est tirée du rapport du bureau d'étude mandaté par la commune de Montana pour l'amélioration du réseau d'irrigation (ARCALPIN 2014). Selon cette étude, la densité d'irrigation effective souhaitée pour les prairies à Montana est de 30 mm (estimation basse) à 40 mm (estimation haute), avec un tour d'eau tous les 15 jours. Les auteurs font l'hypothèse que l'irrigation a une efficience de 60% (c'est-à-dire que 40 % de pertes se produisent durant l'arrosage). Les densités d'apports de l'irrigant se montent alors à 50 mm (estimation basse) et 67 mm (estimation haute). La temporalité des arrosages est estimées en fonction du nombre de tours d'eau par mois : 2 en mai, 2 en juin, 3 en juillet, 3 en août et 2 en semptembre, donc 12 tours d'eau au total. Concernant les surfaces irriguées à Montana, l'étude se base sur l'inventaire communal des parcelles irriguées (état 2014). Elle dénombre 18.1 hectares de prés de fauche et 8.2 hectares de pâturages, ce qui fait un total de 26.3 hectares.

En complément de la méthode du bureau ARCALPIN (2014), pour se donner une idée des volumes d'eau distribués aux prairies, prenons l'hypothèse (optimiste) que 20% de pertes se produisent dans le réseau d'irrigation (c'est-à-dire 80% d'efficience à la distribution). Les résultats de cette méthode sont résumés dans le tableau 6.5.

	Estimation basse	**Estimation haute**
Irrigation effective $[mm/tour]$	30	40
Apports, efficience 60 % $[mm/tour]$	50	67
Surface irriguée $[m^2]$	263'000	263'000
Tours	12	12
Apport total $[m^3]$	157'800	211'452
Distribution, efficience 80 % $[m^3]$	**197'250**	**264'315**

TABLEAU 6.5 – Estimation des apports en eau d'irrigation pour les prairies, selon le rapport d'améliorations structurelles de Montana (ARCALPIN 2014).

Le choix de certains des paramètres choisis par ARCALPIN (2014) peut être mis en question. Premièrement, le nombre de tours d'eau correspond-il à la réalité des pratiques du terrain de Montana ? Les observations faites dans la partie précédentes indiquent que les prairies sont plutôt irriguées deux, voire maximum trois fois par an et non pas 12 fois. Il est intéressant de noter que les estimations hautes présentées par le bureau d'étude seront les arguments utilisés par la commune pour justifier le besoin d'amélorations structurelles et de financement du réseau d'irrigation, les subsides octroyés par la Confédération et le canton étant de 60% des coûts. Ensuite, on peut se demander si les pratiques d'irrigation sur le terrain correspondent à ces paramètres. Les surfaces identifiées comme irriguées par l'inventaire communal correspondent-elles aux surfaces effectivement irriguées ? Les prairies de fauche et les pâturages sont-ils irrigués de la même manière et à la même fréquence ?

Pour répondre à ces questions, le modèle proposé par ARCALPIN (2014) est affiné dans la section suivante en fonction des tours d'eau et des pratiques observées sur le terrain à Montana.

Prairies : estimation empirique, modifiée selon les tours d'eau observés

Pour cette nouvelle méthode, les estimations basses et hautes d'irrigation effective des prairies, l'efficience de 60% et les surfaces irriguées restent celles proposées par ARCALPIN (2014).

Ce qui est modifié est l'évaluation du nombre de tours d'eau, basée maintenant sur les différents types de prairies rencontrés à Montana et leur fréquence d'irrigation. La rotation des pâtures nécessite un tour d'eau par parcelle et les coupes des prairies de fauche intensives deux tours d'eau. Un tour d'eau est également compté pour le re-pâturage des prairies de fauche suite à la désalpe, en considérant une superficie de même ordre de grandeur que la surface des parcelles de pâturage (33'391 m^2).

Les résultats obtenus avec cette méthode corrigée sont repris dans le Tableau 6.6. Au total, l'estimation suggère des distributions de 32'875 m^3 (estimaton basse) et 44'052 m^3 (estimaton haute), soit six fois moins que les estimations faites par ARCALPIN (2014).

	Estimation basse			**Estimation haute**		
	Pâturage	Prairie	Pâturage (désalpe)	Pâturage	Prairie	Pâturage (désalpe)
Irrigation effective [$mm/tour$]	30	30	30	40	40	40
Apports, efficience 60 % [$mm/tour$]	50	50	50	67	67	67
Surface irriguée [m^2]	82'000	181'000	82'000	82'000	181'000	82'000
Tours	1	2	1	1	2	1
Apports [m^3]	4'100	18'100	4'100	5'494	24'254	5'494
Apport total [m^3]			26'300			35'242
Distribution, efficience 80 % [m^3]			**32'875**			**44'052**

TABLEAU 6.6 – Estimation des apports en eau d'irrigation pour les pâturages et prairies, corrigée avec les tours d'eau observés à Montana.

Vignes : estimation empirique, modifiée selon les tours d'eau observés

Pour évaluer la distribution d'eau d'irrigation au vignoble, l'estimation haute d'irrigation effective (40 mm) utilisée par ARCALPIN (2014) est reprise. Cette valeur est cohérente avec les objectifs visés par les vignerons mentionnés lors des entretiens. La méthode est ensuite modifiée d'après les pratiques des vignerons, selon trois scénarios climatiques ayant chacun des tours d'eau et des surfaces irriguées différentes :

- Année très sèche : deux tours d'arrosage (fréquence maximum selon les entretiens), sur l'ensemble des parcelles de vigne irriguées par le réseau de Montana (74,8 hectares).
- Année normale : un tour d'arrosage, sur l'ensemble des parcelles.

- Année humide : un tour d'arrosage, uniquement pour les plantations (hypothèse : 5 % de la surface totale).

Les résultats (Tableau 6.7) indiquent une distribution de 125'290 m^3 pour une année sèche, 62'645 m^3 pour une année normale et 3'131 m^3 pour une année humide.

	Année très sèche	**Année normale**	**Année humide**
Irrigation effective $[mm/tour]$	40	40	40
Apports, efficience 60 % $[mm/tour]$	67	67	67
Surface irriguée $[m^2]$	748'000	748'000	37'400
Tours	2	1	1
Apport $[m^3]$	100'232	50'116	2'505
Distribution, efficience 80 % $[m^3]$	**125'290**	**62'645**	**3'131**

TABLEAU 6.7 – Estimation des apports en eau d'irrigation pour le vignoble, selon les observations des pratiques d'irrigation.

Vignes : estimation empirique, corrigée selon les tours d'eau observés et la pédologie

Corrigeons à présent les estimations précédentes par la répartition spatiale des réserves utiles en eau des sols, en faisant quatre scénarios climatiques :

- Année très sèche : deux tours d'eau, pour tous les sols sauf les colluvions de bas de pente (unités pédologiques 44, 64, 24 et 48).
- Année sèche : deux tours d'eau, pour les calcschistes du Flysch et éboulis calcaires (unités pédologiques 44, 64).
- Année normale : un tour d'eau uniquement pour les calcschistes du Flysch (unité pédologique 44).
- Année humide : un tour d'eau uniquement pour les plantations (5 % de la surface totale).

Le tableau 6.8 reprend les résultats.

6.3.2 Simulations agro-climatiques

Plusieurs méthodes agro-climatiques sont utilisées dans cette partie pour évaluer les demandes d'irrigation du vignoble : le calcul du déficit hydrique et le calcul de besoin en eau des plantes via la méthode CropWat et la méthode WEAP-MABIA.

Calcul du déficit hydrique de la vigne

Le calcul du déficit hydrique (cumul $P - ET_0$) pour les années 2015, 2016 et 2017 (Fig. 6.17) permet une analyse plutôt qualitative en évaluant si l'irrigation est nécessaire en fonction du dépassement des valeurs seuils de stress hydrique données par l'agronome interrogé (entretien du 02/08/2016). Le calcul de l'ET_0 pour le calcul du stress hydrique a été fait

	Année très sèche	**Année sèche**	**Année normale**	**Année humide**
Irrigation effective [$mm/tour$]	40	40	40	40
Apports, efficience 60 % [$mm/tour$]	67	67	67	67
Unités de sol irriguées	(44), (64), (24), (48)	(44), (64)	(44)	Plantations
Surface irriguée [m^2]	692'500	264'500	163'700	37'400
Tours	2	2	1	1
Apport [m^3]	92'795	35'443	10'968	2'505
Distribution, efficience 80 % [m^3]	**115'994**	**44'304**	**13'710**	**3'131**

TABLEAU 6.8 – Estimation des apports en eau d'irrigation pour le vignoble, selon les observations des pratiques d'irrigation et la pédologie du vignoble.

via la méthode de la FAO (ALLEN et al. 1998), qui est une amélioration de l'équation de Penman-Monteith (MONTEITH 1981) et qui permet une estimation de l'évapotranspiration de la végétation à partir de données météorologiques (équation 6.3).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \tag{6.3}$$

Dans laquelle :
ET_0 : évapotranspiration de référence [$mm\ jour^{-1}$],
R_n : radiation nette à la surface des cultures [$MJ\ m^{-1}\ jour^{-1}$],
G : densité de flux de chaleur du sol [$MJ\ m^{-1}\ jour^{-1}$],
T : température moyenne journalière à 2 m de hauteur [°C],
u_2 : vitesse du vent à 2 m de hauteur [$m\ s^{-1}$],
e_s : pression de vapeur à saturation [kPa],
e_a : pression de vapeur effective [kPa],
$e_s - e_a$: déficit de pression de vapeur [kPa],
Δ : pente de la courbe de pression de vapeur [$kPa\ ^\circ C^{-1}$],
γ : constante psychrométrique [$kPa\ ^\circ C^{-1}$].

Les données climatiques journalières sont celles de la station MétéoSuisse de Sion : températures minimales et maximales, vitesse du vent, humidité de l'air, durée d'ensoleillement, températures moyennes et cumul des précipitations. La station de Sion (altitude 482 m) a été choisie car elle est la plus proche de la zone d'étude (environ 13 km) pouvant fournir la totalités des variables nécessaires. De plus, elle présente des conditions climatiques proches de celles du bas du coteau de Montana, sur lequel le vignoble s'étage entre 500 et 800 m.

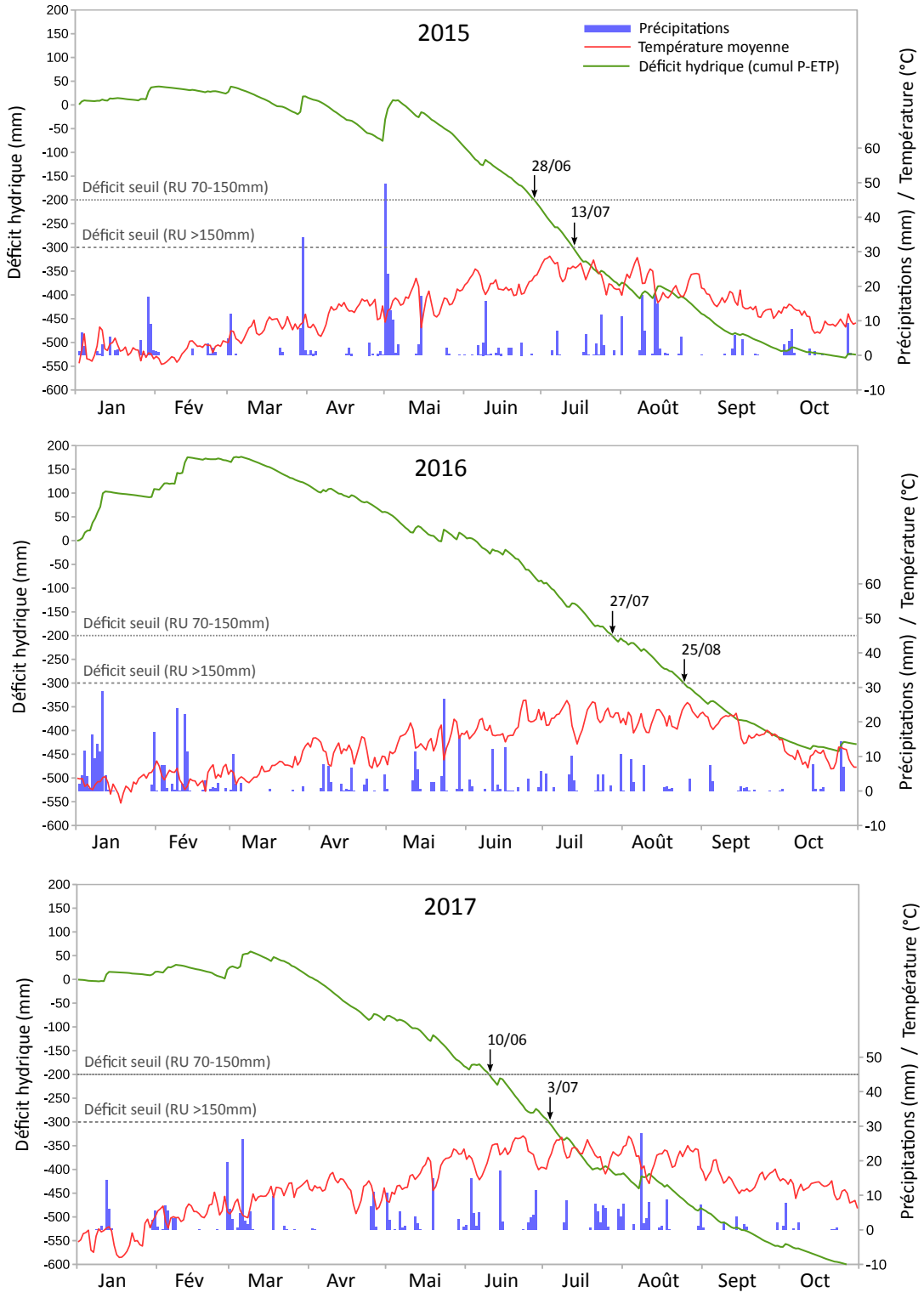


FIGURE 6.17 – Températures moyennes journalières, précipitations et déficit hydrique (avec ET_0 selon Penman-Monteith) sur la période janvier-octobre pour les années 2015, 2016 et 2017. Données : station MétéoSuisse de Sion (altitude 482 m).

L'observation des graphiques d'évolution du déficit hydrique permet d'évaluer si la vigne subit un stress hydrique et à quel moment il se produit. L'irrigation est nécessaire lorsque les valeurs seuil de déficit hydrique sont dépassées (entretien du 02/08/2016) : - 200 mm pour les sols 'secs' (RU 70-150 mm) et -300 mm pour les sols 'humides' (RU >150 mm).

Le moment de la saison où ces seuils sont dépassés a donc son importance : si le dépassement se produit avant ou pendant la phase de développement du raisin (de juin à mi-août), qui est une phase critique pour la qualité de la récolte, l'irrigation est nécessaire. Si le dépassement se produit plus tard, proche du stade de mâturité du raisin (à partir de mi-août), il n'y aura pas d'irrigation.

Durant la saison 2015, le déficit hydriqe progresse rapidement au début de l'été à cause de la canicule et passe de -150 mm à -340 mm entre la mi-juin et la mi-juillet. Les seuils de déficit hydrique sont dépassés le 28 juin pour les sols secs et le 13 juillet pour les sols humides, indiquant que l'irrigation est nécessaire cette année-là pour tous les types de sols.

En 2016, le printemps ayant été frais et pluvieux, les valeurs seuils de déficit hydrique n'ont pas été dépassées avant le 27 juillet (sols secs) et le 25 août (sols humide). On peut donc conclure que l'irrigation n'a pas été nécessaire cette année-là, quel que soit le type de sol.

En 2017, le déficit hydrique a augmenté de manière continue depuis le mois d'avril, qui a été exceptionnellement sec. Les valeurs seuils de déficit sont déjà dépassées le 10 juin pour les sols secs et le 3 juillet pour les sols humides. L'irrigation a donc été nécessaire cette année-là, pour tous les types de sols.

Il est intéressant de remarquer que selon cette méthode, l'année 2017 serait celle nécessitant le plus d'irrigation, car les seuils de déficit hydrique sont atteint plus tôt qu'en 2015 et 2016. Or, c'est durant l'été caniculaire de 2015 que l'irrigation la plus intense a été observée. Cet écart avec les observations peut s'expliquer par le fait que la méthode ne prend pas en compte les brusques variations de température (qui d'après l'agronome interrogé ont souvent plus d'impact sur la vigne que les périodes de chaleur continue), ni la capacité de la vigne à limiter son évapotranspiration en périodes chaudes. Aussi, les cumuls de pluie lors d'épisodes orageux sont pris en compte totalement dans le calcul $P - ET_0$, alors que l'on sait que lors de pluies intenses, une grande partie de l'eau ruisselle et ne va pas recharger efficacement les sols. Dans notre cas, les forts cumuls de précipitations enregistrés au début du mois de mai 2015 auraient probablement contribué à surestimer les pluies efficaces (c'est-à-dire, la part des pluies qui reste dans le sol), sous-estimant donc le déficit hydrique cette année-là.

Calcul du besoin en eau des vignes et des prairies : modélisation CropWat

Le logiciel CropWat (FAO 2018) a été choisi pour effectuer une modélisation agro-climatique et évaluer les besoins en eau d'irrigation du vignoble et des prairies de Montana. CropWat se base sur la méthode dévelopée par la FAO pour le calcul de l'évapotranspiration des cultures, en utilisant des données météorologiques et des coefficients de cultures (ALLEN et al. 1998). Cette méthode a déjà été utilisée pour modéliser les besoins en eau des cultures dans le bassin de l'Ebre, en Espagne (MILANO et al. 2013a), dans le canton de Vaud (MILANO et al. 2015). La principale caractéristique de la méthode CropWat est qu'elle calcule l'évolution de l'ET_0 en tenant compte de facteurs de culture (K_c) qui font évoluer la transpiration des plantes suivant leur stade de croissance (Tableau 6.9). Les valeurs de (K_c) de la vigne et des prairies sont tirées des tables de la FAO (DOORENBOS et PRUITT 1977). Les longueurs des phases de croissance pour la vigne sont identiques à celles utilisées par BONRIPOSI (2013) pour l'estimation des besoins en eau à Crans-Montana-Sierre, c'est-à-dire du début avril à la fin septembre. Pour les prairies, les dates de début et de fin de culture sont déterminées

en fonction des rotations des parcelles observées à Montana (Fig. 6.8), où l'irrigation des dernières prairies est faite à la fin août.

	Date début	Date fin	Racines min [m]	Racines max [m]	Hauteur vigne [m]
Vignes	01.04	27.09	1.00	1.00	1.50
Prairies	01.04	01.09	0.15	0.50	1.00

Longueur des phases de croissance [jours]					
	initiale	dév.	mi.	fin	total
Vignes	20	50	80	30	180
Prairies	20	36	68	30	154

Facteur de culture, K_c			
	initial	milieu	fin
Vignes	0.30	0.70	0.45
Prairies	0.40	1.05	0.85

Coefficient de réponse du rendement, K_y					
	initiale	dév.	mi.	fin	global
Vignes	0.20	0.70	0.85	0.40	0.85
Prairies					

TABLEAU 6.9 – Coefficients de culture utilisés pour la modélisation CropWat.

Pour les même raisons que lors du calcul du déficit hydrique (disponibilité des paramètres et climat comparable), les données climatiques utilisées dans CropWat pour le calcul de l'ET_0 de la vigne selon l'équation de Penman-Monteith (MONTEITH 1981) sont tirées de la station MétéoSuisse de Sion. Par contre, puisque les prairies se situent à des altitudes plus élevées (800-1200 m), un gradient altitudinal de 0.62 °C/100 m a été appliqué aux séries de températures de Sion, en considérant une altitude moyenne de 1000 m. Proposé par MAIRE 1990 pour les Hautes Alpes Calcaires suisses, ce gradient est un peu plus élevé que la moyenne suisse (0.55 °C/100 m, SCHÜEPP 1978) et convient bien à la région de Montana qui jouit de températures moyennes plus élevées en raison de son ensoleillement important (REYNARD 2000b).

Par ailleurs, le modèle CropWat prend aussi en compte les propriétés hydriques des sols, telles que leur infiltrabilité et leur réserve utile (RU). L'infiltrabilité permet au modèle d'évaluer les pluies efficaces, c'est-à-dire la part des pluies qui ne ruissellent pas et qui vont effectivement recharger les sols, tandis que la RU donne une estimation de la quantité d'eau disponible dans les sols pour la plante. Pour la modélisation du vignoble de Corin, les paramètres hydriques de deux sols-types de la zone étudiée ont été recréés : un sol sec, représentatif des calcschistes du Flysch (RU = 83 mm) et un sol humide, représentatif de la moraine de fond (RU = 155 m), des schistes argileux du glissement de terrain (RU = 137 mm) et des éboulis calcaires (RU = 134 mm). Les sols de colluvions calcaires de bas de pente ayant un très grand réservoir hydrique (RU = 254 mm) sont considérés comme non-irrigués d'office. Les paramètres retenus pour ces deux sols-types sont repris dans le Tableau 6.10.

Les prairies de Montana sont, elles, majoritairement situées sur des schistes argileux ; la simulation CropWat est donc faite en prenant la valeur de RU de la catégorie sol humide. Enfin, les conditions initiales choisies pour la modélisation considèrent que les réserves utiles sont remplies à 100% au début des simulations.

La modélisation CropWat produit deux résultats principaux. D'abord une estimation du besoin en eau théorique des cultures selon les standards de la FAO, qui supposent une

RU ('sol sec')	80 mm
Surface (vignoble)	163'700 m^2
RU ('sol humide')	140 mm
Surface (vignoble)	528'800 m^2
Infiltrabilité max	40 mm/jour
Teneur en eau initiale	= RU

TABLEAU 6.10 – Paramétrisation de la modélisation CropWat.

maximisation du rendement des cultures. Ensuite, le modèle reproduit l'irrigation effective requise, c'est-à-dire la quantité d'eau qu'il faudrait ajouter à l'eau déjà utilisable dans le sol et apportée par les pluies pour satisfaire les besoins théoriques de la plante.

Les résultats concernant la vigne (Tableau 6.11) montrent que l'irrigation est nécessaire pour les trois années et pour les deux types de sols, bien qu'avec des quantités moindres pour les sols humides et pour l'année 2016 (année 'fraîche'). Il est intéressant de remarquer que le cumul de pluies entre avril et septembre 2016 (246.3 mm) est inférieur aux deux autres années. Cependant, l'été 2016 ayant été plus frais, avec moins d'évapotranspiration, les pluies efficaces sur les sols secs ont été plus importantes qu'en 2015 et 2016. Cet exemple montre bien que définir une saison 'hydro-viticole' en termes d'année sèche, normale ou humide ne suffit pas. Les cumuls de précipitations doivent être complétés par des valeurs de températures moyennes pour se faire une idée cohérente du contexte climatique.

Paramètres climatiques (enregistrés à Sion)	**2015**		**2016**		**2017**	
Cumul précipitations avril > septembre [mm]	296		246.3		261.3	
Température moyenne juin > août [°C]	21.9		20.4		21.7	
Modélisation CropWat	Sol sec	Sol humide	Sol sec	Sol humide	Sol sec	Sol humide
Besoins en eau de la vigne [mm]	510.2		476.6		512.2	
Pluies efficaces [mm]	206.7	222.2	212.6	222.5	228.2	261.3
Irrigation effective requise [mm]	303.4	287.9	264.1	254.1	284	250.9
Extrapolation vignoble						
Apports, efficience 60 % [mm]	505.7	479.8	440.2	423.5	473.3	418.2
Distribution, efficience 80 % [mm]	632.1	599.8	550.2	529.4	591.7	522.7
Distribution [m^3]	103'472	317'170	90'069	279'934	96'856	276'408
Distribution totale [m^3]	**420'642**		**370'003**		**373'264**	

TABLEAU 6.11 – Modélisation CropWat et extrapolation des volumes pour l'ensemble du vignoble de Corin.

Malgré un été plus frais en 2016, la modélisation donne tout de même une valeur importante de besoin en eau de la vigne (476.6 mm) relativement aux valeurs pour l'année caniculaire de 2015 (510.2 mm) et l'année chaude et sèche de 2017 (512.2 mm). Ceci semble indiquer que la méthode CropWat a tendance à estimer à la hausse les besoins de la vigne. Au final, les résultats requièrent des irrigations effective de 303.4 mm (sol sec) et 287.9 mm

(sol humide) en 2015, 264.1 mm (sol sec) et 254.1 mm (sol humide) en 2016 et 284 mm (sol sec) et 250.9 mm (sol humide) en 2017. Les pluies ont été très effectives en 2017 pour les sols humides, qui se sont bien rechargés. C'est pourquoi les valeurs d'irrigation effective requise sont similaires à 2016, même si elle a été une année plus fraîche.

Il faut noter que ces valeurs de besoin en eau théorique, comme le soulignent BONRIPOSI (2013) et BONVIN (2017), sont une estimation haute de l'irrigation effective de la vigne. D'une part les besoins estimés sont des besoins en eau visant à un rendement maximum, ce qui n'est pas réellement recherché par les viticulteurs, qui visent plutôt à maintenir un état de contrainte hydrique modérée pour obtenir des raisins riches en sucres, nécessaires à une vinification de qualité. D'autre part, si l'on imagine que le besoin en eau de la vigne est correctement estimé pour un certain objectif de production, il est probable que l'ensemble des viticulteurs de la zone, amateurs ou professionnels, ne vont pas estimer de la même manière les besoins de leurs vignes et vont réagir différemment quant à la décision d'irriguer.

Pour en déduire un résultat à l'échelle du vignoble, les volumes totaux d'apport et de distribution ont été extrapolés au surfaces correspondant aux unités de sols secs et humides de Corin, avec les conditions d'efficience utilisés dans les parties précédentes (60 % pour les apports, 80 % pour la distribution). Les distributions totales extrapolées sont de 420'642 m^3 (2015), 370'003 m^3 (2016) et 373'264 m^3 (2017).

Comme dans le cas du vignoble, la modélisation CropWat pour les prairies (Tableau 6.12) pour l'année 2016 indique une irrigation effective requise inférieure par rapport à 2015 et 2017, tout en restant dans des ordres de grandeur assez similaires entre les trois années étudiées : 469.1 mm (2005), 379.2 mm (2016) et 434.6 mm (2017). Ces densités d'irrigation sont plus élevées que pour les vignes, mais les prairies s'étendant sur de plus petites surfaces, les distributions en termes de volumes sur l'ensemble de la commune de Montana sont inférieures : 257'028 m^3 (2015), 207'770 m^3 (2016) et 238'125 m^3 (2017).

Modélisation CropWat	**2015**	**2016**	**2016**
Besoins en eau des prairies [mm]	634.8	571.1	634.3
Pluies efficaces [mm]	165.7	191.9	199.6
Irrigation effective requise [mm]	469.1	379.2	434.6
Extrapolation Montana			
Apports, efficience 60 % [mm]	781.8	632	724.3
Distribution, efficience 80 % [mm]	977.3	790	905.4
Distribution [m^3]	**257'028**	**207'770**	**238'125**

TABLEAU 6.12 – Modélisation CropWat et extrapolation des volumes pour l'ensemble des prairies de Montana.

Calcul du besoin en eau des vignes et des prairies : modélisation WEAP-MABIA

Dans sa thèse, BONRIPOSI (2013) a calculé les irrigation effectives requises pour les prairies et vignes sur l'entièreté de la région de Crans-Montana-Sierre entre 2000 et 2011 à l'aide de la méthode WEAP-MABIA (YATES et al. 2005 ; JABLOUN et SAHLI 2012). WEAP-MABIA est une variante de la méthode FAO utilisée par CropWat utilisant un système de double coefficient K_c, l'un pour les cultures, l'autre pour le sol. A titre de comparaison, les résultats de

BONRIPOSI (2013) sont repris pour trois années-types (Tableau 6.13) : une année avec peu d'irrigation (2005), une année avec des valeurs d'irrigation proches de la norme (2010) et une année avec une irrigation maximale (2003). Les demandes en eau 'non satisfaites' des cultures obtenues par BONRIPOSI (2013) correspondent à l'irrigation effective requise. Les résultats sont ensuite extrapolés pour la commune de Montana, en faisant le rapport entre les surfaces de vignes et de prairires utilisées par BONRIPOSI (2013) sur l'ensemble de la région de Crans-Montana-Sierre et les surfaces à Montana. Il faut noter que BONRIPOSI (2013) considère que les pâturages à Crans-Montana ne sont pas irrigués et ne prend en compte que les prairies de fauche. Pour corriger ce biais lors de l'extrapolation à la commune de Montana, les valeurs d'irrigation effective (en mm) de BONRIPOSI (2013) ont été multipliées par les surfaces de prairies de fauche et de pâturages de Montana.

Paramètres climatiques (enregistrés à Sierre)

	2005 peu d'irrigation	**2010** irrigation normale	**2003** irrigation max.
Cumul précipitations avril > septembre [mm]	358	322	194
Température moyenne juin > août [°C]	19.2	19.5	22.3

Modélisation MABIA (Crans-Montana)

	Vigne	Prairie	Vigne	Prairie	Vigne	Prairie
Irrigation effective requise [mm]	1.4	94.1	24.6	196	356.8	326.6
Apports, efficience 60 % [mm]	2.4	156.8	41	326.7	594.7	544.4
Distribution, efficience 80 % [mm]	3	196	51.3	408.3	743.3	680.5

Extrapolation Montana

Distribution [m^3]	2'246	51'559	38'370	107'389	556'023	178'964
Distribution totale [m^3]	**53'805**		**145'759**		**734'987**	

TABLEAU 6.13 – Modélisation WEAP-MABIA de l'irrigation des prairies et des vignes sur trois années-types pour la région de Crans-Montana-Sierre selon BONRIPOSI (2013) et extrapolation des volumes pour la commune de Montana.

Les résultats de la méthode WEAP-MABIA semblent plus sensibles aux paramètres climatiques que la modélisation CropWat. Pour les trois années modélisées par CropWat, ayant pourtant des conditions climatiques différentes (2015 caniculaire, 2016 frais et 2015 chaud et sec), CropWat donne des valeurs d'irrigation effective de même ordre de grandeur : environ 250 mm pour la vigne et 400 mm pour les prairies. Par contre, bien que les années extraites calculées avec la méthode WEAP-MABIA soient peut-être des cas-types plus marqués (2015 humide et frais, 2010 normale, 2003 canicule exceptionnelle), l'irrigation effective est bien différenciée entre ces trois années : 1.4 mm (2005), 24.6 mm (2010) et 356.8 mm (2003) pour la vigne, ainsi que 94.1 mm (2005), 196 mm (2010) et 326.6 mm (2003) pour les prairies. Il serait intéressant de faire tourner le modèle WEAP-MABIA sur les années 2015-17 pour comparer avec CropWat. Cela dit, en sachant que les années 2016 et 2005 ont des conditions climatiques comparables (étés humides et frais), on peut déjà noter que CropWat a tendance à surestimer l'irrigation par rapport à WEAP-MABIA. Par contre, dans le cas d'années plus sèches et chaudes, les deux méthodes produisent des valeurs comparables.

6.4 Observations *in-situ* de l'irrigation à Montana

Dans le but d'évaluer les estimations d'irrigation faites dans la partie précédente au niveau des apports (méthodes empiriques pour les prairies et les vignes) et au niveau des besoins des plantes (méthode CropWat pour les vignes), les résultats des obervations *in-situ* de l'irrigation à Montana sont maintenant présentés : premièrement, les apports à la parcelle-test de prairie et de jardin, ensuite les distributions vers la zone du vignoble.

6.4.1 Apports d'irrigation : prairie

Les apports d'irrigation à la parcelle test de prairie mesurés par le débitmètre en 2015 et 2016 sont repris dans la Figure 6.18.

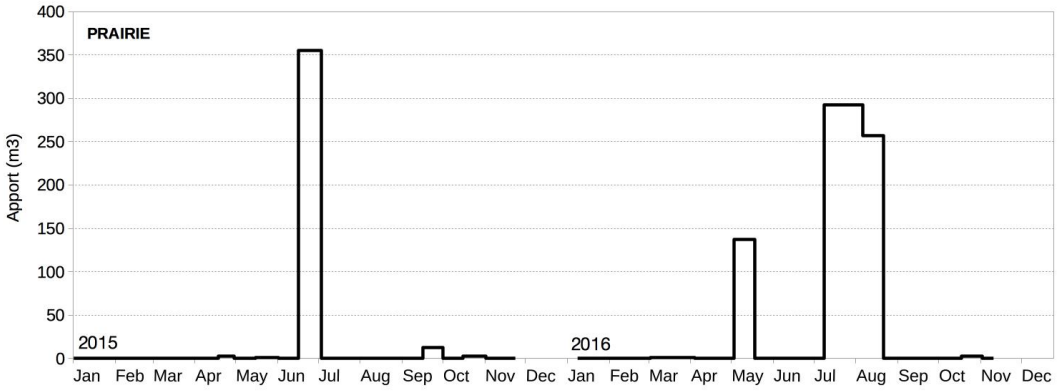


FIGURE 6.18 – Apports d'irrigation mesurés pour la parcelle de prairie.

La parcelle étudiée est une prairie de fauche intensive ; elle est donc *a priori* irriguée deux fois par an pour deux coupes de foin. Elle est éventuellement irriguée une troisième fois après la deuxième coupe pour refaire pâturer les vaches en fin d'été au retour des alpages (voir Fig. 6.8).

En 2015, il n'y a eu qu'une seule irrigation (56 mm apportés), à la fin juin, correspondant à l'arrosage avant la deuxième coupe de la prairie. D'après l'agriculteur, il n'a pas irrigué pour la première coupe de mai car il y a eu des pluies importantes les jours précédents (voir Fig. 6.17). Il n'y a plus eu d'irrigation ensuite (en août), soit parce que l'agriculteur n'a pas mis ses vaches à paître après la désalpe, soit parce que les pluies observées en août ont été suffisantes pour faire repousser l'herbe.

En 2016, il y a par contre eu trois irrigations, correspondant aux périodes qui ont précédé : i) la première coupe de mai, ii) la deuxième coupe de juillet et iii) la remise des vaches en pâturage en août. Il est intéressant de constater que le premier apport d'irrigation n'a été que de 20.4 mm. Compte tenu des pluies tombées dans la deuxième moitié du mois de mai (voir Fig. 6.17), on peut imaginer que l'agriculteur n'a effectué qu'un 'demi' arrosage, au vu des prévisons météorologiques annonçant la pluie.

En prenant comme hypothèse que l'agriculteur vise une irrigation effective de 40 mm, les efficiences des tours ayant des apports supérieurs à cette valeur on été estimées (Tab. 6.14). Pour les autres tours d'arrosage, d'apports inférieurs à 40 mm, il est clair que l'agriculteur ne visait pas la même valeur d'irrigation effective. Il semble doser l'irrigation en fonction des

cumuls de pluie des jours précédents et du contexte météorologique des jours à venir. Cette importante variabilité des volumes d'apports pour chaque tour montre bien que dans le cas des prairies, les arrosages sont faits manuellement et au cas par cas, en fonction de l'appréciation que l'agriculteur se fait des besoins en eau des praires. Dans le cas des estimations empiriques de l'apport d'irrigation aux prairies, il y a donc une incertitude importante de l'irrigation effective visée par l'irrigant à l'intérieur d'une fourchette de 20 à 40 mm.

Finalement, les apports extrapolés sur l'ensemble des parcelles de la commune (prairies de fauche et pâturages) sont de 14'728 m^3 en 2015 et 27'089 m^3 en 2016.

	2015	**2016**		
	juin	**mai**	**juillet**	**août**
Tours	1er	1er	2e	3e
Apports mesurés [mm]	56	20.4	44	38.4
Irrigation effective, si efficience 60 % [mm]	33.6	12.4	26.4	23
Efficience, si 40 mm d'irrigation effective	71 %	-	91 %	-
Apports annuels (mm)	56	103		
Apports annuels (m^3)	375	692		

Extrapolation Montana

Apports annuels (m^3)	**14'728**	**27'089**

TABLEAU 6.14 – Apports d'irrigation à la praire par tour d'arrosage et estimation de l'efficience.

6.4.2 Apports d'irrigation : jardin privé

Les apports d'irrigation au jardin privé mesurés par le débitmètre en 2015 et 2016 sont repris dans la Figure 6.19.

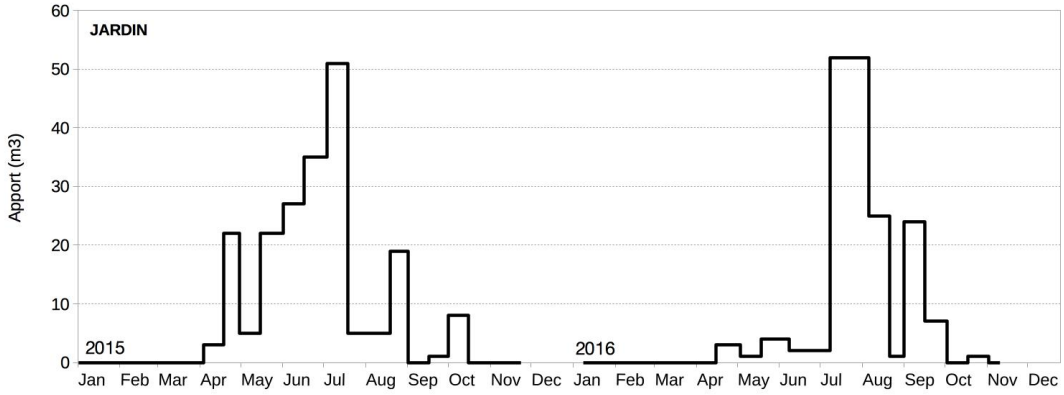


FIGURE 6.19 – Apports d'irrigation mesurés pour le jardin privé.

Lors de l'année caniculaire de 2015, le système d'arrosage automatique du jardin a fonctionné principalement de la mi-avril à la mi-juillet, avec un maximum de 51 m^3 apportés entre le 30 juin et le 20 juillet (2.6 m^3/jour pendant 20 jours). Il n'y a eu ensuite que deux arrosages ponctuels, durant la première moitié de septembre (20 m^3) et la première moitié d'octobre (9 m^3).

Avec le printemps humide de 2016, l'arrosage du jardin a commencé plus tard (début juillet) et s'est terminé à la mi-août, avec un maximum de 52 m^3 apportés entre le 29 juin et le 31 juillet (1.6 m^3/jour pendant 32 jours). Il a ensuite repris en septembre, avec un maximum de 24 m^3 apportés du 1er au 15 septembre (1.6 m^3/jour pendant 15 jours).

Au total (Tableau 6.15), le jardin a donc été irrigué plus longtemps et de manière plus intensive en 2015 qu'en 2016. Le système d'arrosage automatique doit vraisemblablement se régler par une fréquence d'arrosages de durée determinée, car on observe que l'irrigation se fait par paliers d'intensités semblables (1.6 ou 2.6 m^3/jour).

	2015	**2016**
Apports annuels (mm)	615	364
Apports annuels (m^3)	203	120

TABLEAU 6.15 – Apports annuels d'irrigation au jardin privé.

Comme relevé dans le chapitre 5, il est intéressant de remarquer les valeurs annuelles importantes de densité d'usage pour les apports d'irrigation au jardin (615 mm en 2015, 364 mm en 2016) par rapport à la prairie (56 mm en 2015, 103 mm en 2016).

6.4.3 Distribution pour la zone du vignoble

Les volumes mesurés par le débitmètre du vignoble, à l'échelle de la distribution, incluent les différents usages de l'irrigation effectués dans la zone de Corin : arrosage des vignes, des espaces verts publics et des jardins et potagers privés. Pour se faire une idée de la répartition spatiale de ces usages, une estimations des surfaces concernées a été faite sur SIG (Tableau 6.16). Les espaces verts publics et les jardins privés ne représentent que 2,5% de la surface totale irriguée à Corin ; on peut donc s'attendre à ce que ces usages représentent une faible part des volumes d'irrigation distribués.

Vignoble	**748'000** m^2
Espaces verts publics	
Terrain de football	1'600 m^2
Pelouses publiques	915 m^2
Plaine de jeu	320 m^2
Jardins privés	16'704 m^2
Surface totale	**767'539** m^2

TABLEAU 6.16 – Estimation des surfaces arrosées dans la zone de Corin.

Les volumes d'irrigation distribués sont d'abord présentés à pas de temps journaliers pour les trois années de mesures (2015-16-17) dans la Figure 6.20.

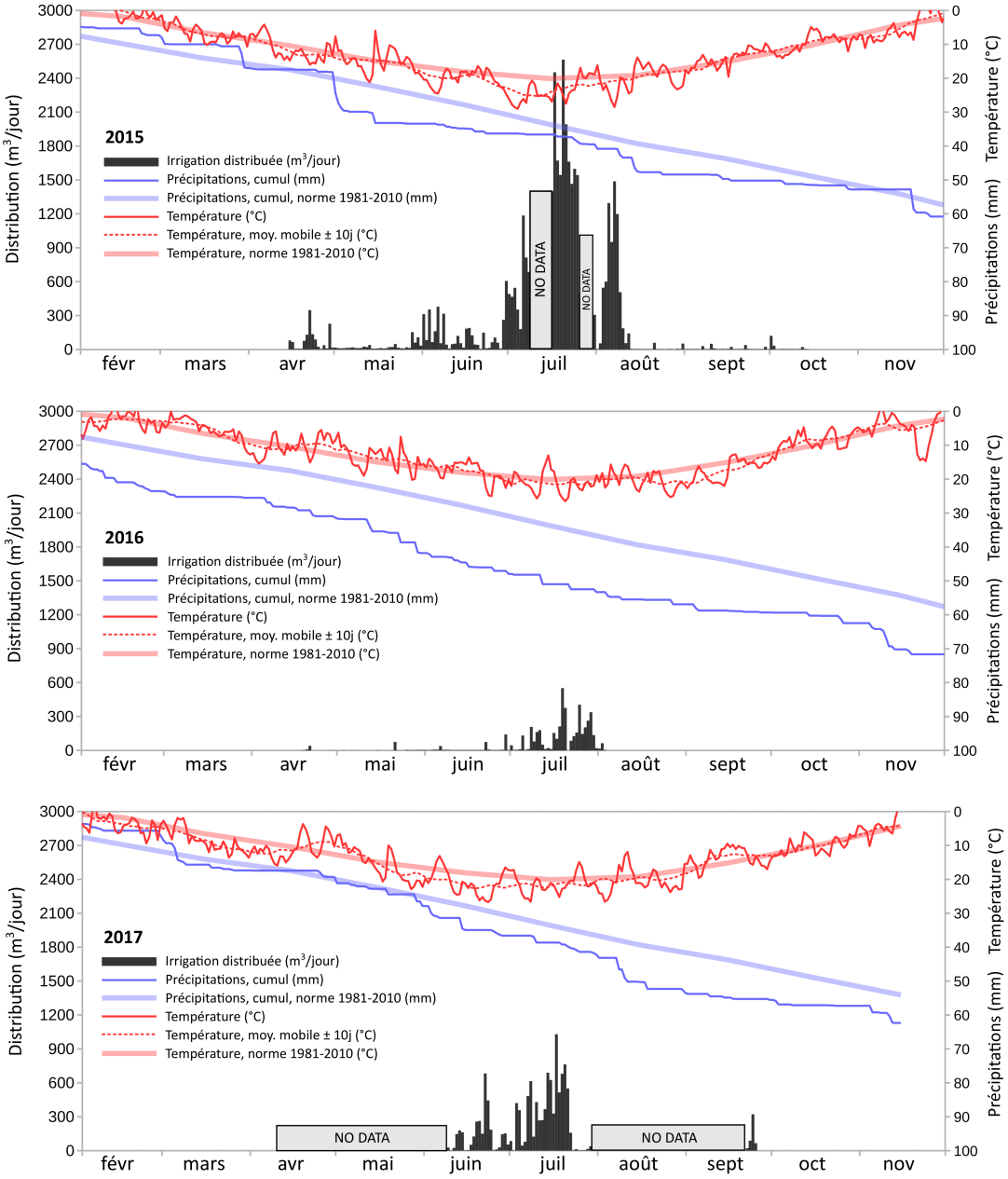


FIGURE 6.20 – Irrigation distribuée vers la zone du vignoble en 2015, données journalières. Source des données de précipitation et température : station météorologique Agroscope de Sierre Géronde. Les précipitations et températures normales (1981-2010) sont issues de la station MétéoSuisse de Sion.

Les mesures montrent un contraste plus important d'irrigation entre les trois années par rapport à la modélisation CropWat.

Durant la saison 2015, les distributions d'eau d'irrigation sont très intenses du 6 juillet au 8 août, avec des valeurs oscillant entre 1200 et 2400 $m^3/jour$. En cause, une période très sèche allant de mi-mai à mi-juillet (en témoigne le signal plat du cumul de précipitations, malgré d'importantes précipitations au début du mois de mai) et un mois de juillet caniculaire (voir l'écart aux normes climatiques de température). Il faut cependant prendre en compte que le débitmètre s'est bloqué deux fois durant la haute saison d'irrigation, à la mi-juillet et fin juillet. Globalement, 2015 peut être considérée comme un cas type d'année 'très sèche', avec des demandes d'irrigation maximales.

La saison 2016 peut par contre être considérée comme une année 'zéro irrigation' pour

les vignes. Le printemps a été arrosé et l'été assez frais, comme en témoignent les écarts par rapport aux normes climatiques. La distribution est quasi nulle d'avril à juin et très faible en juillet où des distributions peu intenses sont observées (entre 200 et 400 $m^3/jour$). Ces distributions n'étaient d'ailleurs probablement pas destinées aux vignes (adultes), mais plutôt aux espaces verts publics et aux plantations.

La saison 2017 a été une saison que l'on peut qualifier d''intermédiaire' du point de vue de l'arrosage des vignes. Les paramètres climatiques se situent également proches de la norme. L'irrigation au mois de juillet se situe dans des valeurs intermédiaires par rapport à 2015 et 2016, avec des distributions oscillant entre 400 et 1000 $m^3/jour$. Ces mesures pour l'année 2017 représentent une valeur minimale de distribution car les données ne sont disponibles que pour les mois de juin et juillet. Par chance cependant, c'est au cours de ces deux mois que l'irrigation est la plus intense. On peut supposer qu'il y a eu une période d'irrigation des plantations en avril, au vu de la sécheresse observée au début du printemps et qu'il n'y a eu que peu d'irrigation début août, au vu des épisodes de pluie de la fin juillet et de la mi-août.

Pour comparer ces mesures directes avec les résultats des méthodes d'estimation, les distributions totales annuelles ont été calculées en posant quelques hypothèses pour évaluer les données manquantes. Les deux périodes sans mesure de juillet 2015 ont été estimées avec l'aide des vignerons, qui on confirmé la continuation de l'irrigation durant les jours sans données. Les données manquantes ont été remplacées par les valeurs moyennes des distributions mesurées les deux jours avant et après chaque intervalle, sauf le dimanche, ou cette valeur est divisée par deux. En 2017, deux périodes sont sans mesure : en avril et mai et de début août à la mi-septembre. En avril et mai, les jeunes vignes ont certainement été arrosées après un mois d'avril très sec, donc les valeurs de distribution ont été supposées égales au cumul de distribution de 2015 durant la même période (2082 m^3). De août à mi-septembre, l'irrigation est supposée avoir continué durant la première moitié d'août (comme ce fut le cas en 2015) selon la même intensité qu'en juillet 2017 (environ 600 $m^3/jour$). On peut également supposer qu'il y a eu moitié moins d'irrigation le 1er août (jour férié) et que l'arrosage s'est arrêté avant les importants cumuls de pluie du 8 août (38 mm). Les valeurs maximales retenues sont donc de 300 m^3 pour le 1er août et de 600 $m^3/jour$ du 2 au 7 août. Pour la suite du mois d'août, les vignes ne sont *a priori* plus irriguées car le raisin arrive à maturité.

Les distributions maximales journalières et les distributions totales obtenues de cette façon pour les trois années mesurées (Tableau 6.17) viennent quantifier le contraste important d'irrigation entre les trois années mesurées, avec des volumes pour l'année caniculaire (2015) dix fois supérieurs à l'année humide (2016) et trois fois supérieurs à l'année intermédiaire (2017). Les densités d'usage sont calculées en divisant les volumes distribués par la totalité des surfaces potentiellement arrosées par le réseau d'irrigation : vignoble, espace verts municipaux et jardins privés (voir Tabeau 6.16).

	2015	**2016**	**2017**
Distribution journalière max. ($m^3/jour$)	2453	552	1030
Distribution totale (m^3)	**50'252**	**4'845**	**17'195**
Distribution totale, densité (mm)	65.5	6.3	22.4

TABLEAU 6.17 – Distributions d'irrigation vers la zone du vignoble mesurées en 2015, 2016 et 2017.

Une analyse plus fine des moments et des intensités d'irrigation peut se faire sur les séries temporelles de distribution à pas de temps horaire (Fig. 6.21, 6.22 et 6.22) en faisant le lien avec les observations de terrain et les entretiens. Les résultats confirment que l'irrigation ne s'effectue pas durant les dimanches et les jours fériés. Les pics de distribution horaire maximale sont chaque année observés en juillet et s'élèvent à : 193 m^3/h (17 juillet 2015 entre 21h et 22h), 51 m^3/h (19 juillet 2016 entre 18h et 19h) et 69 m^3/h (17 juillet 2017 entre 6h et 7h). On remarque très bien l'enclenchement des épisodes d'irrigation et l'augmentation de leur intensité au fur et à mesure que se prolongent des périodes avec plusieurs jours secs et chauds (>20 ˚C). Inversément, les épisodes pluvieux de plus de 15 mm sur un jour ou cumulés sur plusieurs jours consécutifs entraînent un arrêt net de l'irrigation.

Pour se faire une idée exacte de l'eau distribuée uniquement aux parcelles de vigne, il faudrait arriver à extraire la part d'irrigation distribuée aux jardins et aux espaces verts publics. Ceci peut se faire en analysant les horaires d'arrosage. D'après les entretiens auprès des vignerons, nous savons déjà que l'irrigation des vignes se fait habituellement la nuit ou très tôt le matin. Sur les Figures 6.21, 6.22 et 6.22, on remarque que les grands pics d'irrigation durant les étés 2015 et 2017 se produisent pendant la nuit et correspondent donc à l'arrosage des parcelles de vigne. L'irrigation des jardins et des espaces verts publics se produisent par contre plutôt en matinée. Prenons comme exemple la saison 2016, où les arrosages ont pu être observés à Corin durant les campagnes de terrain :

Mercredi 29 juin 2016, le pic d'irrigation mesuré correspondait à l'arrosage de parcelles de jeunes vignes. L'arrosage a eu lieu le matin entre 6h00 et 10h00, avec 131 m^3 distribués pour une surface de 6'900 m^2 (19 mm). Cette valeur de densité de distribution semble cohérente car les jeunes vignes nécessitent moins d'irrigation que les plants adultes.

Lundi 4 juillet 2016, certains jardins de Corin étaient arrosés. Cela se traduit par un pic tout juste visible sur le graphique, avec 5 m^3 distribués. Cette observation permet de se faire une idée de l'ordre de grandeur de l'irrigation des jardins à Corin, quasiment négligeable par rapport à l'irrigation des vignes.

Mardi 5 juillet 2016, les espaces verts municipaux (terrain de foot, parterres de fleur et place de jeux) étaient irrigués le matin entre 8h00 et 10h00 avec 83 m^3 distribués pour une surface totale de 2'835 m^2 (29 mm). Ces épisodes d'irrigation municipale du mardi sont repérables à d'autres dates en 2016 (12 et 19 juillet ; 16, 23 et 30 août) et en 2017 (13 et 20 juin ; 4, 11 et 18 juillet).

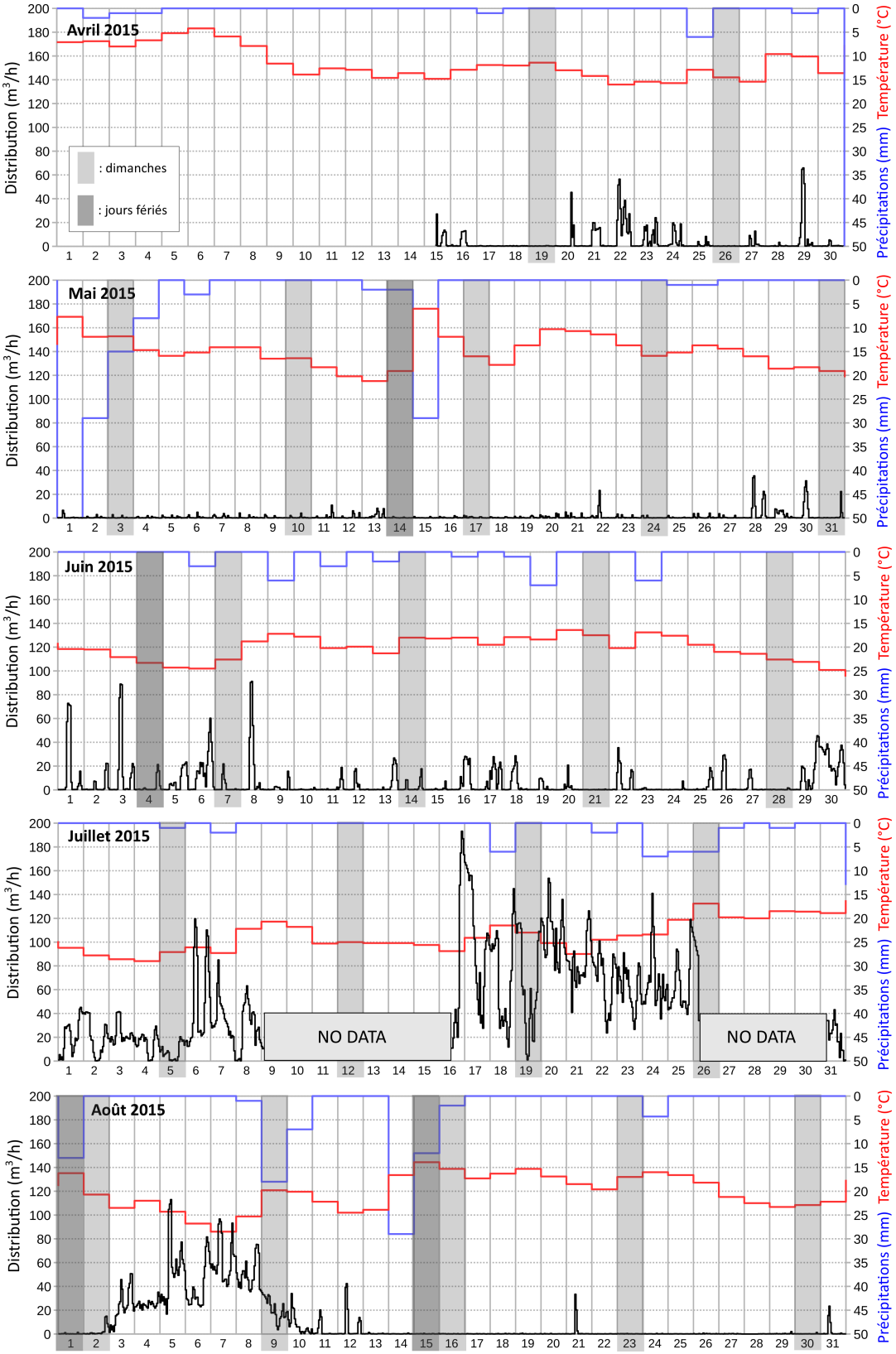


FIGURE 6.21 – Irrigation distribuée vers la zone du vignoble en 2015, données horaires. Source des données de précipitation et température : station météorologique Agroscope de Sierre Géronde.

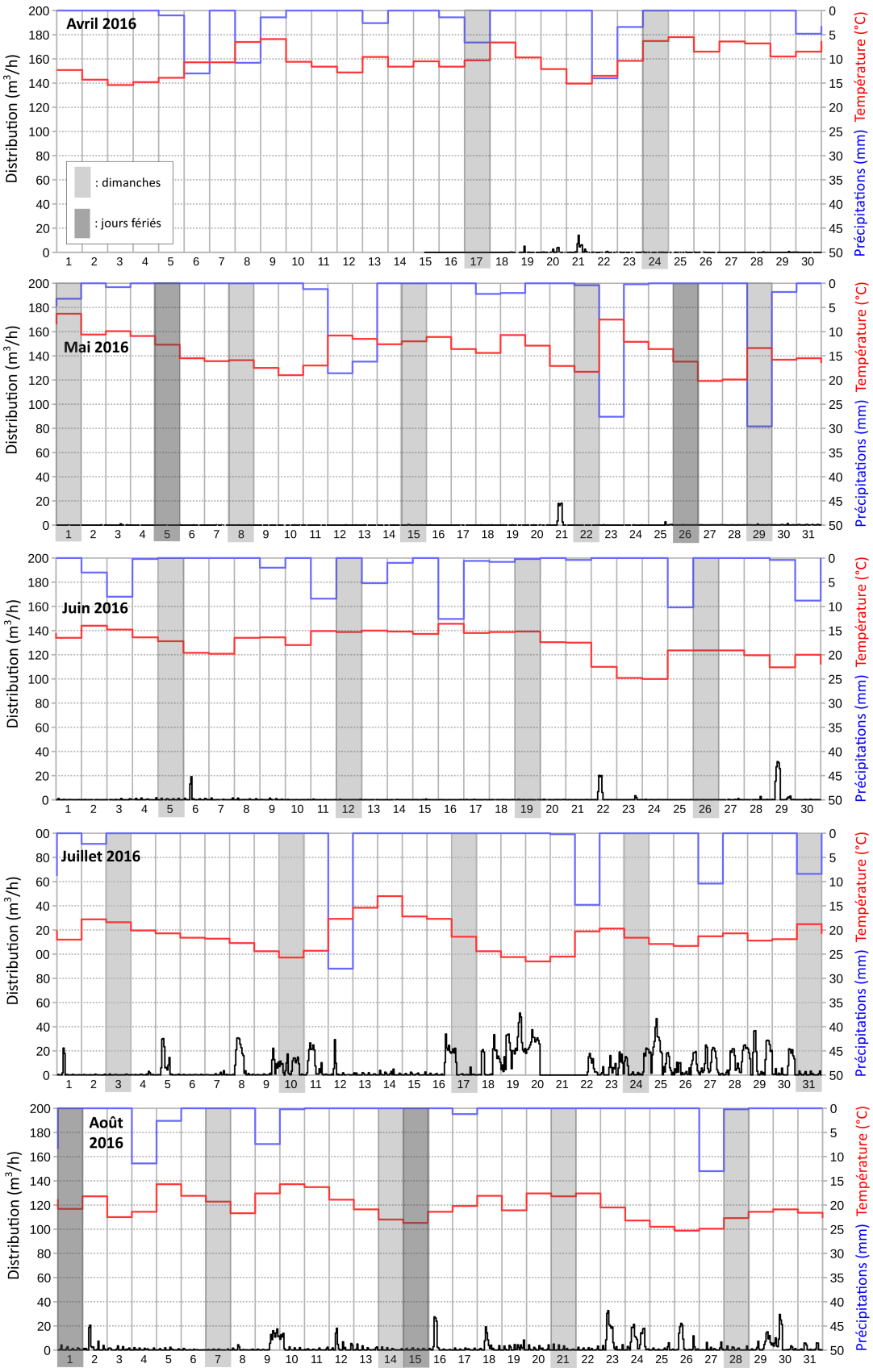


FIGURE 6.22 – Irrigation distribuée vers la zone du vignoble en 2016, données horaires. Source des données de précipitation et température : station météorologique Agroscope de Sierre Géronde.

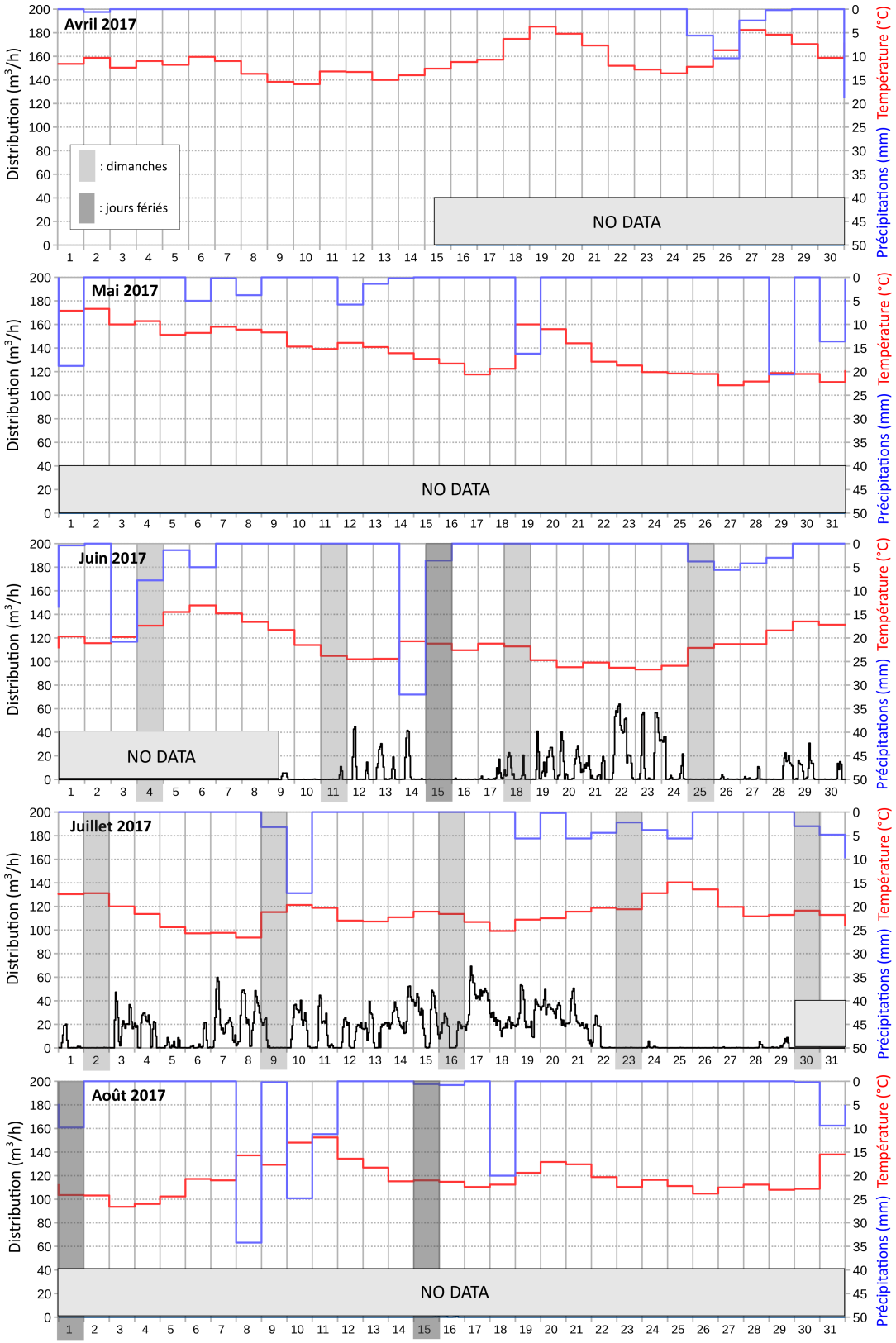


FIGURE 6.23 – Irrigation distribuée vers la zone du vignoble en 2017, données horaires. Source des données de précipitation et température : station météorologique Agroscope de Sierre Géronde.

Au total, les distributions pour ces épisodes d'irrigation des espaces verts publics sont de 475 m^3 en 2016 et 405 m^3 en 2017, tout en sachant que les volumes de 2017 sont certainement sous-estimés car il n'y a pas eu de mesures en août. Prenons les 475 m^3 de l'année 2016 comme seuil minimum de l'irrigation annuelle des espaces vers municipaux et soustrayons-les des valeurs de distribution du Tableau 6.17 pour obtenir une estimation de la distribution destinée uniquement aux vignes (Tableau 6.18). Les densités d'usage sont maintenant calculées en divisant les volumes distribués par la surface d'encépagement uniquement (voir Tabeau 6.16). Les quantités d'eau d'irrigation étant majoritairement destinées à l'arrosage des vignes (99 % en 2015, 90 % en 2016 et 97 % en 2017) et sur une très grande superficie, les résultats en termes de densité d'usage sont quasi identiques que précedemment.

	2015	**2016**	**2017**
Distribution totale (m^3)	**49'777**	**4'370**	**16'720**
Distribution totale, densité (mm)	66.5	5.8	22.4

TABLEAU 6.18 – Distributions totales d'irrigation destinées aux vignes, mesurées en 2015, 2016 et 2017.

6.5 Synthèse : écart entre pratiques réelles et modélisation des usages

En guise de conclusion, cette partie synthétise les facteurs déterminant l'irrigation à Montana et compare les résultats obtenus par les différentes méthodes d'estimation de l'irrigation développées dans ce chapitre.

6.5.1 Facteurs déterminant l'irrigation à Montana

Les facteurs déterminant le régime, l'intensité et la distribution spatiale de l'irrigation à Montana mis en évidence dans ce chapitre ont été regroupés dans un schéma de synthèse (Fig 6.24). Les éléments identifés sont un mélange de facteurs humains (effet mimétisme, génération, contexte culturel et historique), climatiques (températures, précipitations), agronomiques (phases végétatives, cépages, rotation des cultures), pédologiques (RU des sols) et socio-économiques (règles de gestion, rendement visé). Il est difficile à ce stade d'associer un poids chiffré à chacun de ces facteurs. Par contre, de manière qualitative et dans le cas du vignoble de Montana, il est possible d'affirmer que la proportion d'acteurs qui arrosent est le facteur prépondérant pour la quantité d'irrigation globale des vignes. Ce facteur est bien sûr à son tour directement lié aux types de sols et à la proportion de parcelles irriguées suivant les 'caractères' des irrigants). Le facteur humain semble avoir plus de poids que les facteurs climatiques car entre les trois années observées (2015-2016-2017), la distribution totale d'irrigation diffère très peu alors que ces années ont justement été très distinctes en termes de climat.

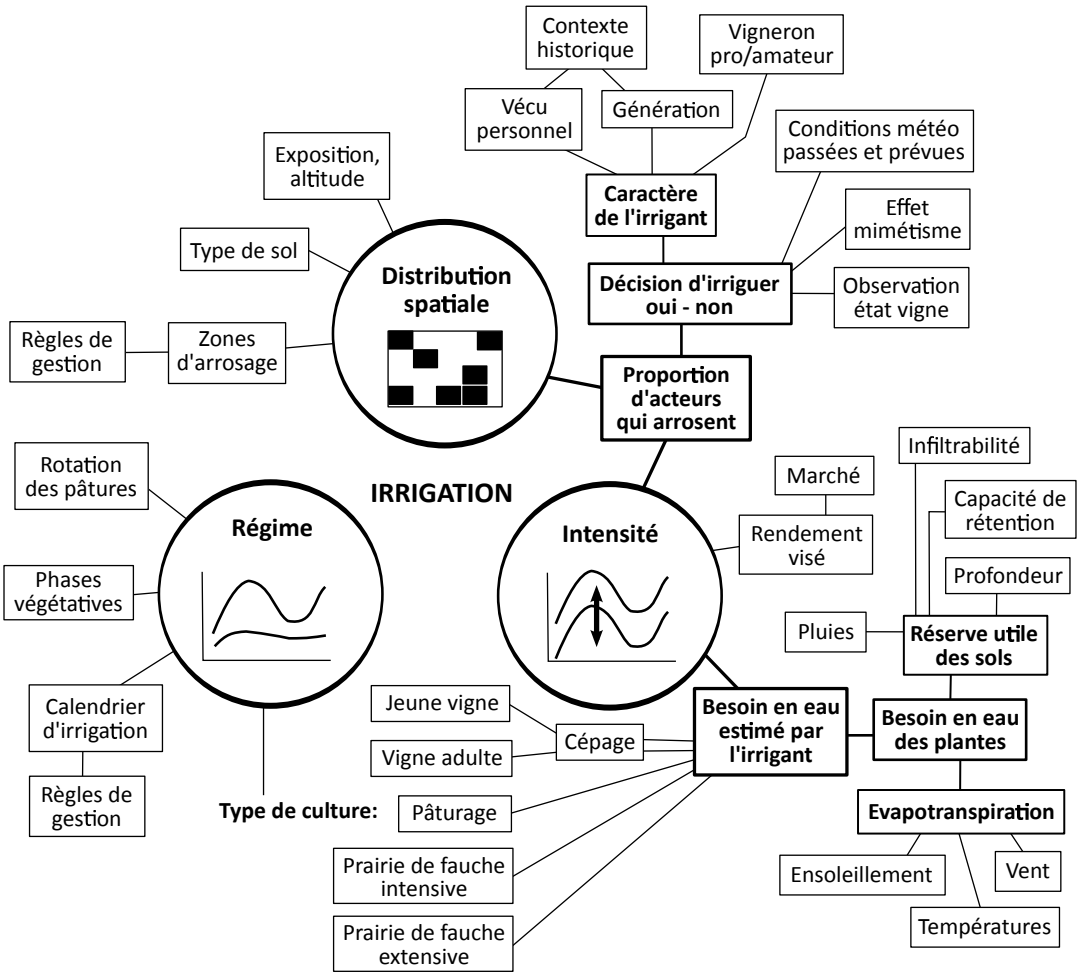


FIGURE 6.24 – Facteurs déterminant le régime, l'intensité et la distribution spatiale de l'irrigation à Montana.

6.5.2 Comparaison des résultats obtenus par les différentes méthodes

Revenons sur les résultats obtenus par chaque méthode d'estimation de l'irrigation pour voir celle qui se rapproche le plus des résultats observés à Montana. Le Tableau 6.19 et la Figure 6.25 reprennent les estimations annuelles d'irrigation des prairies et des vignes de Montana : méthodes empiriques (prélèvement et distribution), simulations agro-climatiques (distribution) et observations *in-situ* (distribution). Les résultats de chaque méthode sont classés de gauche à droite, en allant des années les moins irriguées aux années les plus irriguées. Puisqu'il n'y a pas d'observation *in-situ* de l'irrigation des prairies en 2017, la distribution mesurée en 2016 a été reprise comme estimation haute pour 2017 afin de donner un ordre de grandeur pour l'irrigation totale des vignes et prairies cette année là.

1. Méthodes empiriques

Prélèvements [m^3/an]

REYNARD 2000b	815'000
ARCALPIN 2008	575'000
BONRIPOSI 2013	548'000

Distribution [m^3/an]

Scénarios	Prairies		Vignoble			
	Min	Max	Humide	Normal	Sec	Très sec
ARCALPIN 2008	197'250	264'315				
ARCALPIN 2008 corrigé (tours / pédologie)	32'875	44'052	3'131	13'710	44'304	115'994
Scénarios combinés	Prairies, Min + Vignoble, Humide		Prairies, Max + Vignoble, Sec		Prairies, Max + Vignoble, Très sec	
Total prairies + vignoble	36'006		88'356		160'046	

2. Simulations agro-climatiques

Distribution [m^3/an]

	2016		2017		2015	
	Vignoble	Prairies	Vignoble	Prairies	Vignoble	Prairies
CropWat	370'003	207'770	373'264	238'125	420'642	257'028
Total prairies + vignoble	577'773		611'389		677'670	

	2005 (peu d'irrigation)		2010 (irrigation normale)		2003 (irrigation max)	
	Vignoble	Prairies	Vignoble	Prairies	Vignoble	Prairies
BONRIPOSI 2013 WEAP-MABIA	2'246	51'559	38'370	107'389	556'023	178'964
Total prairies + vignoble	53'805		145'759		734'987	

3. Observations *in-situ*

Distribution [m^3/an]

	2016		2017		2015	
	Vignoble	Prairies	Vignoble	Prairies	Vignoble	Prairies
Débitmètres	4'370	27'089	16'720	$\sim$ 27'089	49'777	14'728
Total prairies + vignoble	31'459		$\sim$ 43'809		64'505	

TABLEAU 6.19 – Récapitulatif des valeurs d'irrigation des prairies et du vignoble estimées et mesurées à Montana. ($\sim$) : valeur extrapolée suite à des données manquantes.

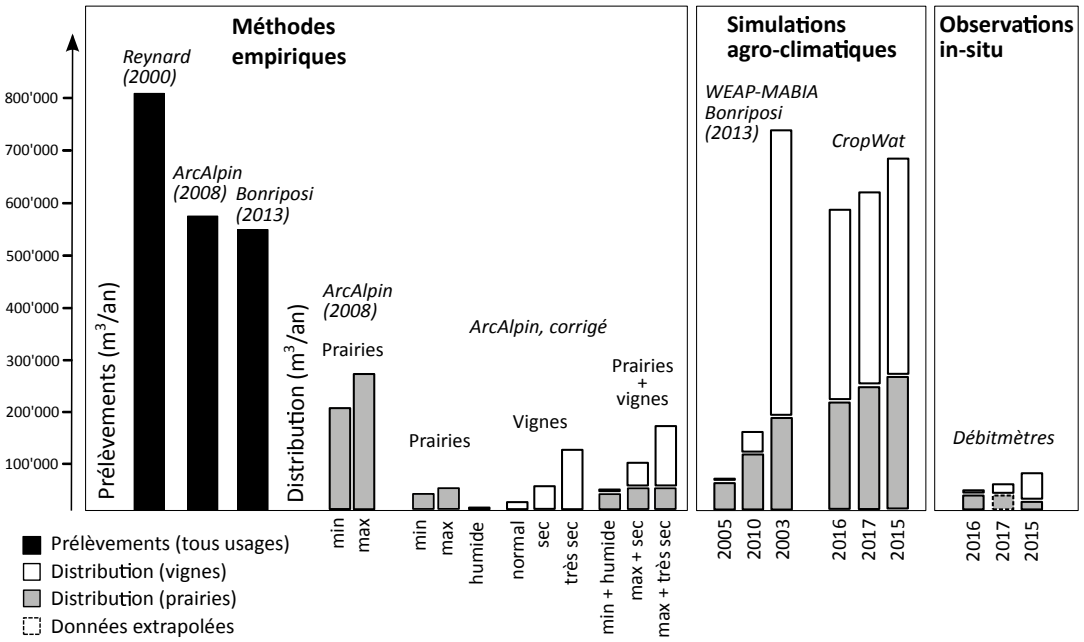


FIGURE 6.25 – Récapitulatif des valeurs d'irrigation des prairies et du vignoble estimées et mesurées à Montana.

Les prélèvements d'eau brute destinés à l'irrigation extrapolés pour la commune de Montana d'après les estimations de REYNARD (2000b), ARCALPIN (2008) et BONRIPOSI (2013) sont compris entre 500'000 et 800'00 m^3/an. Ces valeurs sont dans le même ordre de grandeur que les estimations pour les années très sèches faites par les simulations agro-climatiques pour le total des prairies et vignes : 677'670 m^3 en 2015 (CropWat) et 734'987 m^3 en 2003 (WEAP-MABIA, BONRIPOSI 2013). En prenant pour hypothèse 20 à 30 % de pertes entre le prélèvement et la distribution, ces valeurs semblent cohérentes.

Néanmoins, les simulations agro-climatiques surestiment largement les résultats obtenus avec la méthode empirique corrigée ARCALPIN (2008) pour le scénario le plus sec (168'338 m^3/an). Au final, les prèlèvements estimés et les résultats de la modélisation CropWat sont dix fois supérieurs aux distributions mesurées lors de l'année la plus sèche observée (64'505 m^3 en 2015). **Ces écarts importants illustrent bien la différence qu'il peut y avoir lorsque l'on mesure les usages de l'eau au niveau des prélèvements ou au niveau de la distribution sur le cycle d'usage de l'eau** (voir Fig. 2.1). On peut également mettre en évidence la différence entre le besoin des plantes estimé via un modèle agronomique, avec ses propres critères (rendement, durée de culture) et le besoin des plantes estimé par l'agriculteur qui, à Montana, a manifestement des critères différents. De plus, dans le cas du vignoble valaisan, ce n'est pas un critère uniforme qui est appliqué car les parcelles sont très morcelées et donc soignées par une multitude de vignerons.

En regardant plus en détail l'irrigation de la vigne, les distributions mesurées augmentent graduellement entre 2016 (année 'zéro irrigation'), 2017 (année 'moyenne') et 2015 (année sèche et chaude) et se déroulent principalement entre la fin juin et début août. L'irrigation des prairies, elle, se déroule de manière plus ponctuelle et à des périodes différentes de l'année (entre début mai et la fin août). Elle dépend donc de conditions météorologiques sur une plus large palette de temps. Paradoxalement, les distributions observées pour les prairies sont plus importantes en 2016 (été frais) qu'en 2015 (été chaud et sec). Cela vient du fait que de grosses pluies ont eu lieu au début mai 2015, rendant inutile l'arrosage pour le

premier pâturage de l'année, en juin. Le fait que l'irrigation des prairies se fasse de manière très ponctuelle, au fil des rotations de parcelles, fait qu'un tour d'arrosage peut être annulé suite à un épisode de pluie. Par contre, l'irrigation du vignoble s'étalant sur une plus longue période, il y a moins de chance qu'une seule pluie viennent arrêter l'entièreté de la saison d'irrigation.

En ce qui concerne l'année 2016, considérée comme une année 'zéro irrigation' pour la vigne, les faibles distributions observées pour le vignoble ont été compensées par une irrigation relativement importante des prairies (27'089 m^3), proche de l'estimation minimum faite par la méthode empirique ARCALPIN (2008) corrigée, qui considère l'arrosage de l'ensemble des parcelles de la commune (39'062 m^3). Au total (vignes et prairies), la distribution observée en 2016 est de 31'459 m^3 : environ moitié moins que lors de l'année sèche et chaude de 2015. Cette valeur observée pour une année à faible irrigation de la vigne montre que WEAP-MABIA arrive à différencier les besoins d'irrigation d'une année humide (par exemple en 2005, 2'246 m^3 pour les vignes et 51'559 m^3 pour les prairies) par rapport à une année sèche. Par contre, CropWat ne donne que peu de différence entre les simulations de 2015, 2016 et 2017, qui restent toutes de l'ordre de 200'000 à 250'000 m^3/an pour les prairies et entre 370'000 et 420'000 m^3/an pour les vignes, alors que les valeurs de distribution observées pour le vignoble sont très variables entre ces trois années (4'370 m^3 en 2016, année 'fraîche' et 47'777 m^3 en 2015, année chaude et sèche).

Finalement, bien que très simple, la méthode empirique d'ARCALPIN (2008) corrigée selon les pratiques observées à Montana donne des valeurs de distribution très proches des valeurs mesurées dans les cas les plus 'humides' : 36'006 m^3/an (scénario Prairies Min et Vignoble Humide) par rapport aux 31'459 m^3 observés en 2016. Pour le scénario d'irrigation maximale, la méthode empirique corrigée donne une estimation d'environ 2.5 fois supérieure (160'046 m^3/an) par rapport à l'année avec la plus forte irrigation observée (64'505 m^3 en 2015), mais est largement plus proche de cette dernière en comparaion à l'estimation de CropWat (677'670 m^3). Par rapport aux résultats de BONRIPOSI (2013), l'estimation haute de la méthode empirique corrigée correspond au même ordre de grandeur que les besoins calculés par le modèle WEAP-MABIA pour une année 'normale' (2010), ce qui laisse penser que ce modèle sur-estime également l'irrigation pour les scénarios les plus secs.

Il est logique que l'estimation empirique via les pratiques sur-estime les distributions pour les cas d'années sèches, car elle ne prend pas en compte la possibilité que certains vignerons puisse choisir de ne pas irriguer du tout. Cet écart donne une idée du chemin qu'il reste à parcourir entre modélisation et pratiques effectives d'irrigation sur le terrain.

Chapitre 7

Conclusion générale

Ce dernier chapitre conclut le travail en deux parties. Dans la première partie, les résultats principaux de la thèse sont synthétisés et discutés, au regard des objectifs et enjeux définis dans l'introduction. Dans cette discussion, l'objectif consacré au développement de stratégies de monitoring reçoit une attention particulière. Deplus, une réflexion plus générale est élaborée concernant le choix des stratégies mises en place pour chaque cas de figure rencontré sur le terrain : leurs avantages, leurs inconvénients, leur praticité opérationnelle, leur coût. Dans la deuxième partie, des recommandations sont proposées pour la mise en place de stratégies de monitoring des usages de l'eau potable et de l'irrigation, à l'échelle communale. Ces recommandations sont basées sur l'évaluation des stratégies de monitoring des usages de l'eau mises en place durant cette recherche et sur l'expérience pratique acquise sur le terrain.

Par la suite, les recommandations seront valorisées sous la forme d'une publication dans la revue Aqua and Gaz, à destination des praticiens de la gestion de l'eau.

7.1 Discussion générale des résultats

Cette thèse aborde le sujet de la quantification des usages de l'eau en territoire touristique de montagne, avec une attention particulière portée sur les usages de l'eau potable et l'irrigation. Ces usages ont la particularité d'être fortement saisonniers et peuvent causer des situations de pénurie dans les territoires situés en tête de bassin versant, où les ressources en eau sont limitées en volume, en espace et en temps.

Dans les approches classiques de modélisation intégrée de l'eau, qui développent des bilans ressources-demandes pour évaluer le niveau de stress hydrique d'un territoire, la branche 'usages' se retrouve très souvent le parent pauvre. Cette situation est principalement due au manque de données disponibles et leur faible résolution temporelle ou spatiale au niveau communal. Ce manque de données découle des difficultés intrinsèques de la quantification de la demande dans un contexte multi-acteurs, où les instruments de mesure sont absents ou sous-utilisés par les collectivités car leur but est le suivi du bon fonctionnement des réseaux, non pas l'étude détaillée des pratiques d'usage de l'eau. Or, des données d'usage à des résolutions temporelles suffisantes (journalières) et des informations relatives aux pratiques liées à ces usages sont nécessaires pour identifier et comprendre les pics d'usage sur le temps court (jour, semaine) qui se produisent lors des hautes saisons touristiques et pouvant mener à des situations de pénuries localisées.

Pour répondre à cette problématique du manque de données d'usages de l'eau, dans le contexte des territoires touristiques de montagne, cette thèse s'est construite autour de l'enjeu de la terminologie des usages de l'eau (définir et structurer les termes pour permettre de savoir précisément ce que l'on mesure), de l'enjeu méthodologique de la quantification des usages (stratégies de monitoring, structuration des mesures en espace et en temps, outils d'aide à la modélisation), de l'enjeu de la spécificité des usages en région touristique de montagne (saisonalité et spatialité des usages de l'eau potable et de l'irrigation, observation et caractérisation des pratiques d'usage des irrigants) et enfin de l'enjeu des écarts entre les méthodes d'estimation de l'irrigation et les usages effectifs (évaluation des méthodes par comparaison avec les observations de terrain). Pour aborder ces enjeux, deux terrains d'étude situés en région touristique de montagne ont été choisis pour mettre en place des campagnes de monitoring des usages de l'eau potable de l'irrigation : les communes de Montana (Valais) et Megève (Haute-Savoie). Ensuite, en se basant sur les résultats et l'expérience acquise durant ces travaux, le dernier objectif de cette thèse est de proposer des recommandations pour le monitoring des usages de l'eau en territoire touristique de montagne.

7.1.1 Retour sur l'enjeu de la terminologie des usages de l'eau

Le premier article de cette thèse se penche sur les aspects terminologiques des usages de l'eau. Un état des lieux de l'utilisation des termes "prélèvement", "usage", "besoin", "demande" et "consommation" dans la littérature scientifique a identifié certaines confusions liées à l'emploi de ces termes. La "consommation" en ressort comme le terme le plus ambigu car il peut faire référence tantôt à l'eau utilisée pour effectuer l'usage, tantôt à la part d'eau qui après utilisation n'est pas restituée au système de ressource dans lequel le prélèvement a été effectué. D'un point de vue général, trois types de confusions ont été relevées :

- Une confusion sémantique (lorsque des termes différents sont utilisés comme synonymes),
- Une confusion terminologique (lorsqu'un même terme a diverses significations),
- Une confusion conceptuelle (lorsqu'un terme a la même signification générale, mais n'inclut pas les mêmes catégories d'utilisation, ex : eau urbaine, usage domestique).

Pour lever les ambiguïtés, également relevées par WEISSBRODT (2014), une redéfinition des termes liés à l'usage de l'eau est proposée. Ces termes sont articulés autour concept de *cycle d'usage* de l'eau, qui schématise les transferts d'eau destinés à satisfaire un usage, depuis les prélèvements jusqu'aux restitutions. Les volumes représentés par chaque terme (correspondant à une étape du cycle d'usage) sont distingués, ainsi que les pertes se produisant entre les étapes. De cette manière, il est possible de définir sans ambiguïté les étapes où des volumes d'eau peuvent être mesurés pour évaluer les usages.

Le cycle d'usage différencie les termes "immatériels", hors du cycle technique, *hors du tuyau* (demande, besoin) et les termes "matériels", correspondant à une quantité d'eau mesurable dans les infrastructures ou l'hydrosystème naturel (prélèvement, distribution, apport, consommation, restitution, pertes). La définition retenue de la consommation est la quantité d'eau qui ne retourne pas au milieu dans lequel le prélèvement a été effectué. Un nouveau terme est défini, l'apport, qui désigne le volume d'eau livré au niveau de l'usager, dont la mesure est par exemple faite par les compteurs d'eau domestiques dans le cas de l'eau potable. Le besoin en eau est considéré comme une notion immatérielle mais abstraite, car il ne peut être quantifié, alors que la demande en eau est considérée comme une notion immatérielle mais concrète, car elle est une requête d'eau concrètement formulée par l'usager,

mais pas nécessairement satisfaite par un volume d'eau matériel (exemple du robinet ouvert qui ne coule pas). L'apport est donc la notion centrale de ce travail car c'est le volume d'eau mesuré à l'échelle de l'usager. Il constitue donc l'estimation la plus proche de l'utilisation finale faite de l'eau.

Par ailleurs, des schémas de cycle ont été développés pour certains usages spécifiques : les usages de l'eau potable, l'irrigation et les usages environnementaux.

Concernant l'eau potable, le cycle d'usage distingue les différentes catégories d'usages de l'eau potable. Il faut noter que l'eau potable n'est en fait pas un usage en soi mais une caractéristique de l'eau (on décrit sa qualité, son aptitude à la boisson). L'Approvisionnement en Eau Potable (AEP) n'est pas un usage en soi non plus, mais une manière de satisfaire les demandes en eau potable au moyen d'infrastructures (les réseaux), de pratiques (par exemple, les contrôles de qualité de l'eau) et de modes organisationnels (tarification, affermage, etc.). Les usages de l'eau potable sont par exemple les usages domestiques (effectués par les ménages), les usages des industries, des commerces, du petit artisanat, des hôtels, les usages de loisir ou les usages municipaux.

Concernant l'irrigation, la principale caractéristique du cycle proposé est qu'il distingue deux agents "usagers" : l'irrigant et les plantes, avec leurs besoins et demandes propres. La demande en eau de l'irrigant est la quantité d'eau que ce dernier requiert et considère nécessaire pour combler le manque d'eau des pluies et du sols disponibles, par rapport au besoin de la plante qu'il estime. Le cycle d'irrigation distingue aussi l'apport d'irrigation (l'eau appliquée par l'irrigant sur les champs) et l'irrigation effective (la part de l'apport d'irrigation réellement utilisée *in fine* par la plante).

Concernant les usages environnementaux, le cycle met en évidence que les différents débits résiduels minimaux, associés aux besoins des milieux, sont à interpréter comme une demande de l'homme, qui estime les besoins des écosystèmes en tant que représentant du milieu.

A la lumière des résultats empiriques obtenus lors des campagnes de monitoring des usages dans les communes de Montana et Megève, il ressort clairement que la cause première d'erreur dans l'estimation des usages est le choix de l'étape à laquelle les mesures sont effectuées : les prélèvements, la distribution ou l'apport. En raison des taux de pertes, les volumes mesurés peuvent différer jusqu'à un facteur 10 entre ces trois étapes du cycle d'usage. C'est le cas des prélèvements estimés sur le Bisse de Lens à Montana (REYNARD 2000b ; BONRIPOSI 2013), qui surestiment jusqu'à un facteur 12 l'eau finalement distribuée. Même pour l'année la plus sèche mesurée (2015), où l'on pourrait s'attendre à des usages plus intenses, les prélèvements estimés restent jusqu'à dix fois supérieurs à la distribution observée. En France également, les valeurs de prélèvement provenant des données de redevances agricoles sont fréquement employées pour estimer les apports d'irrigation (ERHARD-CASSEGRAIN et MARGAT 1983).

En sachant que de telles différences peuvent exister en termes de volumes, quelle serait alors l'étape du cycle d'usage à utiliser pour la quantification de la demande et pour quel but ? Dans une optique de gestion intégrée de l'eau, l'étape importante à mesurer ou estimer est le prélèvement, pour permettre de calculer des bilans hydriques au niveau de l'interface entre système de ressources et système d'usages. En effet, ces bilans effectuent la balance entre ressources exploitables et prélèvements effectués. Les prélèvements sont dans ce cas

les valeurs à utiliser pour évaluer la pression des utilisations anthropiques de l'eau sur les milieux.

Il serait possible de s'en tenir à la mesure des prélèvements, mais si l'on veut comprendre ce qui se cache derrière les dynamiques de ces derniers, il est nécessaire de mesurer les apports, à l'échelle des usagers, pour identifier les facteurs expliquant la saisonalité des usages.

La mesure de la distribution est également très importante, d'une part du point de vue opérationnel pour la gestion des réseaux (sortie des réservoirs principaux), d'autre part pour permettre de calculer les taux de pertes lors de l'adduction et de la distribution. Le choix de l'étape du cycle d'usage à quantifier est aussi très souvent dicté par le contexte et les aspects pragmatiques du terrain : infrastructures de mesure déjà en place, données disponibles, coûts, temps de travail à disposition. Par exemple, lors de la campagne de monitoring à Montana, aucun système de mesure n'était installé sur le réseau d'irrigation. Le compromis du "plus petit dénominateur commun" a donc été de positionner une mesure au niveau de la distribution, fournissant au minimum une série temporelle de résolution suffisante (horaire). Les estimations des volumes d'eau aux autres étapes du cycle d'usage (apports, prélèvements) ont ensuite toutes été transformées en "équivalent distribué", en soustrayant ou ajoutant un pourcentage de pertes hypothétiques entre ces étapes. Les valeurs ainsi standardisées dans une même étape du cycle d'usage ont pu être comparées entre elles. L'important n'est donc pas tant de choisir la *bonne* ou la *mauvaise* étape du cycle à mesurer, du moment que l'on reste cohérent et que l'on prête attention à comparer des volumes correspondant à des étapes identiques.

Pour résumer, il faut retenir que la distribution est l'étape à privilégier pour la gestion des réseaux et le calcul des pertes (FREIBURGHAUS 2012 ; BLANC et SCHÄDLER 2013 ; BRANCHEREAU 2015), lorsque les communes disposent des volumes totaux apportés et facturés. Par contre, le prélèvement est la donnée à privilégier pour la mise en place de bilans intégrés ressources-usages, tels qu'effectués par ALCAMO et al. (2003), WADA et al. (2011), SAULNIER et al. (2011), REYNARD et al. (2014), GROUILLET et al. (2015), et MILANO et al. (2015). Enfin, mesurer à l'étape des apports permet d'améliorer la résolution des données en décrivant les dynamiques d'usage à l'échelle de l'usager. Cela permet par la même occasion de catégoriser les usagers et de fournir des facteurs d'explication de la variabilité du régime de distribution et de prélèvement. Les mesures à l'échelle de l'usager sont très rarement faites dans la littérature de la gestion intégrée de l'eau, c'est pourquoi elles constituent un des objectifs principaux de cette thèse.

7.1.2 Retour sur l'enjeu des méthodes de quantification : les stratégies de monitoring

La problématique du manque de données d'usage de l'eau potable et d'irrigation à haute résolution temporelle et spatiale dans les territoires de montagne a été l'occasion de développer des stratégies de monitoring adaptées aux contextes des communes de Megève et Montana. Cette section passe d'abord en revue les contextes spécifiques à chaque terrain et à chaque usage étudié (eau potable et irrigation) et décrit les stratégies de monitoring implémentées pour chacune des situations. Ensuite, les avantages et inconvénients des ces stratégies sont décrites.

Contextes des terrains étudiés et stratégies de monitoring mises en place

Le Tableau 7.1 reprend les éléments de contexte des cas de Montana et Megève : les usages étudiés, le soutien des gestionnaires (collaboration en heures de travail, mise à disposition des données, intérêt pour le monitoring) et les systèmes de mesure déjà en place au niveau de la distribution et des apports.

Soutien des gestionnaires à Montana et Megève

D'une manière générale, la collaboration avec les services techniques des eaux de Montana et de Megève s'est très bien déroulée : les gestionnaires étaient prêts à partager leurs données et les techniciens motivés à répondre aux questions et à faire visiter les infrastructures communales. L'intérêt des gestionnaires pour mes campagnes de monitoring était cependant un peu moins marqué à Montana, en comparaison de Megève où le staff de la régie des eaux était plus curieux et enthousiaste. J'ai eu également la chance de pouvoir être accompagné par un technicien lors de chacune de mes visites à Megève.

Infrastructures de mesures en place à Montana (eau potable, irrigation) et Megève (eau potable)

La commune de Montana dispose de deux réseaux de distribution distincts, l'un pour l'eau potable, l'autre pour l'irrigation, tandis que Megève ne dispose que d'un réseau de distribution d'eau potable. A Montana, les mesures sur le réseau d'eau potable sont effectuées au niveau de la distribution, en sortie du réservoir d'eau potable (à pas de temps journalier) et au niveau des apports, via les compteurs d'eau domestiques (un compteur par bâtiment, relevé à pas de temps annuel lors des facturations). Ces compteurs sont tous équipés d'antennes radio permettant une relève à distance, depuis la voie publique. La relève est automatique, c'est-à-dire que les compteurs sont relevés par l'antenne d'acquisition dès qu'ils sont à portée de signal, même en mouvement depuis un véhicule. Par contre, aucune mesure n'est effectuée sur le réseau d'irrigation de Montana. A Megève, les mesures sur le réseau d'eau potable sont presque identiques : au niveau de la distribution (à pas de temps journalier) et au niveau des apports, via les compteurs d'eau domestique (un compteur par bâtiment, relèves annuelles). Par contre, seuls 10% des compteurs sont équipés d'antennes radio (le reste étant relevé manuellement). Le mode d'acquisition des données radio est manuel, c'est-à-dire qu'il faut s'arrêter au niveau de chaque compteur pour l'interroger individuellement et collecter son index.

Stratégies implémentées

Les stratégies de monitoring retenues peuvent être qualifiées d'*adaptatives*, car elles ont été construites en fonction du contexte de chaque terrain (caractéristiques du réseau, marques et modèles de compteurs et vannes, disponibilité et intérêt des gestionnaires et usagers) et *opportunistes*, car elles mettent à profit les systèmes de mesures déjà en place. Par ailleurs, ces stratégies de monitoring dépendent également du contexte d'un travail de thèse, où le doctorant dispose de relativement peu de moyens matériels en comparaison d'une collectivité (environ 10'000.-), mais peut mettre en oeuvre des moyens humains importants : le temps de travail sur le terrain. C'est-à-dire 24 à 38 jours par an pour les campagnes de mesures.

Au total sept stratégies ont été mises sur pied. A Montana, les usages de l'eau potable ont été mesurés au niveau des apports avec des compteurs d'eau radio (i), des compteurs d'eau online (ii) et à l'aide d'une relève déléguée à une personne volontaire (iii). L'irrigation a elle été mesurée au niveau de la distribution avec une sonde débimètre (iv) et au niveau des

	Montana				**Megève**	
	Eau potable		Irrigation		Eau potable	
Gestionnaires enclins à partager leurs données ?	Oui		Oui		Oui	
Temps mis à disposition par les techniciens	Peu de temps		Peu de temps		Beaucoup de temps	
Collaboration des techniciens	Bonne		Bonne		Excellente	
Intérêt gestionnaire pour monitoring	Peu d'intérêt		Assez intéressé		Très intéressé	
Mesures en place (distribution)	Valeurs journalières (débitmètre en sortie du réservoir principal)		Pas de mesure		Valeurs journalières (débitmètre en sortie du réservoir principal)	
Mesures en place (apports)	- 1 compteur par bâtiment - Marque : GWF - Emetteurs radio : sur l'ensemble des compteurs (antenne déjà intégrée) - Acquisition radio : automatique - Relève annuelle (pour facturation)		Pas de mesure		- 1 compteur par bâtiment - Marque : Itron - Emetteurs radio : sur 10 % des compteurs (ajout possible : tête de lecture radio ou filaire) - Acquisition radio : manuelle - Relève annuelle (pour facturation)	
Stratégie de monitoring	**Compteur radio**	**Compteur online**	**Relève déléguée**	**Sonde débitmètre**	**Compteur radio**	**Compteur + datalogger**	**Compteur radio**
	Utilisation antenne acquisition radio communale	Module GSM sur compteur existant (données online)	Sur base volontaire	Datalogger et sonde E-FlowMeter, insérée sur vanne existante	Nouveau compteur et antenne radio	Tête de lecture filaire sur compteur existant, reliée à un datalogger	Utilisation antenne acquisition radio communale
Etape cycle usage :	*Apport*	*Apport*	*Apport*	*Distribution* (vignoble)	*Apport* (pré, jardin)	*Apport*	*Apport*
Fabricant :	GWF	GWF		Cla-Val	GWF	Itron (tête), Hobo (log.)	Itron
Coût (pour cette thèse)	40.-/relève (véhicule)	920.- (module GSM)	0.-	5719.- (le tout)	600.- (compteur 2'') 100.- (antenne)	80.- (tête de lecture) 480.- (log. extérieur) 120.- (log. intérieur)	40.-/relève (véhicule)
Coût : (si installation de zéro)	**450.-** (compteur 1.25'' + antenne)	**1270.-** (compteur 1.25'' + module)	0.-	**5719.-** (sonde + logger + module GSM)	**700.-** (compteur 2'' + antenne)	**280.-** (int) / **640.-** (ext) (compteur 1.25'' + tête + logger)	**160.-** (compteur 1.25'' + antenne)
Relève :	Manuelle, 1x/mois	Auto (online)	1x/mois	Auto (online)	Manuelle, 1x/mois	Manuelle, 3x/an	Manuelle, 1x/mois
Echantillon :	n=587 (sur 707 existants)	n=3	n=1	Tout usage d'irrigation en aval de Diogne	n=2	n=8	n=108 (sur 3980 existants)
Temps par relève :	6h/relève (0.6min/compteur)	0h		0h	3min/relève (1.5min/compteur)	2-3h/relève (+-20min/logger)	4h/relève (2.2min/compteur)
Résolution :	bi-hebdomadaire	horaire	mensuelle	horaire	bi-hebdomadaire	horaire	mensuelle

TABLEAU 7.1 – Stratégies de monitoring choisies en fonction du contexte de chaque terrain.

apports avec des compteurs radio (v). A Megève, les usages de l'eau potable ont été mesurés au niveau des apports avec des dataloggers installés sur un échantillon de compteurs d'eau (vi) et via un échantillon de compteurs d'eau radio (vii).

Chacune de ces stratégies est décrite dans le Tableau 7.1 en fonction des critères suivants :

- configuration technique (compteurs et systèmes de transmission des données),
- étape du cycle mesurée,
- taille de l'échantillon,
- coûts (dans le cadre de cette thèse, c'est-à-dire ce qu'il a fallu ajouter par rapport aux infrastructures en place),
- coûts (si installation de zéro)
- fréquence de relève et mode d'acquisition (manuel, automatique),
- temps de relève nécessaire par compteur,
- résolution des données.

Avantages et inconvénients des stratégies de monitoring retenues

(i) Apports d'eau potable à Montana : relève des compteurs radio existants (échantillon quasi exhaustif)

Avantages :

- Echantillon quasi exhaustif des compteurs radio domestiques (587 sur 707).
- Rapidité des relèves : avec l'antenne radio en acquisition automatique, tous les compteurs de la commune sont relevés en environ 6h, sans devoir faire d'arrêt avec le véhicule.
- Pas nécessaire de rentrer dans les bâtiments, la relève se fait depuis la voie publique.
- Pas de coût d'installation dans le cadre de ma thèse (les antennes sont déja en place sur tous les compteurs et l'antenne d'acquisition est prêtée par la commune : je fais les relèves moi-même).
- Les compteurs transmettent deux valeurs : l'index du jour de relève et l'index du dernier jour du mois précédent. Des relèves mensuelles en milieu de mois ont donc permis d'obtenir des données bi-hebdomadaires.
- Les caractéristiques du bâti et des logements sont disponibles (données OFS) et chaque compteur a pu être associé à son bâtiment sur SIG.

Inconvénients :

- Nécessite du temps de travail pour faire la relève (une journée chaque mois).
- Le système d'acquisition radio automatique mobile fait que certains compteurs sont parfois non relevés, donc l'échantillon de compteurs avec des séries de données complètes est plus petit que la population totale de compteurs domestiques équipés d'antennes radio (587 sur 707 au total). Cette situation vient du compromis fait entre rapidité de relève et exhaustivité. En effet, pour être sûr de ne manquer aucun compteurs lors des tournées mensuelles, il faudrait s'arrêter devant chaque bâtiment pour vérifier si l'index est bien relevé. Cette méthode ne permettrait pas de faire la relève en une

seule journée, sachant que les techniciens communaux mettent 5 jours pour effectuer la relève radio de l'ensemble des compteurs (avec vérification manuelle) au moment de la facturation.

- La question de la confidentialité des données récoltées et de leur diffusion est un enjeu important. J'ai par exemple effectué une cartographie des apports par bâtiment sur SIG, mais je n'ai pas pu la valoriser pour cette recherche car il est possible d'identifier chaque bâtiment et donc son propriétaire. C'est la raison pour laquelle les résultats d'apports par compteur ont été agrégés par bassin d'usage.

Cette stratégie de monitoring est donc un bon compromis entre une quasi exhaustivité de l'échantillon, une résolution temporelle satisfaisante (bi-hebdomadaire), des coûts réduits et une praticité opérationnelle. Elle a été utilisée dans le deuxième article de cette thèse (CALIANNO et al. 2018) pour décrire les régimes d'usage de l'eau potable à Montana.

(ii) Apports d'eau potable à Montana : installation de modules GSM sur des compteurs existants (petit échantillon)

Avantages :

- Pas besoin de se déplacer pour la relève (données mises en ligne via le module GSM).
- Résolution temporelle (horaire).

Inconvénients :

- Coût élevé : 1270.- par compteur (1.25"), avec module GSM.
- Très petite taille d'échantillon (pour cette thèse) : 2 maisons, 1 hôtel.

Les données récoltées par cette stratégie n'ont finalement pas été utilisées dans ce travail, même si les données d'apport de l'hôtel, couplées aux nombre de nuitées (obtenues via les taxes de séjour) mériteraient d'être valorisées.

(iii) Apports d'eau potable à Montana : relèves manuelles déléguées (concierge résidence)

Le principe ici est de chercher des personnes volontaires pour relever elles-même les index de leur compteur domestique. Dans le cas de cette thèse, le contexte m'avait amené à cette solution car je cherchais à faire le suivi des apports d'eau potable pour une résidence de logements à Montana qui n'est pas équipée de compteur avec antenne radio. J'ai donc contacté le concierge de l'immeuble pour lui demander de faire des relèves manuelles à intervalles de temps réguliers.

Avantages :

- Pas de coût, pas de travaux d'installation.
- Le contact avec la personne faisant les relèves (entretiens, recontres), qui est concierge et lui-même usager de l'eau potable de l'imeuble, permet de récolter des informations sur les pratiques d'usage : typologie des logements et des résidents, arrosage des pelouses.
- La résolution temporelle manuelle (mensuelle) n'a pas à rougir face aux relèves radio.

Inconvénients :

- La qualité des séries de données est dépendante de la motivation et de la rigueur de la personne volontaire. Il est difficile d'obtenir une profondeur temporelle suffisante des séries de données car il est rare que les personnes volontaires continuent à relever leur compteur après 6 mois/1 an si on ne les motive pas.

- Nécessite énormément de travail par compteur si l'on souhaite construire un échantillon important : recherche de volontaires, prise de contact, entretiens.

Les données de cette stratégie n'ont finalement pas pu être valorisées dans la thèse, mais les informations obtenues lors des entretiens ont été utilisées pour l'étude des pratiques d'irrigation.

(iv) Distribution d'irrigation à Montana : installation d'un sonde débtimètre sur une vanne existante

Aucun système de mesure n'étant installé sur le réseau d'irrigation de Montana, les stratégies de monitoring étaient à inventer de zéro. La mesure prioritaire à installer s'est faite au niveau de la distribution, pour produire une vision d'ensemble des dynamiques d'irrigation. La distribution vers la zone de Corin a été choisie car elle se situe tout en aval du réseau d'irrigation. Cette position permet d'isoler les usages d'irrigation de la zone viticole. Installer la mesure tout en amont du réseau d'irrigation n'aurait pas permis de faire la distinction entre les distributions destinées aux prairies et celle destinées au vignoble. Une sonde débitmètre (de type E-FlowMeter, développée par Cla-Val) a donc été installée dans une vanne qui se situe juste après les dernières ramifications du réseau approvisionnant les prairies. Ces données ont pu être valorisées dans la thèse (CALIANNO et al. 2018), en les combinant à des observations de terrrain pour attribuer certains des pics du signal de distribution aux parcelles irriguées correspondantes.

Avantages :

- La sonde est insérée dans une vanne existante (pas de coût de travaux, ni de coupure du réseau).
- La position sur une vanne permet aussi de mesurer la distribution de n'importe quel autre sous-bassin d'usage situé en aval d'une vanne.
- Résolution temporelle (horaire).
- Le système est autonome du point de vue énergétique : une turbine insérée dans la vanne fournit l'électricité à la sonde et au datalogger. La sond peut donc être installée loin d'une source de courant.
- Ne nécessite pas de relève sur place : les données sont envoyées sur serveur via un module GSM.

Inconvénients :

- Des pannes ont eu lieu à cause du bouchage des filtres de la turbine d'alimentation à la suite d'épisodes orageux (turbidité de l'eau du réseau).
- Coût élevé : 5719.- pour le système complet. Par contre, cela reste compétitif vis-à-vis de compteurs à turbines classiques pour un si gros diamètre de tuyau (qui engendre en outre des coûts importants pour les travaux d'installation et nécessite la coupure du réseau). Cela reste avantageux également par rapport aux autres systèmes de compteurs non-intrusifs (de type induction par exemple) dont le prix est élevé si l'on veut disposer d'une mesure fiable.

(v) Apports d'irrigation à Montana : installation de compteurs radio (petit échantillon)

Au niveau de l'usager, la mesure des apports d'irrigation a été effectuée sur un petit échantillon : une parcelle de prairie et un jardin privé. Deux compteurs avec antenne radio on été installés sur des ramification secondaires du réseau d'irrigation.

Avantages :

- Première mesure faite de l'irrigation au niveau de la parcelle à Montana.
- Coût relativement faible dans le cadre de ma thèse (700.- par compteur, avec antenne radio) car la commune me prête l'antenne d'acquisition radio. Seule la nécessité d'installer des compteurs de diamètre plus grand que les compteurs domestiques classiques a engendré des frais un peu plus importants.
- Les relèves radio sont effectuées durant la tournée des compteurs d'eau potable domestique, permettant une optimisation du temps.

Inconvénients :

- La résolution temporelle (bi-hebdomadaire) est un peu faible au vu des dynamiques d'arrosage. Par exemple, les prairies sont irriguées deux à trois fois par an et l'arrosage est généralement effectué sur une seule journée.
- Petit échantillon.
- Nécessite du temps de travail et de se rendre sur place pour faire la relève (une journée par mois dans le cas de cette thèse). Pour obtenir des mesures à pas de temps plus court (journalier, hebdomadaire), un datalogger ou un module de transmission GSM s'impose.

(vi) Apports d'eau potable à Megève : installation de dataloggers sur des compteurs existants (échantillon ciblé, haute résolution temporelle)

Un échantillon ciblé de compteurs (n=8) a été choisi en concertation avec les techniciens de la régie des eaux, pour sélectionner des profils d'usagers différents et mesurer leurs apports en eau potable. Ici également, les enjeux de confidentialité et de protection de la vie privée sont forts, car il a été difficile d'obtenir l'accord de tous les usagers initialement sélectionnées pour la pose de dataloggers et la mesure de leurs usages. Beaucoup ont refusé de participer à la campagne, en particulier les hôtels. La solution qui a finalement été adoptée, en accord avec la régie, est d'installer une partie des dataloggers sur des compteurs placés dans des *regards* (caissons enterrés) et donc situés dans le domaine public. Cette configuration a permis dans certains cas d'installer les dataloggers sans devoir demander l'autorisation aux propriétaires. Pour cette raison, les résultats ont été anonymisés afin de pouvoir être diffusés. Cette problématique de la confidentialité a également pu être contournée pour les compteurs domestiques d'eau potable à Montana, où les compteurs avec module GSM ont été installés dans les maisons d'employés de la commune. Le compteur radio mesurant l'irrigation du jardin est aussi situé sur le terrain d'un employé communal. Pour les relèves radio à distance de Montana, il n'y a pas eu de demande d'autorisation : les données sont anonymisées.

Pour en revenir au cas de Megève, deux types d'enregistreurs de données ont été utilisés : un modèle de datalogger pour une installation en intérieur (moins cher) et le Hobo-Station, un modèle de datalogger conçu pour une utilisation en extérieur (plus onéreux). Le Hobo-Station n'est pas à 100% imperméable, mais il résiste à l'humidité ("weather"-proof). Les dataloggers sont reliés à une tête de lecture filaire qui s'emboîte sur le compteur.

Avantages :

- Résolution temporelle des données (horaire).
- Les infrastructures (regards) sont situées sur la voie publique, ce qui facilite la relève.

- Nécessite peu de relèves par an : l'autonomie théorique des loggers pour comptage horaire est de plusieurs années.
- Les têtes de lecture emboîtées sur les compteurs sont amovibles, ce qui permet de passer d'une communication filaire (pour datalogger) à une communication radio sans devoir changer le compteur.

Inconvénients :

- Temps nécessaire par relève : il faut accéder au regard, ouvrir le datalogger et le connecter à un ordinateur pour décharger les données.
- Coût relativement élevé : 480.- pour le datalogger d'extérieur.
- Résistance des dataloggers à l'humidité et aux chocs (les piles se décrochent). Les têtes de lecture du fabricant de compteurs d'eau sont totalement résistantes à l'eau, mais les loggers choisis sont seulement "weatherproof". Ils sont prévus pour une installation extérieure mais ne sont pas suffisamment étanches pour résister à la condensation dans les regards les plus humides : les pièces d'électronique sensibles à l'humidité tombent en panne. Certains loggers ont donc dû être remplacés et mis à l'abri de la condensation dans des boîtes en plastique.
- L'accès des regards par conditions de neige peut être difficile.
- Petit échantillon.

Malgré la petite taille de l'échantillon, le ciblage des usagers effectué avec l'aide de la régie des eaux a permis d'obtenir des régimes d'apports caractéristiques à partir desquels une typologie a été proposée (CALIANNO à soumettre).

(vii) Apports d'eau potable à Megève : relève des compteurs radio existants (petit échantillon)

A Megève, peu de compteurs sont relevables par radio. Des têtes de lecture radio sont progressivement installées par le technicien communal depuis 2014. En 2017, 108 compteurs étaient équipés, sur les 3980 existants. Pour cette stratégie, les tournées de relève des dataloggers avec le technicien communal ont été mises à profit pour effectuer des relèves radio mensuelles.

Avantages :

- L'antenne d'acquisition manuelle permet de s'assurer de ne pas manquer de compteur.
- Ne nécessite pas de rentrer dans les bâtiments, la relève se fait depuis la voie publique.
- Pas de coût d'installation dans le cadre de ma thèse (relève des compteurs déja équipés en radio).

Inconvénients :

- L'antenne d'acquisition de Megève est en mode manuel : il faut s'arrêter à chaque compteur pour l'interroger. Les relèves nécessitent donc plus de temps de travail qu'à Montana : il faut compter environ deux minutes par compteur.
- La résolution des données correspond à la fréquence de relève (dans ce cas, mensuelle) car le compteur ne transmet qu'un index (celui du jour de relève). Cette méthode nécessite donc beaucoup de temps de travail au vu de la résolution temporelle obtenue.
- Petit échantillon de compteurs par rapport à la population totale.

Les données récoltées n'ont pas pu être valorisées dans la thèse, principalement en raison de la petite taille de l'échantillon. Aussi, la géolocalisation des compteurs n'était pas disponible (je disposais uniquement des adresses), ni les données relatives à l'habitat (nombre de logements, surface, habitat temporaire ou permanent). J'ai donc d'abord traité le cas de Montana, où j'avais à disposition une mesure de la quasi totalité des compteurs, leur géolocalisation et les caractéristiques d'habitat.

7.1.3 Retour sur l'enjeu des méthodes de quantification : structuration des données récoltées

Structurer la quantification des usages de l'eau

Une fois les mesures récoltées sur le terrain et après avoir défini clairement à quelle étape du cycle d'usage elle correspondent, il est nécessaire de les organiser suivant une structure permettant de rendre compte de la variabilité temporelle et de l'emprise spatiale des usages. Cette structuration des données s'est faite en définissant les concepts de bassin, régime et densité d'usage (CALIANNO et al. 2018).

Le bassin d'usage

A Montana, la délimitation spatiale des utilisations de l'eau par une cartographie des bassins d'usage a mis en évidence les différentes dynamiques et typologies d'usage de l'eau potable entre la station touristique, les villages traditionnels (Montana-Village, Diogne) et le village viticole de Corin. Dans le cas de Montana, la configuration du bâti, des affectations et des infrastructures influencent directement les usages dans leur spatialité : la station touristique montre des apports très fortements saisonniers en raison de la variation de population temporaire et montre également une importante part de l'irrigation des jardins avec l'eau potable, car le réseau d'irrigation n'est pas disponible au niveau la station. L'affectation viticole engendre également des usages spécifiques d'eau potable pour les caves lors des vendanges.

Les bassins d'usages définis dans ce travail permettent d'aller plus loin dans la représentation spatiale des usages du territoire. Ils décrivent la répartition des usages à l'intérieur même d'une commune, à l'échelle de l'agglomération (villages), alors que les travaux précédents quantifiant les usages de l'eau se limitent à l'échelle régionale (SAULNIER et al. 2011 ; COLLET et al. 2015 ; MILANO et al. 2015), communale (BONRIPOSI 2013 ; REYNARD et al. 2014 ; LEROY 2015) ou à l'échelle du bassin versant (MILANO et al. 2013a ; FABRE et al. 2015). VANHAM et al. (2011) propose une méthode matricielle pour estimer les demandes en eau mais celle-ci reste au niveau régional.

La densité d'usage

Une autre manière de structurer les données mesurées est de représenter l'intensité des usages par rapport à leur emprise au sol. Le concept de densité d'usage calcule un rapport entre les apports en eau et la surface de sol occupée par l'unité d'usage. Dans le cas des usages domestiques de l'eau potable, cette unité est la parcelle cadastrale sur laquelle se trouve le bâti. Dans le cas de l'irrigation, l'unité est la parcelle arrosée. A Montana, le calcul des densités d'usage a permis de mettre en évidence la très forte intensité de l'arrosage des jardins (de l'ordre de 400 à 600 mm/an). L'arrosage du jardin étudié à Montana a une

intensité 4 à 6 fois plus importante que l'arrosage de la prairie (autour de 100 mm/an) et au minimum 10 fois plus importante que les distributions d'eau d'irrigation vers le vignoble (de 7 à 67 mm/an). L'importance de l'irrigation des pelouses dans la région de Crans-Montana-Sierre a déjà été mise en évidence par REYNARD (2000b) et BONRIPOSI (2013), mais les résultats obtenus ici en calculant les densités d'usage permettent de chiffrer la part de ces arrosages dans les apports d'eau potable en station.

Les densités d'usage de l'eau potable varient elles aussi fortement entre les bassins d'usage. En station, comme l'eau potable est utilisée pour l'irrigation des pelouses et des jardins privés, on retrouve des valeurs de densité proches de celles de la parcelle de jardin (autour de 600 mm/an). Par contre, les densités sont faibles à Montana-Village et à Diogne (de 100 à 200 mm/an). Les densités pour le village de Corin ont des valeurs intermédiaires (entre 300 et 400 mm/an), probablement en raison du pic d'usage des caves viticoles durant les vendanges.

La méthode des densités d'usage permet donc d'évaluer l'empreinte spatiale d'usages différents et d'obtenir une géographie de l'impact l'ensemble des usages de l'eau d'un un territoire (usages de l'eau potable, irrigation, neige artificielle) à l'aide d'une seule unité : le mm. Elles pourraient compléter le volet spatial des études visant à évaluer les impacts anthropiques sur les ressources en eau (PFISTER et al. 2009 ; MAGNIER 2013 ; MILANO et al. 2015 ; POLLA 2016 ; GUERMAZI et al. 2018).

Le régime d'usage

Les différences de variabilité temporelle des usages ont pu être mises en évidence en définissant des régimes d'usage, c'est-à-dire des séries temporelles divisées par leurs moyennes inter-annuelles. Cette standardisation permet de s'affranchir des différences volumiques entre usagers, en utilisant des valeurs adimensionnées qui isolent uniquement les aspects dynamiques. De cette manière, l'échantillon d'apports en eau potable de Megève a pu être classifié selon la signature saisonnière des différentes classes d'usage : habitat unifamilial ou groupé, résidence temporaire ou permanente, hôtels, bureaux, ferme. A Montana, la représentation en régimes a permis de positionner sur une même échelle graphique les dynamiques des usages de l'eau potable de chaque bassin et les usages d'irrigation (jardin, prairie et vignoble).

Les régimes d'usages obtenus dans ce travail apportent la résolution temporelle nécessaire à la construction et la validation des modèles intégrés ressource-demande. En effet, les modèles intégrés de l'eau à l'échelle du bassin versant utilisent souvent des données d'usage à l'échelle annuelle, basées sur l'évolution des recensements de population (MILANO et al. 2013a ; GROUILLET et al. 2015 ; FABRE et al. 2015), ce qui fait que la saisonalité intra-annuelle des demandes en eau provient souvent uniquement de la variabilité des usages liés à l'irrigation. Les régimes d'usage permettraient d'ajouter la variabilité saisonnière intra-annuelle des usages de l'eau potable, engendrée par les flux de population temporaire.

De plus, la classification des régimes d'usage de l'eau potable par type d'habitat et par usages spécifiques permet d'ajouter un niveau de précision dans la distinction des différents signaux temporels de la demande, alors que dans les études de modélisation intégrée actuelles, la catégorie utilisée reste limitée aux "eaux urbaines" (MILANO et al. 2015 ; COLLET et al. 2015 ; LEROY 2015).

Créer des outils d'aide à la modélisation des usages

La typologie de régimes d'apports d'eau potable définie à Megève a ensuite été utilisée pour proposer une méthode de modélisation des dynamiques de distribution. Cette méthode de "reconstruction" de la distribution utilise les régimes comme *patrons* des dynamiques d'apports de chaque catégorie d'usage. Le principe consiste à multiplier ces patrons normalisés par la valeur moyenne interannuelle de chaque catégorie (en litres par logement, litres par lit touristique,...) et par le nombre d'unités (connues ou estimées) de chaque catégorie d'usage présente sur le territoire (nombre de lits touristiques, nombre de logements, ...). Les résultats de la reconstruction de la distribution dans le cas de Megève reproduisent bien les dynamiques saisonnières, mais ils ont de la peine à reproduire les volumes distribués. Les incertitudes de cette reconstructions sont certainement causées par la faible représentativité de l'échantillon ciblé de Megève, qui mériterait d'être étendu.

Cette méthode simplifiée de reconstruction de la distribution est une nouvelle approche à ajouter aux méthodes de modélisation de la demande en eau potable (RINAUDO 2015). Elle offre une alternative simple pour la prévision des demandes en eau et a l'avantage de pouvoir être appliquée facilement sur des territoires ne possédant pas de mesure des usages ou pour l'élaboration de scenarii de planification urbaine pour lesquels on souhaiterait connaître les dynamiques de distribution. Il serait intéressant d'utiliser cette méthode en complément du modèle intégré développé par LEROY (2015) sur la commune de Megève.

7.1.4 Retour sur l'enjeu des spécificités des usages de l'eau en région touristique de montagne

Les usages de l'eau potable en région touristique de montagne et l'irrigation ont comme point commun une forte variabilité temporelle. Les campagnes de monitoring à Megève et Montana ont permis d'améliorer la connaissance de ces usages en termes de saisonalité, de spatialité et de pratiques.

Une importante saisonalité des usages de l'eau en région touristique alpine

La catégorisation des régimes d'apport de l'eau potable à Montana suivant les caractéristiques de l'habitat (maison, bloc d'appartements, hôtel) et les modalités de résidence (permanente, temporaire) a permis d'affiner la description des régimes d'usages de l'eau potable dans chacun des bassins d'usage définis dans la commune. C'est cette catégorisation qui a par exemple permis de mettre en évidence les pics d'usage des caves viticoles. Comme attendu, c'est la station touristique qui possède la plus forte saisonalité des apports. A sein même de la station, les habitats à taux de logements temporaires élevé et les hôtels montrent logiquement la plus forte saisonalité, avec des pics importants d'apports durant la haute saison estivale, les fêtes de fin d'année et les vacances d'hiver (février). Les apports aux maisons individuelles montrent eux les pics estivaux les plus intenses, mettant en évidence l'utilisation de l'eau potable pour l'arrosage des jardins. La différence entre le pic d'usage de la saison touristique estivale et celui des fêtes de fin d'année indique que l'irrigation des jardins peut représenter jusqu'à 40 % des apports d'eau potable entre les mois de juin et août.

Les signatures saisonnières de la demande en eau potable obtenues à pas de temps bihebdomadaire apportent un niveau de précision supplémentaire dans la caractérisation des demandes dans les régions touristiques de montagne (VANHAM et al. 2011 ; BONRIPOSI 2013 ;

LEROY 2015) et la même stratégie de monitoring et de catégorisation pourrait être appliquée à d'autres cas, comme par exemple les stations touristiques côtières (RICO-AMOROS et al. 2009 ; GÖSSLING et al. 2012 ; VALLÈS-CASAS et al. 2017).

Les régimes d'irrigation observés à Montana ont en outre permis de valider la temporalité des pratiques d'arrosage définies lors des entretiens avec les acteurs irrigants en leur donnant des signatures temporelles graphiques.

Par ailleurs, une des caractéristiques marquantes des stations de Montana et Megève est la présence d'un nombre important d'habitations haut de gamme. Ce contexte a une influence directe sur les pratiques d'usage de l'eau potable. A Megève, un cas intéressant est celui de l'un des "grands" chalets en résidence secondaire dont les apports ont été mesurés lors de la campagne de monitoring. De très importants pics d'apport (à plus de 30 $m^3/jour$) ont été enregistrés à plusieurs reprises sur les deux années de mesures. Ces valeurs ont alerté l'attention du technicien communal qui a par la suite envoyé un courrier au propriétaire pour le prévenir de la situation, pensant qu'il s'agissait de fuites. Le propriétaire a répondu par courrier en expliquant que tout était normal et qu'il allait sans autres payer la facture d'eau. Ce type d'usage disproportionné de l'eau potable dans les chalets de luxe n'est apparemment pas un cas isolé à Megève. D'après le technicien communal, saunas et piscines intérieures sont assez répandues. Il y aurait même des chalets où coulent des rivières artificielles. Après quelques recherches, il apparaît finalement que ce "grand" chalet est en fait géré par une agence de location de résidences de luxe. Les pics d'apport pourraient être dus au remplissage de la piscine intérieure, car certains locataires exigeraient que l'eau soit remplacée avant leur arrivée. Ce genre de pratique d'usage de l'eau, bien qu'exceptionnelle, pose question quant à l'aspect incitatif du prix de l'eau potable dans une station touristique alpine huppée, où une majorité des propriétaires de chalets en résidence secondaire a les moyens de régler la facture d'eau sans se soucier de la quantité utilisée.

Améliorer la connaissance sur les pratiques d'irrigation en montagne

Les entretiens menés auprès des irrigants à Montana ont permis de mieux connaître les pratiques d'irrigation des vignes, des prairies et des pelouses privées. Alors que beaucoup d'études intégrées se contentent d'utiliser les valeurs-types de besoin en eau des cultures, à partir de la documentation fournie par les méthodes agro-climatiques (par exemple, les tables de paramètres de la FAO ; ALLEN et al. 1998), cette étude a pu identifier les pratiques précises d'arrosage effectuées pour chaque type de culture présent dans la commune. Les informations récoltées ont aidé à la structuration des paramètres de ces pratiques : durées et volumes par tour d'eau, nombre de tours par saison, périodes de l'année et horaires d'arrosages, critères de décision pour démarrer l'arrosage, rotation des surfaces irriguées, diversité des "caractères" des irriguants (grands ou petits passionnés d'arrosage), irrigants professionnels ou amateurs, calendrier de gestion des tours d'eau, phénologie des cultures. La récolte de ces paramètres anthropiques sur le terrain permet d'améliorer sensiblement la définition des pratiques d'irrigation réelles sur laquelle se basent les méthodes empiriques d'estimation de l'irrigation (ARCALPIN 2008).

Par exemple, le monitoring de l'arrosage de la prairie de Montana-Village a bien montré que les apports d'irrigation sont très variables d'une année à l'autre : ils dépendent de l'appréciation de l'irrigant des conditions climatiques des semaines précédentes (état hydrique plantes) et des prévisions de pluie pour les jours suivants. Cet aspect d'apréciation

humaine est déjà un facteur qui va différencier les estimations faites par des modèles et l'irrigation effective. Les résultats ont également montré que l'agriculteur peut faire des 'demi' tours d'irrigation, c'est-à-dire effectuer un arrosage avec moitié moins de volume d'eau que d'habitude, s'il considère qu'il ne fait pas assez sec pour un arrosage complet. Cette notion d'adaptation des tours est également une pratique au 'feeling' des irrigants qu'il est difficile d'implémenter dans les modèles.

7.1.5 Retour sur l'enjeu des écarts entre l'estimation de l'usage de l'eau et usage effectif

Confronter les méthodes d'estimation de l'irrigation aux pratiques effectives

En disposant de l'analyse des pratiques d'irrigation et des données d'irrigation des campagnes de monitoring, il a été possible de confronter les valeurs d'usage obtenues par différentes méthodes d'estimation de l'irrigation et de les valider avec les valeurs observées sur le terrain pour l'arrosage des prairies et des vignes. Les méthodes comparées sont les suivantes :

Option 1 Méthode utilisant les prélèvements comme proxi.

Basée sur les valeurs de prélèvements destinés à l'irrigation (REY-FAVRE-BONVIN-CORDONNIER 1984 ; CROOK 1997 ; REYNARD 2000b ; ARCALPIN 2008 ; BONRIPOSI 2013).

Option 2 Méthode empirique via les densités d'apport.

Basée sur les densités d'apport, en multipliant les densités d'apport par tour d'eau par le nombre de tours d'eau et par les surfaces totales irriguées (ARCALPIN 2014).

Option 3 Méthode empirique via les densités d'apport (corrigée).

Basée sur les densités d'apport et corrigée selon les pratiques observées (correction du nombre de tours d'eau) et le contexte pédologique de Montana.

Option 4 Simulation agro-climatique.

Basée sur des méthodes calculant le besoin en eau des plantes : modèles CropWat (ALLEN et al. 1998) et WEAP-MABIA (YATES et al. 2005 ; JABLOUN et SAHLI 2012).

Option 5 Obsevations de terrrain.

Monitoring des apports pour la prairie et de la distribution vers la zone du vignoble à Montana.

Afin de comparer les résultats, les valeurs obtenues par chaque méthode ont été corrigées par des pourcentages hypothétiques de pertes pour être ramenées à des valeurs correspondant à l'étape de distribution.

Les résultats montrent qu'à Montana, l'estimation de l'irrigation basée sur les prélèvements surestime d'un facteur 10 à 12 les distributions d'irrigation observées. Ceci est certainement en grande partie dû au fait que les prélèvements transitent par les bisses, qui sont à écoulement libre jour et nuit durant la période d'irrigation. Il y a donc une grande part de pertes de l'eau prélevée, restituée dans le milieu naturel lorsque les réservoirs d'irrigation sont déjà remplis et pendant les périodes où il n'y a pas de demande d'irrigation. Toutes les autres méthodes d'estimation de l'irrigation produisent également des valeurs qui surestiment l'irrigation observée. Le scénario d'irrigation maximale de la méthode empirique (ARCALPIN 2014) donne des valeurs quatre fois supérieures aux observations faites durant

l'année 2015, qui a été l'année la plus chaude observée avec une canicule historique. En faisant les corrections selon les pratiques d'irrigation observées, cette méthode s'améliore et ne surestime plus que d'un facteur 2 les valeurs observées en 2015. Les valeurs produites par les simulations agro-climatiques sont elles aussi largement surestimées. Le modèle CropWat a été implémenté avec les conditions climatiques des trois années d'observation (2015, 2016 et 2017). Il produit des valeurs qui ne varient pas beaucoup entre ces trois années, alors que les conditions climatiques étaient justement très contrastées, avec un été 2015 caniculaire, un été 2016 humide et frais et un été 2017 chaud et sec. Le modèle produit des valeurs quasiment 19x supérieures aux observations pour l'année la moins irriguée (2016), 14x supérieures pour l'année d'irrigation moyenne (2017) et 10.5x supérieures pour l'année d'irrigation la plus intense (2015). Le modèle WEAP-MABIA, qui a été implémenté à Montana par BONRIPOSI (2013) entre 2000 et 2011 semble lui se montrer plus sensible au contexte climatique puisqu'il donne des valeurs de distribution d'irrigation qui varient fortement entre les simulations entre l'année la plus humide (2005) et l'année la plus chaude (canicule historique de 2003). Les valeurs de distribution simulées pour 2003 restent cependant 12x supérieures aux distributions observées en 2015, bien que ces deux étés aient subi des canicules d'intensité proche.

Ces résultats soulignent l'importance d'effectuer une analyse des pratiques d'irrigation des acteurs sur le terrain pour s'assurer que les paramètres implémentés dans les modèles d'estimation correspondent à la réalité des arrosages effectués. L'approche multi-méthodes appliquée dans cette thèse, qui combine des données quantitatives (mesures *in-situ* sur les compteurs d'eau, application de méthodes d'estimation) et qualitatives (observations directes sur le terrain, entretiens), a permis de construire une vision intégrale de la problématique de l'irrigation à Montana. La quantification de l'irrigation réelle a pu être mise en regard des pratiques des irrigants, donnant ainsi des facteurs d'explication aux régimes de distribution.

Le cas de Montana a également mis en évidence **les différences d'estimation qu'il peut y avoir suivant l'étape du cycle d'usage de l'eau choisie** par les méthodes indirectes d'estimations et les proxis. Ce ne sont pas les méthodes et les modèles en eux-mêmes qui sont 'mauvais', mais le choix de la quantité d'eau à évaluer. Un tel constat vient aussi souligner la nécessité d'être rigoureux avec la terminologie des usages de l'eau. Les observations obtenues durant la campagne de monitoring de l'irrigation ont montré qu'utiliser les valeurs de prélèvement comme proxi, tel que l'ont fait REYNARD (2000b) et BONRIPOSI (2013), peut surestimer les distributions réelles jusqu'à un facteur 12. Modéliser les besoins en eau des plantes surestime également les distributions observées, comme l'a montré BONVIN (2017) en faisant tourner le modèle CropWat dans la même zone d'étude. Toutes les études de bilans intégrés de l'eau incluant l'usage d'irrigation et utilisant comme proxi l'estimation du besoin des plantes par une méthode agro-climatique (MILANO 2012 ; BONRIPOSI 2013 ; MILANO et al. 2015 ; FABRE et al. 2015 ; GROUILLET et al. 2015) ont donc très probablement tendance à exagérer les distributions effectives d'irrigation, car ces modèles supposent un rendement optimal des cultures, un arrosage couvrant la totalité des surfaces théoriquement irrigables et un arrosage systématique par l'ensemble des irrigants. Or, cette étude a montré qu'à Montana, l'irrigation est loin d'être systématique : chaque irrigant décide d'irriguer ou non chaque année suivant ses propres critères et perceptions. Evaluer l'irrigation à partir de méthodes empiriques non validées sur le terrain (ARCALPIN 2014) surestime aussi les distributions réelles jusqu'à un facteur 4. La difficulté des méthodes d'estimation empiriques est leur actualisation par rapport aux pratiques réelles. Par exemple, à Montana, les

pratiques d'irrigation du vignoble suivent historiquement une tendance à la baisse. Au fur et à mesure que les générations se renouvellent, la production de vin se tourne progressivement vers des objectifs qualitatifs qui remplacent les pratiques de production quantitatives (nécessitant une irrigation importante), majoritaires en Valais jusque dans les années 1980.

7.2 Recommandations pour le monitoring des usages de l'eau en territoire touristique de montagne

Suite aux résultats obtenus à Megève et Montana et aux expériences vécues lors de la mise en place et du déroulement des campagnes de mesure, cette section propose des recommandations pour le monitoring des usages de l'eau dans les territoires touristiques de montagne. Ces recommandations seraient parfaitement transférables à d'autres territoires et collectivités. Malgré tout, l'influence du tourisme sur la saisonalité des usages et l'isolement, la topographie et la densité d'habitat des territoires de montagne font que les stratégies proposées ici sont plutôt construites dans un contexte de tension entre le peu d'équipements de mesures en place et la nécessité de quantifier à haute résolution la saisonalité des usages. Ces stratégies seront donc le plus souvent basées sur le compromis.

Diverses fiches-outils sont proposées pour l'aide au choix d'une stratégie de monitoring adaptée aux besoins de quantification et au contexte territorial. Premièrement, une fiche-diagnostic permet de faire le bilan des usages de l'eau d'un territoire et des infrastructures en place. Sur base de ce diagnostic, différentes options de stratégies de monitoring sont proposées en fonction des résolutions de mesure souhaitées, du contexte territorial et des moyens disponibles, sous la forme d'un "devis". Enfin, deux schémas méthodologiques décrivent les configurations idéales d'un monitoring dans le cas du réseau d'eau potable et du réseau d'irrigation.

7.2.1 Fiche-diagnostic des usages de l'eau du territoire et des infrastructures en place

La fiche-diagnostic (Fig. 7.1) collecte divers paramètres pour effectuer un bilan des caractéristiques du territoire liées aux usages de l'eau : catégories d'usage, configuration du bâti, régimes résidentiels (habitat temporaire, permanent), hôtellerie, commerces, industries, jardins, surfaces agricoles irriguées, loisirs. Une évaluation des pratiques des irrigants est proposée : durée et apport par arrosage, critères de décision, nombre de tours par saison, périodes de l'année.

Ensuite est fait l'état des lieux des politiques de gestion de l'eau et des infrastructures en place : réseaux, mesures effectuées (étape du cycle d'usage, résolution temporelle, mode de relève), nombre et types de compteurs, estimation des pertes de réseau. Une fois cette fiche-diagnostic complétée, on dispose des paramètres nécessaires pour définir le contexte de mesures existant et sur lequel se baser pour construire la stratégie de monitoring la plus adaptée au terrain.

DIAGNOSTIC HYDRO-TERRITORIAL	*Réseaux existants?*	Approvisionnement en Eau Potable			Approvisionnement pour l'irrigation	
	Quels usages?	**Usage**	**Unités**		**Usages (surfaces irriguées)**	**Unités**
		Usages domestiques :	(n logements)		Prairies :	(surface)
		Hotels :	(n lits)			
		Hébergements diffus :	(n lits)		Cultures	
		Irrigation des jardins (sur AEP) :	(surface)		- vigne :	(surface)
		Commerces et petit artisanat :	(n unités)		- arboriculture :	(surface)
		Industries (sur AEP) :	(n unités)		- maraichage :	(surface)
		Neige artificielle :	(surface à enneiger)		- ... :	(surface)
		Hydroélectricité (sur AEP) :	estimation volume annuel (m^3)		Espaces verts municipaux :	(surface)
		Exploitation agricole (sur AEP) :	(n unités)		Golfs :	(surface)
		Bureaux :	(n places de travail)		... :	(surface)
		Usages municipaux :	estimation volume annuel (m^3)			
		Loisirs (ex: thermalisme) :	estimation volume annuel (m^3)			
	Quelles pratiques?	**Configuration du bâti et régime résidentiel (usages domestiques)**			**Pratiques des irrigants?**	
	Configuration de l'habitat?	Maisons unifamiliales :	(n logements; habitat permanent)		Densité des irrigants :	(n propriétaires/ha)
			(n logements; habitat temporaire)		Apport par arrosage :	(mm)
		Habitat collectif :	(n logements; habitat permanent)		Durée de l'arrosage (par tour) :	(h)
			(n logements; habitat temporaire)		Nombre de tours par saison :	(n tours)
		Densité de l'habitat :	(n logements / km^2)		Période(s) d'arrosage :	(dates)
					Critère de décision par arrosage :	(climat, état cultures?)
GESTION DE L'EAU	*Quelle gestion de l'eau?*	Publique / privée?			Publique / privée?	
		Tarification : au volume / au forfait?			Tarification : au volume / au forfait (surface)?	
		Réglementation :	- Incitations à l'économie d'eau?		Réglementation :	- Calendrier d'alternance des tours d'irrigation?
			- Restrictions si épisode de sécheresse?			
MONITORING EN PLACE	*Etape du cycle d'usage?*	Prélèvements	Distribution	Apports	Prélèvements	Distribution	Apports
	Résolution temporelle des données?	1x /an ; mois ; semaine ; jour; h	1x /an ; mois ; semaine ; jour; h	1x /an ; mois ; semaine ; jour; h	1x /an ; mois ; semaine ; jour; h	1x /an ; mois ; semaine ; jour; h	1x /an ; mois ; semaine ; jour; h
	Estimation des pertes	lors de l'adduction (%)	lors de la distribution (%)		lors de l'adduction (%)	lors de la distribution (%)	
	Total compteurs installés :	(n compteurs)	(n compteurs)	(n compteurs)	(n compteurs)	(n compteurs)	(n compteurs)
	A l'échelle de l'usager :			Compteur par logement, par bâtiment?			
	Nombre d'unités			(n bâtiments/logement)			(n parcelles équipées)
	Modalité de relève :			Manuelle ; Radio ; Online			Manuelle ; Radio ; Online
	Compteurs avec antenne radio :			(n compteurs radio)			(n compteurs radio)
	Compteurs online :			(n compteurs online)			(n compteurs online)

FIGURE 7.1 – Fiche-diagnostic des usages de l'eau d'un territoire.

7.2.2 Propositions de stratégies de monitoring suivant le contexte et les objectifs fixés

Une fois le contexte décrit, je propose de faire plusieurs scenarii de monitoring, sous forme d'un devis. Plusieurs options de stratégies de monitoring peuvent ainsi être proposées et comparées en faisant varier les objectifs de quantification souhaités (résolution spatiale, échantillon), les ressources disponibles (coût, temps de travail à disposition) et le degré de praticité des relèves.

Dans notre cas, trois options de monitoring ont été développées (Fig. 7.2), pour chacune desquelles, sont choisis à chaque étape du cycle d'usage (prélèvements, distribution, apports) les paramètres suivants :

- Résolution temporelle des données,
- Modalités de relève (manuelle, automatique, radio),
- Matériel à installer (compteurs, débitmètres, modules de communication),
- Temps nécessaire pour la relève, par compteur et par an,
- Coût par compteur (en contexte suisse),
- Investissement nécessaire pour équiper l'ensemble du territoire,
- Temps de relève par an.

Des objectifs différents sont ainsi proposés pour chaque stratégie :

Option 1 Stratégie de monitoring avec résolution idéale.

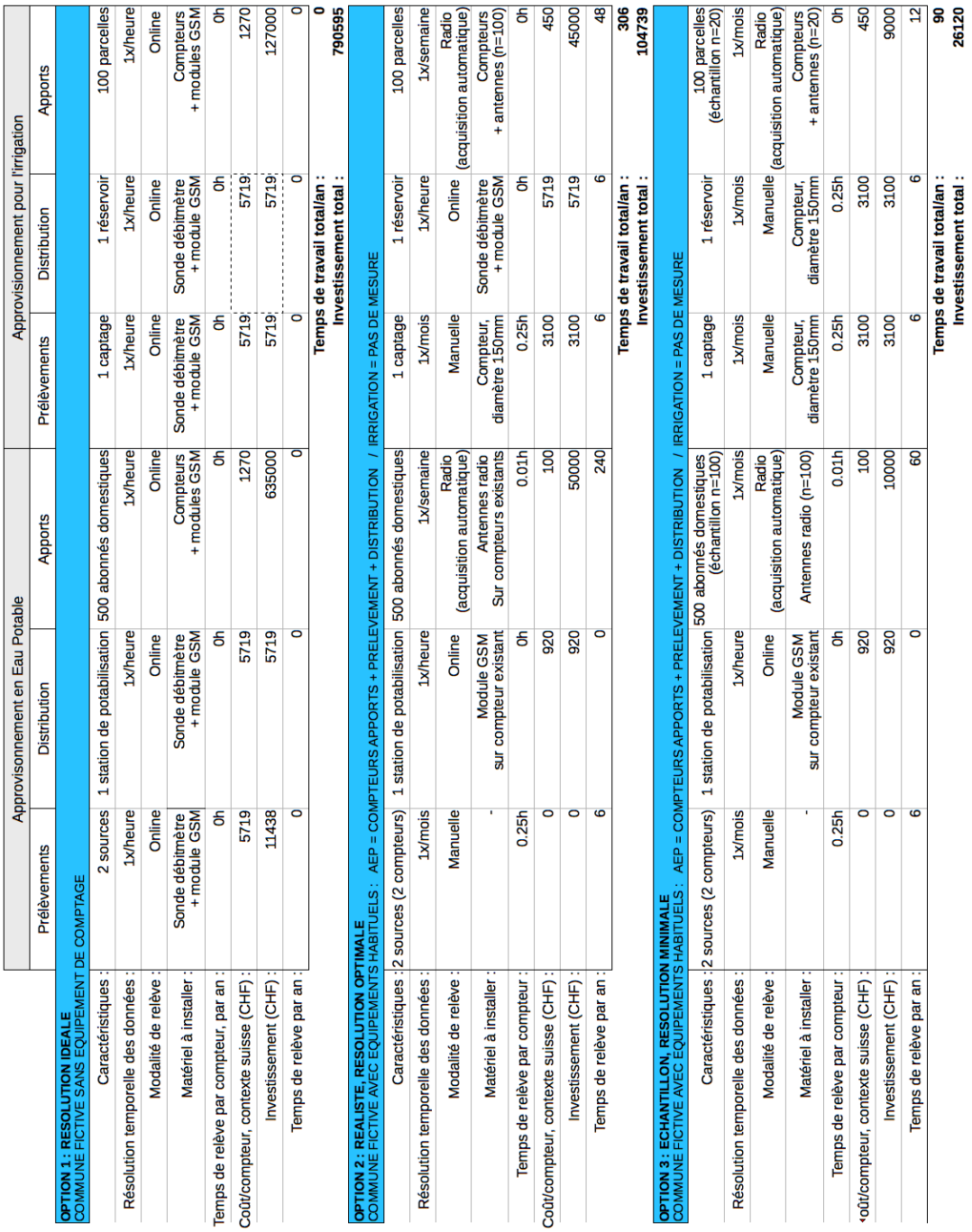
Pas de temps de données courts et exhaustivité de l'échantillonnage. La commune est fictive (500 abonnés domestiques pour l'eau potable) et sans équipement de comptage en place (tout est à installer à partir de zéro).

Option 2 Stratégie de monitoring avec résolution optimale (compromis).

Pas de temps des données courts et échantillon le plus exhaustif possible (meilleur compromis selon le contexte du terrain). La commune est fictive (500 abonnés domestiques pour l'eau potable) et les infrastructures en place correspondent à la plupart des situations réelles : bâtiments équipés de compteurs domestiques mais sans antenne radio, compteurs déjà en place au niveau de la distribution et des prélèvements. Dans ce scénario fictif, si des usages d'irrigation existent, aucune mesure n'est installée.

Option 3 Stratégie de monitoring "low cost".

Basée sur un échantillon non exhaustif des compteurs et avec une résolution temporelle minimale des données, dans une commune fictive avec équipements habituels (configuration identique à l'option 2).



	Approvisionnement en Eau Potable			Approvisionnement pour l'irrigation		
	Prélèvements	Distribution	Apports	Prélèvements	Distribution	Apports
OPTION 1 : RESOLUTION IDEALE COMMUNE FICTIVE SANS EQUIPEMENT DE COMPTAGE						
Caractéristiques :	2 sources	1 station de potabilisation	500 abonnés domestiques	1 captage	1 réservoir	100 parcelles
Résolution temporelle des données :	1x/heure	1x/heure	1x/heure	1x/heure	1x/heure	1x/heure
Modalité de relève :	Online	Online	Online	Online	Online	Online
Matériel à installer :	Sonde débitmètre + module GSM	Sonde débitmètre + module GSM	Compteurs + modules GSM	Sonde débitmètre + module GSM	Sonde débitmètre + module GSM	Compteurs + modules GSM
Temps de relève par compteur, par an :	0h	0h	0h	0h	0h	0h
Coût/compteur, contexte suisse (CHF) :	5719	5719	1270	5719	5719	1270
Investissement (CHF) :	11438	5719	635000	5719	5719	127000
Temps de relève par an :	0	0	0	0	0	0
				Temps de travail total/an :		**0**
				Investissement total :		**790595**
OPTION 2 : REALISTE, RESOLUTION OPTIMALE COMMUNE FICTIVE AVEC EQUIPEMENTS HABITUELS : AEP = COMPTEURS APPORTS + PRELEVEMENT + DISTRIBUTION / IRRIGATION = PAS DE MESURE						
Caractéristiques :	2 sources (2 compteurs)	1 station de potabilisation	500 abonnés domestiques	1 captage	1 réservoir	100 parcelles
Résolution temporelle des données :	1x/mois	1x/heure	1x/semaine	1x/mois	1x/heure	1x/semaine
Modalité de relève :	Manuelle	Online	Radio (acquisition automatique)	Manuelle	Online	Radio (acquisition automatique)
Matériel à installer :	-	Module GSM sur compteur existant	Antennes radio Sur compteurs existants	Compteur, diamètre 150mm	Sonde débitmètre + module GSM	Compteurs + antennes (n=100)
Temps de relève par compteur :	0.25h	0h	0.01h	0.25h	0h	0h
Coût/compteur, contexte suisse (CHF) :	0	920	100	3100	5719	450
Investissement (CHF) :	0	920	50000	3100	5719	45000
Temps de relève par an :	6	0	240	6	6	48
				Temps de travail total/an :		**306**
				Investissement total :		**104739**
OPTION 3 : ECHANTILLON, RESOLUTION MINIMALE COMMUNE FICTIVE AVEC EQUIPEMENTS HABITUELS : AEP = COMPTEURS APPORTS + PRELEVEMENT + DISTRIBUTION / IRRIGATION = PAS DE MESURE						
Caractéristiques :	2 sources (2 compteurs)	1 station de potabilisation	500 abonnés domestiques (échantillon n=100)	1 captage	1 réservoir	100 parcelles (échantillon n=20)
Résolution temporelle des données :	1x/mois	1x/heure	1x/mois	1x/mois	1x/mois	1x/mois
Modalité de relève :	Manuelle	Online	Radio (acquisition automatique)	Manuelle	Manuelle	Radio (acquisition automatique)
Matériel à installer :	-	Module GSM sur compteur existant	Antennes radio (n=100)	Compteur, diamètre 150mm	Compteur, diamètre 150mm	Compteurs + antennes (n=20)
Temps de relève par compteur :	0.25h	0h	0.01h	0.25h	0.25h	0h
Coût/compteur, contexte suisse (CHF) :	0	920	100	3100	3100	450
Investissement (CHF) :	0	920	10000	3100	3100	9000
Temps de relève par an :	6	0	60	6	6	12
				Temps de travail total/an :		**90**
				Investissement total :		**26120**

FIGURE 7.2 – Recommandations pour le monitoring des usages de l'eau suivant différentes stratégies.

La meilleure option sera alors à retenir suivant les moyens disponibles pour atteindre ces objectifs :

L'option 1 est la meilleure option en termes de pas de temps des données (horaires) et d'échantillonnage (tous les usages et toutes les étapes du cycle sont quantifiés). Elle ne nécessite aucune heure de travail pour la relève des données, mais elle est la plus onéreuse avec un investissement total approchant 800'000 francs.

L'option 2 est un compromis entre les pas de temps des données et l'exhaustivité de l'échantillonnage : les données de prélèvements sont mensuelles (par relèves manuelles), les données de distribution sont horaires (par relèves online) et les données d'apports sont hebdomadaires (par relèves radio). Ce choix de pas de temps permet de garder une haute

résolution temporelle pour les distributions, qui sont les séries de données centrales du cycle d'usage. Le pas de temps mensuel pour les prélèvements est suffisant pour donner une image globale du régime de prélèvement et pour évaluer les pertes durant l'adduction. Cela évite les coûts d'installation d'une sonde débitmètre. Enfin, les apports d'eau potable et d'irrigation sont relevés simultanément en radio à pas de temps hebdomadaires, pour obtenir un compromis entre la résolution temporelle et le temps de travail nécessaire pour les relèves. L'échantillon des apports ne sera pas forcément exhaustif car dans un souci d'économie de temps, les acquistions se feront par la méthode automatique, qui réduit légèrement l'échantillon. Cette option nécessite malgré cela beaucoup de temps de travail pour les relèves radio (306 heures de travail annuellement) mais l'investissement en matériel est limité à un peu plus de 100'000 francs.

L'option 3 est la stratégie offrant le "service minimum" de monitoring au niveau des apports. Les mesures indispensables (au niveau de la distribution et des prélèvements) restent basées sur le même principe que l'option 2. Par contre, les apports sont dans ce cas-ci quantifiés sur la base d'un échantillon couvrant 20% de la population des compteurs d'eau potable et d'irrigation. Cette option permet de proposer un échantillon des régimes d'apports, qui devront être validés avec les régimes de distribution et de prélèvement. Le temps de travail de relève est réduit à 90 heures par an et l'investissement de départ à 26'000 francs.

Le compromis idéal est donc à définir suivant le temps de travail nécessaire pour les relèves des données, le coût des appareils à installer, les pas de temps de données souhaités, l'exhaustivité de l'échantillon et la praticité opérationnelle des relèves. Si le pas de temps horaire est trop fin, il engendre souvent une quantité très importante de données, ce qui demandera beaucoup de temps de traitement si l'on veux représenter tous les usagers. Mesurer à l'échelle horaire peut donc amener à la situation où l'on dispose de grosses quantités de données, mais que l'on n'arrive finalement pas à valoriser. Ma résolution favorite est le pas de temps journalier, qui permet de comparer les différents régimes des usagers d'un territoire sur une année entière. La résolution spatiale idéale serait de travailler à l'échelle de la personne (litres par habitant). Mais cette donnée est très difficile à obtenir dans les régions touristiques où la population temporaire varie constamment : il faudrait arriver à diviser les apports aux compteurs de chaque bâtiment par le nombre exact de personnes présentes chaque jour, ce qui représente une travail titanesque à l'échelle d'une commune. Le compromis que je propose consiste à travailler à la plus petite échelle d'unité qui ne varie pas dans le temps : des litres par logement, par lit d'hôtel, par surface irriguée, par place de travail dans les bureaux. De plus, ces unités sont des données aisées à obtenir.

7.2.3 Données importantes à collecter pour le monitoring des usages de l'eau potable et de l'irrigation

Pour conclure, je propose deux schémas de mise en oeuvre de monitoring adaptés au contexte des territoires touristiques de montagne : l'un pour les usages de l'eau potable, l'autre pour l'irrigation. J'y propose un compromis entre les données qualitatives et quantitatives importantes à collecter.

Monitoring des usages de l'eau potable

Le monitoring idéal des usages de l'eau potable (Fig. 7.3 et Tableau 7.2) comprend des mesures journalières au niveau des prélèvements et de la distribution. Celles-ci permettent d'obtenir une vision globale des régimes d'usage du territoire et servent à l'estimation des

pertes durant l'adduction et la distribution. Le compromis choisi pour le monitoring des apports d'eau potable est de travailler avec deux échantillons en parallèle : l'un de résolution temporelle basse (mensuelle), sur un échantillon exhaustif des compteurs (avec relèves radio), l'autre à haute résolution temporelle (journalière) sur un échantillon ciblé, le plus représentatif possible de la diversité des usages existants (avec relèves par logger ou module GSM). De cette manière, l'échantillon exhaustif donne une vision d'échelle temporelle intermédiaire mais avec la totalité des compteurs, ce qui permet une première catégorisation des régimes d'usage et donne la valeur des apports totaux, utilisée pour calculer les pertes à la distribution. L'échantillon ciblé vient ensuite en renfort pour produire une typologie de régimes d'apports à haute résolution temporelle permettant de distinguer les pratiques d'usages de l'eau potable. Pour cet échantillon ciblé, je propose également de faire un entretien avec chaque usager pour documenter ses pratiques d'usage de l'eau potable. Les informations à collecter durant ces entretiens sont reprises sous forme de questions dans le Tableau 7.2.

	Prélèvement	**Distribution**	**Apport**
Données quantitatives (compteurs)	*1 mesure/jour* compteur online	*1 mesure/jour* compteur online	- Echantillon exhaustif : 100% des compteurs *1 mesure/mois* - Echantillon ciblé : 10% des compteurs *1 mesure/jour*
Données qualitatives (entretiens)			- Pour l'échantillon ciblé (10% des compteurs) *Questions à poser aux usagers :* *Utilisation spécifique : piscine, arrosage jardin,... ? *Logement : taille ménage, n adultes, n enfants ? *Logement : régime habitat : temporaire, permanent ? *Hôtels, résidences de tourisme : n lits ? *Elevage : n unités de bétail ? *Bureaux : n places de travail ?

TABLEAU 7.2 – Données à collecter pour le monitoring des usages de l'eau potable.

A partir de cette typologie de régimes d'apports, la reconstruction du régime de distribution est possible via la méthode des analogues, en prenant les régimes comme patrons et en les multipliant par leur apport moyen interannuel par unité (par lit, logement, etc) et par le nombre d'unités du territoire, sans oublier d'ajouter le pourcentage de pertes à la distribution. Cette reconstruction de la distribution peut ensuite être validée en la comparant avec les cumuls d'apports de l'échantillon exhaustif ou directement par la distribution mesurée. Finalement, la distribution estimée par la méthode des analogues peut servir à reconstruire le régime des prélèvements en y ajoutant le pourcentage de pertes à l'adduction. Ces prélèvements modélisés peuvent alors être mis en regard des régimes de ressource pour effectuer un bilan de l'eau du territoire.

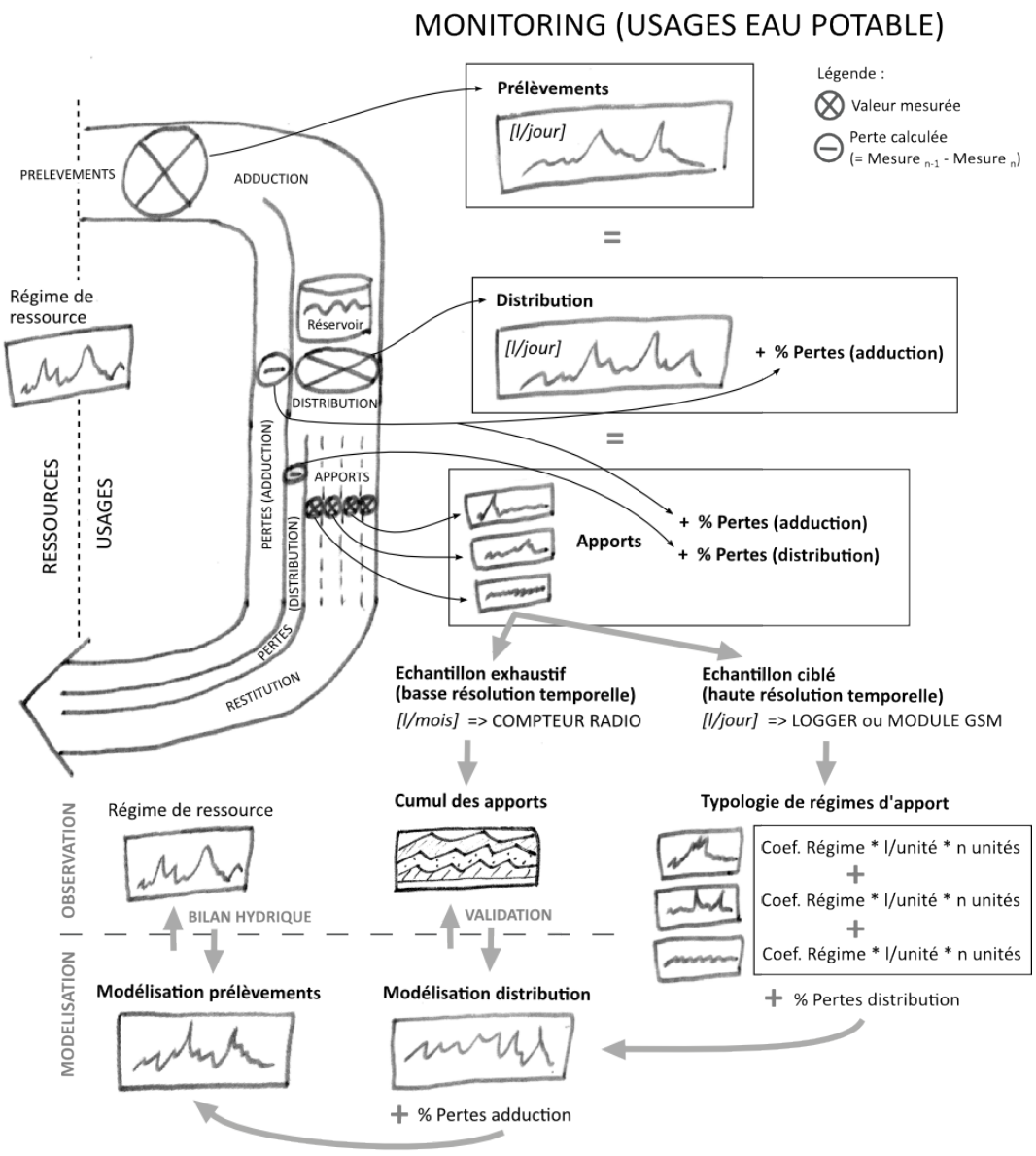


FIGURE 7.3 – Schéma de mis en oeuvre du monitoring recommandé pour les usages de l'eau potable.

Monitoring de l'irrigation

Le monitoring idéal de l'irrigation (Fig. 7.4 et Tableau 7.3) passe par un compromis entre la récolte de données quantitatives et qualitatives. Puisque l'installation de compteurs pour mesurer les apports au niveau de la parcelle pour la totalité des usagers irrigants est difficilement envisageable, je propose, comme pour l'eau potable, d'effectuer un échantillonnage ciblé pour les mesures à ce niveau du cycle d'usage. Ces dernières pourront ensuite être complétées par des données qualitatives, via des entretiens auprès des usagers qui peuvent, eux, être réalisés de manière exhaustive (100 % des usagers).

Le comptage de toutes les étapes mesurables du cycle d'usage (prélèvements, distribution, apports, irrigation effective) est donc effectué en choisissant le niveau d'échantillonnage (exhaustif ou ciblé). Ces données sont ensuite complétées par la modélisation des besoins des plantes et les méthodes empiriques d'estimation des apports, basées sur les entretiens exhaustifs. Les prélèvements et la distribution sont mesurés à pas de temps journalier (type compteur online). Les apports sont mesurés sur un échantillon ciblé de parcelles avec des compteurs radio, à pas de temps hebdomadaire. L'estimation des pertes d'irrigation est faite via un échantillon de pluviomètres répartis sur des parcelles ciblées, ce qui permet de calculer la proportion entre l'irrigation effective et les pertes d'irrigation dues au système d'arrosage.

	Prélèvement	**Distribution**	**Apport**	**Irrigation effective**
Données quantitatives (compteurs)	*1 mesure/jour* compteur online	*1 mesure/jour* compteur online	- Echantillon ciblé : compteurs radio (10% des parcelles) *1 mesure/semaine*	- Echantillon ciblé : pluviomètres (10% des parcelles) *1-2 mesures ponctuelles*
Données qualitatives (entretiens)			- Interroger tous les irrigants *Questions à poser :* *Irrigue, oui-non ? *Arrosage diffère selon parcelle ? *Fréquence d'arrosage ? *Durée/volume par arrosage ? *Influence année 'sèche' ? *Arrosage : critères de décision ? *Tarification, règles, calendrier ?	
	Besoin des plantes		**Apports**	
Modèle agro-climatique	Cropwat Weap-Mabia			
Méthode d'estimation			Méthode empirique, selon les pratiques observées (entretiens)	

TABLEAU 7.3 – Données à collecter pour le monitoring de l'irrigation.

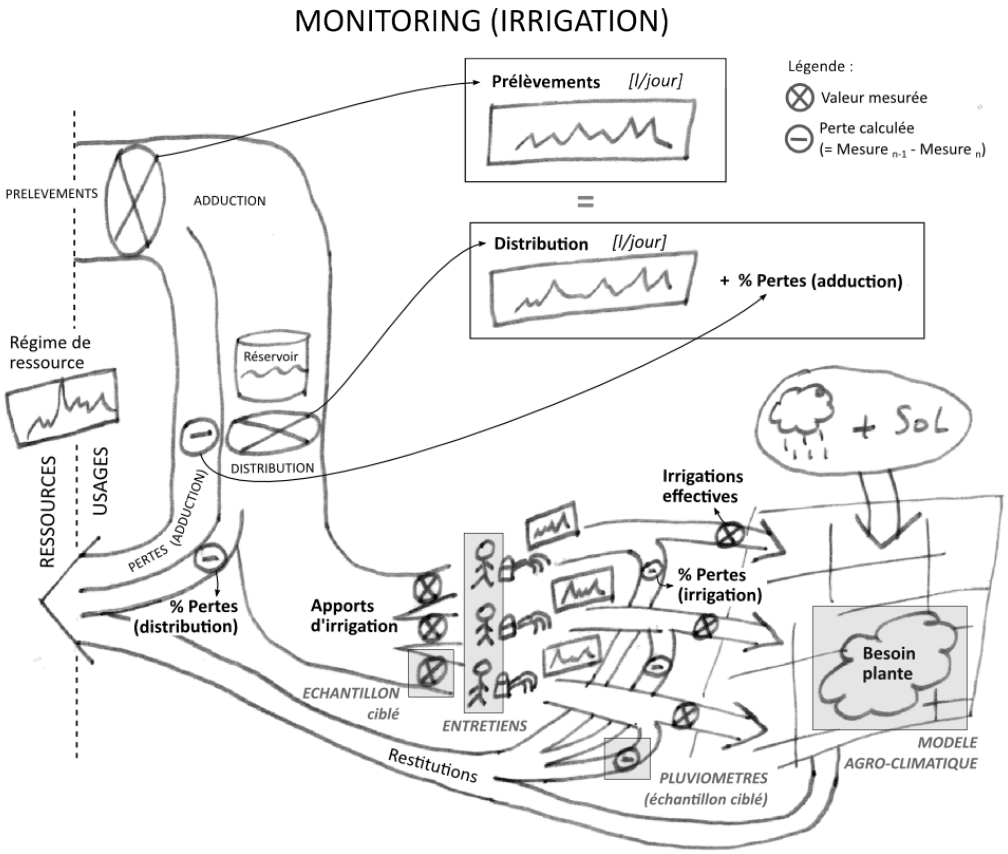


FIGURE 7.4 – Schéma de mis en oeuvre du monitoring recommandé pour l'irrigation.

7.3 Perspectives

La méthodologie de ce travail comporte évidemment certaines limites, qui ouvrent la voie vers plusieurs perspectives de recherche.

Tout d'abord, l'échantillon ciblé pour la mesure des apports d'eau potable à Megève pourrait être plus étendu pour arriver à une meilleure représentativité des régimes d'usage et produire une meilleure reconstruction de la distribution, en termes de saisonalité et de volumes. Il serait toutefois intéressant de valoriser les données récoltées en récupérant les caractéristiques des usagers et de l'habitat pour pouvoir faire des catégories d'usage comme cela a été fait à Montana. Toujours au sujet de l'eau potable, les données d'apport de l'hôtel échantillonné à Montana et couplées aux nombre de nuitées (obtenues via les taxes de séjour) mériteraient d'être valorisées.

Ensuite, les instruments de mesure ne sont jamais à l'abris de pannes techniques. Et ces pannes ne sont généralement pas à attribuer au malfonctionnement des instruments, mais sont le plus souvent dues à une mauvaise estimation de leur contexte de fonctionnement. Par exemple, la turbine de la sonde débitmètre de Montana n'est pas conçue à la base par le fabricant pour mesurer dans des conditions où l'eau présente des matières en suspension, comme c'est le cas dans le réseau d'irrigation de Montana. C'est pourquoi le filtre de la turbine s'est bouché à plusieurs reprises. Il a finalement dû être remplacé par un filtre de plus

grosse capacité. A Megève également, les conditions d'humidité dans lesquelles étaient installées les loggers étaient un peu plus sévères que celles prévues par le fabricant. C'est en voyant certains loggers tomber en panne que j'ai au fur et à mesure adapté la protection des boîtiers contre la condensation.

En ce qui concerne la mesure de densité d'usage de l'eau potable des habitats collectifs (en litres par surface cadastrale), il serait peut-être plus juste de standardiser également par rapport au nombre de logements, pour rendre compte de la densité d'habitat. Il faudrait donc plutôt compter en termes de litres par logement, par surface cadastrale, ce qui permettrait de donner des valeurs en mm par 'équivalent 1 logement'. Ces valeurs seraient toujours comparables avec les densités d'irrigation en mm. En outre, il serait très intéressant de cartographier les densités de l'ensemble des usages du territoire, parcelle par parcelle (eau potable et irrigation). Dans le cas de Montana, cela nécessiterait cependant un échantillonnage plus exhaustif de l'irrigation à l'échelle des apports.

Cela étant dit, l'idéal reste toujours de pouvoir standardiser par habitant. Cet objectif serait une des principales perspectives de recherches futures. En effet, il reste toujours la question de l'estimation de la population temporaire, qui ressemble au problème du serpent qui se mort la queue car les distributions d'eau potable sont justement souvent utilisées comme proxi pour évaluer le remplissage des stations touristiques (COMETE 2014 ; LEROY 2015 ; BRANCHEREAU 2015). Dans notre cas, nous souhaiterions faire le chemin inverse : disposer des données de remplissage des stations touristiques pour estimer les distributions d'eau potable. De plus, l'idéal serait de disposer de ces données pour chaque logement. Quelques pistes de proxis existent pour l'estimation journalière du nombre d'occupants : le tonnage des ordures ménagères (REYNARD 2000b), les taxes de séjours (TAYLOR 1998 ; CHARLES-EDWARDS 2016), les ventes de billets de transport public (REYNARD 2000b) ou de remontées mécaniques (COMETE 2014) ou encore le trafic sur les réseaux de téléphonie mobile (SILM et AHAS 2010 ; DEVILLE et al. 2014).

La question de la confidentialité des données et de la protection de la vie privée reste également une problématique très délicate pour l'étude des usages à l'échelle des acteurs. Cela limite la diffusion des résultats, comme par exemple la cartographie des apports en eau potable par bâtiment, qui est très parlante, mais difficile à publier. Cela pose problème également lors de la construction des échantillons, pour la recherche de volontaires qui acceptent que l'on mesure leurs usages à de tels niveaux de précision. Une solution est l'anonymisation des données, mais elle a ses limites lorsque les résultats sont cartographiés et qu'il est possible d'identifier les propriétaires.

En ce qui concerne l'irrigation, il serait intéressant de pousser plus loin la démarche d'étude des pratiques d'arrosage, en faisant un plus grand nombre d'entretiens ou en mettant en place des approches anthropologiques, comme l'observation directe et participante (MALINOWSKI 1963 ; FERNANDEZ 2015 ; BETRISEY et al. 2016) en suivant le travail des irrigants au jour le jour. Ce type d'approche permettrait aussi d'aborder la thématique des pratiques d'usage et des déterminants de la demande en eau potable (CORBELLA et PUJOL 2009 ; MONTGINOUL 2013), qui n'a pas pu réellement être abordée sur le terrain dans ce travail. Des entretiens ciblés d'usagers permettraient d'expliquer et de documenter les régimes d'apports en eau potable. L'estimation du besoin d'irrigation des plantes pourrait en outre être complétée en faisant tourner le modèle WEAP-MABIA (YATES et al. 2005 ; JABLOUN et

SAHLI 2012) sur les années où l'on dispose des données observées (2015-2017), ou en utilisant des modèles agro-climatiques plus spécialisés, telle la méthode WaLIS (CELETTE et al. 2010). Le modèle WaLIS ne produit cependant pas directement des valeurs de besoin en eau de la vigne, mais décrit l'évolution de la teneur en eau du sol (BONVIN 2017).

Pour ajouter une perspective allant dans la direction des sciences humaines et économiques, le cas du "grand" chalet échantillonné à Megève a montré que le public des stations touristiques huppées ne se soucie probablement pas de sa facture d'eau, ni de la quantité d'eau qu'il utilise. Il serait donc intéressant de creuser la question des pratiques d'usages de l'eau potable et de l'effet incitatif du prix de l'eau, dans la même lignée que les travaux de MONTGINOUL et al. (2015), complétant ainsi le monitoring des usages par un volet économique.

Bibliographie

AGENDA21 (2011). *Gestion par bassin versant, idées directrices pour une gestion intégrée des eaux en Suisse*. Agenda 21 pour l'eau, Berne.

AGUILERA-KLINK, F., E. PEREZ-MORIANA, et J. SANCHEZ-GARCIA (2000). « The social construction of scarcity : the case of water in Tenerife (Canary Islands) ». *Ecological Economics* 34.2, p. 233–245.

ALCAMO, J., P. DÖLL, T. HENRICHS, F KASPAR, et al. (2003). « Global estimates of water withdrawals and availability under current and future "business-as-usual" conditions ». *Hydrological Sciences Journal* 48, p. 339–348.

ALCAMO, J., M. FLÖRKE, et M. MÄRKER (2007). « Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes ». *Hydrological Sciences Journal* 52.2, p. 247–275.

ALLEN, R. G., Luis S. PEREIRA, Dirk RAES, et Martin SMITH (1998). *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. 56. Food et Agriculture Organisation (FAO), Rome.

AMIGUES, J.-P. (2012). « Les services écosystémiques : une nouvelle clé de négociation des politiques publiques ». *Innovations Agronomiques* 23, p. 85–94.

ARBUÉS, F., M. A. GARCÍA-V, et R. MARTÍNEZ-E (2003). « Estimation of residential water demand : a state-of-the-art review ». *Journal of Socio-Economics* 32, p. 81–102.

ARCALPIN (2008). *Plan directeur intercommunal EAU*. Rapp. tech. Association des Communes de Crans-Montana.

ARCALPIN (2010). *Plan de gestion des terres agricoles, présentation au conseil communal de Montana*. Rapp. tech. Arcalpin.

ARCALPIN (2014). *Améliorations structurelles : Irrigation*. Rapp. tech. Commune de Montana.

AUVERGNE-RHÔNE-ALPES, Région (2018). « Etude sur l'inventaire topographique de la ville de Megève. » [en ligne]
URL : https ://www.patrimoine.rhonealpes.fr/dossier/presentation-de-l-aire-d-etude/1deeeccc-d1f8-4ed1-aab4-897dff24fce5.

BABEL, M.S., A. DAS GUPTA, et P. PRADHAN (2007). « A multivariate econometric approach for domestic water demand modeling : an application to Kathmandu, Nepal ». *Water Resources Management* 21, p. 573–589.

BADOUX, H., E.G. BONNARD, et M. BURRI (1959). *Atlas géologique de la Suisse. Feuille 35, St- Léonard.* Notice explicative, Commission géologique suisse, Berne.

BAKKER, K. (2012). « Water security : research challenges and opportunities ». *Science* 337, p. 914–915.

BALSEINTE, R. (1959). « Megève ou la transformation d'une agglomération montagnarde par les sports d'hiver ». *Revue de Geographie Alpine* 47.2, p. 131–224.

BARBIER, R. et M. MONTGINOUL (2013). « Avant-propos : 120 m3, le consommateur d'eau en question ». *Sciences Eaux et Territoires* 10, p. 2–3.

BARRAQUÉ, B., L. ISNARD, M. MONTIGNOUL, J.-D. RINAUDO, et al. (2011). « Baisse des consommations d'eau potable et développement durable ». *Annales des Mines - Responsabilité et environnement* 3.63, p. 102–108.

BEAL, C. D., R. A. STEWART, et K. FIELDING (2013). « A novel mixed method smart metering approach to reconciling differences between perceived and actual residential end use water consumption ». *Journal of Cleaner Production* 60, p. 116–128.

BEITONE, A., C. DOLLO, J.-P. GUIDONI, et A. LEGARDEZ (1995). *Dictionnaire des sciences économiques*. Paris : Armand Colin, 376p.

BENISTON, M. et M. STOFFEL (2013). « Assessing the impacts of climatic change on mountain water resources ». *Science of the Total Environment* 493, p. 1129–1137.

BESSIS, R. et M. ADRIAN (2000). « Alimentation hydrique de la vigne : un facteur de l'expression du terroir ». *Progrès Agricole et Viticole* 117.15-16, p. 345–350.

BETRISEY, F., C. MAGER, et S. RIST (2016). « Local views and structural determinants of poverty alleviation through paymentsfor environmental services : Bolivian insights ». *World Development Perspectives* 1, p. 6–11.

BISWAS, A.K. (2008). « Integrated Water Resources Management : Is It Working ? » *Water Resources Development* 24.1, p. 5–22.

BLANC, P. et B. SCHÄDLER (2013). *L'eau en Suisse - un apercu*. Commission suisse d'hydrologie (CHy), Berne, 28p.

BLOESCH, B. et O. VIRET (2008). « Stades phénologiques repères de la vigne ». *Revue suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture* 40.6, p. 1–4.

BONINO, J. et A. ELAPHOS (2008). *Monographie Megève*. 28p.

BONRIPOSI, M. (2013). « Analyse systémique et prospective des usages de l'eau dans la région de Crans-Montana-Sierre (Suisse) ». Thèse de doct. Université de Lausanne, Institut de géographie et durabilité.

BONVIN, B. (2017). *Gestion de l'irrigation : simulation du besoin en eau de la vigne et de la teneur en eau du sol du vignoble de Corin (Valais, CH) à l'aide des modèles agronomiques Cropwat et WaLIS*. Travail de Bachelor en Géographie, Université de Fribourg.

BOS, J.J. et R.R. BROWN (2012). « Governance experimentation and factors of success in socio-technical transitions in the urban water sector ». *Technological Forecasting and Social Change* 79, p. 1340–1353.

BOUËT, M. (1985). *Climat et météorologie de la Suisse romande*. Lausanne : Payot, 172p.

BOYER, M. (1999). *Le tourisme de l'an 2000*. Lyon : Presses universitaires de Lyon, Lyon, 265 p.

BRANCHEREAU, J. (2015). *Rapport annuel sur le prix et la qualité du service public de l'eau potable*. Rapp. tech. Municipalité de Megève.

BRÉTHAUT, C. (2012). « Analyse comparée de régimes institutionnels de gestion des réseaux urbains de l'eau en station touristique de montagne. Les cas de Crans-Montana (Suisse) et de Morzine-Avoriaz (France) ». Thèse de doct. Université de Lausanne et Institut Universitaire Kurt Bösch.

BUCHS, A. (2012). « Observer, caractériser et comprendre la pénurie en eau. Une approche institutionnaliste de l'évolution du mode d'usage de l'eau en Espagne et au Maroc. » Thèse de doct. Université de Grenoble.

BUCHS, A. (2016). *La pénurie en eau est-elle inéluctable ? Une approche institutionnaliste de l'évolution du mode d'usage de l'eau en Espagne et au Maroc*. Ecopolis. T. 25. Peter Lang, Bruxelles, 331p.

BUCHS, A. et O. PETIT (2015). « L'eau : un objet économique complexe ». In : *L'eau à découvert*. Sous la dir. d'A. EUZEN, C. JEANDEL, et R. MOSSERI. CNRS Editions, Paris, p. 274–275.

BURRI, M. (1997). « Géologie récente de Finges et de ses environs (VS) ». *Bulletin de la Murithienne* 115, p. 5–27.

BURT, C. M., A. J. CLEMMENS, T. S. STRELKOFF, K. H. SOLOMON, et al. (1997). « Irrigation Performance Measures : Efficiency and Uniformity ». *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 123.3, p. 423–442.

BUYTAERT, W. et B. de BIÈVRE (2012). « Water for cities : the impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes ». *Water Resources Research* 48.W08503.

CALIANNO, M. (à soumettre). « Assessing the water demand seasonality in mountain tourist resorts with the water use regime approach ». *Revue de Geographie Alpine*.

CALIANNO, M., A. BUCHS, M. MILANO, et E. REYNARD (2014). « Réflexions sur la notion d'usage de l'eau ». *L'eau, aujourd'hui, demain : cahier spécial de la Lettre Aqueduc.info* 100.

CALIANNO, M., M. MILANO, et E. REYNARD (2018). « Monitoring Water Use Regimes and Density in a Tourist Mountain Territory ». *Water Resources Management* 32, p. 2783–2799.

CALIANNO, M. et E. REYNARD (2016). « Influence des facteurs climatiques sur la distribution de l'eau d'irrigation dans le vignoble de Montana (Suisse) ». In : *Climat et pollution de l'air. Actes du XXIXe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Sous la dir. de J.-M. FALLOT, D. JOLY, et N. BERNARD. Besançon, p. 439–444.

CALIANNO, M., E. REYNARD, M. MILANO, et A. BUCHS (2017). « Quantifier les usages de l'eau : une clarification terminologique et conceptuelle pour lever les confusions ». *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* 17.1, [en ligne]
URL : http ://journals.openedition.org/vertigo/18442.

CARBONNEAU, A. (1998). « Irrigation, vignoble et produits de la vigne : Chapitre IV ». In : *Traité d'irrigation*. Sous la dir. de Jean-Robert TIERCELIN. Editions TEC DOC Lavoisier, Paris, p. 257–276.

CELETTE, F., A. RIPOCHE, et C. GARY (2010). « WaLIS—A simple model to simulate water partitioning in a crop association : The example of an intercropped vineyard ». *Agricultural Water Management* 97.11, p. 1749–1759.

CHAMPAGNOL, F. (1984). *Eléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale*. Champagnol, Montpellier.

CHARLES-EDWARDS, E. (2016). « The Estimation of Temporary Populations in Australia ». In : *Demography for Planning and Policy : Australian Case Studies*. Sous la dir. de T. WILSON, E. CHARLES-EDWARDS, et M. BELL. T. 7. Applied Demography Series. Springer.

CHARLTON, M.B. et N.W. ARNELL (2011). « Adapting to climate change impacts on water resources in England - an assessment of draft Water Resources Management Plans. » *Global Environmental Change* 21, p. 238–248.

CHARNAY, B. (2010). « Pour une gestion intégrée des ressources en eau sur un territoire de montagne ». Thèse de doct. Université de Savoie.

COLLET, L., D. RUELLAND, V. BORRELL-ESTUPINA, A. DEZETTER, et al. (2015). « Water supply sustainability and adaptation strategies under anthropogenic and climatic changes of a mesoscale Mediterranean catchment ». *Science of the Total Environment* 536, p. 589–602.

COMETE (2014). *Tableau de bord économique hiver 2014/2015, Megève : état des réservations professionnelles.* Rapp. tech. COMETE.

COMMUNE-DE-MEGÈVE (2007). *Plan local d'urbanisme, rapport de présentation*. Rapp. tech. 224 pp.

CONNE, O. (1991). *La Contrée de Sierre, 1302-1914*. Sierre.

COOK, C. et K. BAKKER (2012). « Water security : debating an emerging paradigm ». *Global Environmental Change* 22, p. 94–102.

CORBELLA, H.M. et D.S. PUJOL (2009). « What lies behind domestic water use ? A review essay on the drivers of domestic water consumption ». *Boletin de la AGE* 50, p. 297–314.

CROOK, D.S. (1997). « Sustainable mountain irrigation ? The Bisses of the Valais, Switzerland. A holistic appraisal ». Thèse de doct. University of Huddersfield.

DEVILLE, P., C. LINARD, S. MARTIN, M. GILBERT, et al. (2014). « Dynamic population mapping using mobile phone data ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111.45, p. 15888–15893.

DIPNER, M., G. VOLKART, C. GUBSER, S EGGENBERG, et al. (2010). « Prairies et pâturages secs d'importance nationale. Aide à l'exécution de l'ordonnance sur les prairies sèches ». *L'environnement pratique* 1017, 83 p.

DOORENBOS, J. et W.O. PRUITT (1977). *Crop Water Requirements*. Irrigation and Drainage Paper 24. Rome : Food et Agriculture Organisation (FAO), 156p.

DORIOT GALOFARO, S. (2005). *Un siècle de tourisme à Crans-Montana*. Porte-Plumes, Ayer, 211p.

DUBUIS, P. (1994). « Bisse et conjoncture économique. Le cas du Valais au XIVe et XVe siècles ». In : *Actes du colloque international sur les bisses*. Sous la dir. d'Annales VALAISANNES. T. 2. 70. Sion, p. 39–46.

ERHARD-CASSEGRAIN, A. et J. MARGAT (1983). *Introduction à l'économie générale de l'eau*. Masson, Paris, 361p.

FABRE, J., D. RUELLAND, A. DEZETTER, et B. GROUILLET (2015). « Simulating past changes in the balance between water demand and availability and assessing their main drivers at the river basin scale ». *Hydrology and Earth System Sciences* 19, p. 1263–1285.

FABRE, J., D. RUELLAND, A. DEZETTER, et B. GROUILLET (2016). « Sustainability of water uses in managed hydrosystems : human- and climate-induced changes for the mid-21st century ». *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 20.8, p. 3129–3147.

FALKENMARK, M. (1995). « Coping with water scarcity under rapid population growth ». In : *Conference of the Southern African Development Community (SADC) Ministers*. Pretoria, 14p.

FALKENMARK, M. (2003). « Freshwater as shared between society and ecosystems : from divided approaches to integrated challenges ». *Philosophical Transaction of the Royal Society of London* 358.1440, p. 2037–2049.

FALKENMARK, M. et C. WIDSTRAND (1992). « Population and water resources : a delicate balance ». *Population Bulletin* 47.3, p. 112–118.

FAO (2018). « Base de données et logiciels : CropWat ». [en ligne]
URL : http ://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/fr/.

FAUNE ET PARCS QUÉBEC (1999). *Politique de débits réservés écologiques pour la protection du poisson et de ses habitats.* Direction de la faune et des habitats.

FERNANDEZ, M. (2015). « Les composantes du risque : une entrée par les acteurs et le conflit lors de la mise en place des solutions. Le cas de Los Chorros, Guatemala ». Thèse de doct. Université de Lausanne, 385p.

FERNANDEZ, S. et J. TROTTIER (2012). « La longue construction du débit d'étiage : l'odyssée d'une métamorphose (la gestion des cours d'eau du bassin Adour-Garonne) ». In : *Repenser la nature dans les campagnes d'aujourd'hui (ressources, institutions, habitants)*. Sous la dir. de F. PAPY, N. MAHIEUR, et C. FERRAULT. Quae. Paris, p. 153–167.

FINGER, D., A. HUGENTOBLER, M. HÜSS, A. VOINESCO, et al. (2013). « Identification of glacial melt water runoff in a karstic environment and its implication for present and future water availability. » *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 10.3, p. 2743–2788.

FREIBURGHAUS, M. (2012). « Les résultats statistiques 2010 sur les distributeurs d'eau suisses ». *Aqua and Gas* 3, p. 54–59.

FUHRER, J. et K. JASPER (2012). « Demand and supply of water for agriculture : influence of topography and climate in pre-alpine, mesoscale catchments ». *Natural Resources* 3, p. 145–155.

GARCIA, C. et J. SERVERA (2003). « Impacts of tourism development on water demand and beach degradation on the island of Mallorca (Spain) ». *Geografiska Annaler* 85.3-4, p. 287–300.

GARGANO, R., C. TRICARICO, F. GRANATA, S. SANTOPIETRO, et al. (2017). « Probabilistic Models for the Peak Residential Water Demand ». *Water* 9.6, p. 417.

GHIOTTI, S. (2007). *Les territoires de l'eau. Gestion et développement en France.* Espaces et Milieux. Editions CNRS, Paris, 246p.

GIDON, M. (2018). *Figure extraite du site web GEOL-ALP*. [en ligne]
URL : http ://www.geol-alp.com.

GIVONE, P. (2000). « L'évaluation du cycle de l'eau et des usages ». In : *Les conflits d'usage en environnement : le cas de l'eau*. CNRS. Ecole de Physique des Houches : Publication de la MSH-Alpes, DRH-Formation, p. 19–36.

GLEICK, P.H. (1996). « Basic water requirements for human activities : meeting basic needs ». *Water International* 21, p. 83–92.

GOSLING, S.N. et N.W. ARNELL (2013). « A global assessment of the impact of climate change on water scarcity ». *Climatic Change* 134, p. 371–385.

GOSSLING, S. (2002). « The consequences of tourism for sustainable water use on a tropical island : Zanzibar, Tanzania ». *Journal of Environmental Management* 61, p. 179–191.

GÖSSLING, S., P. PEETERS, C. M. HALL, J.-P. CERON, et al. (2012). « Tourism and water use : Supply, demand, and security. An international review. » *Tourism Management* 33, p. 1–15.

GROUILLET, B., J. FABRE, D. RUELLAND, et A. DEZETTER (2015). « Historical reconstruction and 2050 projections of water demand under anthropogenic and climate changes in two contrasted Mediterranean catchments ». *Journal of Hydrology* 522, p. 684–696.

GUERMAZI, E., M. MILANO, E. REYNARD, et M. ZAIRI (2018). « Impact of climate change and anthropogenic pressure on the groundwater resources in arid environment ». *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*.

GURUNG, T.R., R.A. STEWART, C.D. BEAL, et A.K. SHARMA (2016). « Smart meter enabled informatics for economically efficient diversified water supply infrastructure planning ». *Journal of Cleaner Production* 135, p. 1023–1033.

GWP (2000). « Integrated Water Resources Management ». In : *TEC Background Papers*. T. 4. Global Water Partnership. Stockholm.

HAQUE, M.M., A. de SOUZA, et A. RAHMAN (2017). « Water Demand Modelling Using Independent Component Regression Technique ». *Water Resources Management* 31.1, p. 299–312.

HILL-CLARVIS, M., S. FATICHI, A. ALLAN, J. FUHRER, et al. (2014). « Governing and managing water resources under changing hydro-climatic contexts : The case of the upper Rhone basin ». *Environmental Science and Policy*.

HOEKSTRA, A., A. CHAPAGAIN, M. ALDAYA, et M. MEKONNEN (2011). *The water footprint assessment manual : setting the global standard*. Earthscan. London.

HOWARD, G. et J. BARTRAM (2003). *Domestic water quantity, service level and health*. OMS, Genève, 33 p.

HOWELL, T. A. (2003). « Irrigation efficiency ». *Encyclopedia of Water Science*, p. 467–472.

ICID (2002). *Multilingual technical dictionary on irrigation and drainage : English – French*. International Commission on Irrigation et Drainage (ICID).

IGN (1987). *Résultats du deuxième inventaire forestier (tome 1), Département de la Haute-Savoie*. Rapp. tech. Ministère de l'agriculture et de la forêt, direction de l'espace rural et de la forêt - IGN.

INSEE (2016). *RP2014 (géographie au 01/01/2016) exploitations principale*.

JABLOUN, M. et A. SAHLI (2012). *WEAP-MABIA Tutorial*.

KENT, M., R. NEWNHAM, et S. ESSEX (2002). « Tourism and sustainable water supply in Mallorca : a geographical analysis ». *Applied Geography* 22.4, p. 351–374.

KLUG, H., Z. DABIRI, B. HOCHWIMMER, et P. ZALAVARI (2012). « Assessing drinking water consumption by inhabitants and tourists in the Alps using a WebGIS for information distribution ». *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management* 8.1-2, p. 50–70.

KOHLI, A., K. FRENKEN, et C. SPOTTORNO (2012). *Disambiguation of water statistics*. AQUASTAT report [en ligne] URL : http ://www.fao.org/3/a-bc816e.pdf. FAO, Rome, 7 p.

KOLUPAILA, S. et M. PARDÉ (1933). « Le régime des cours d'eau de l'Europe orientale ». *Revue de Geographie Alpine* 21.4, p. 651–748.

KÖPLIN, N., B. SCHÄDLER, et R. WEINGARTNER (2012). « Relating climate change signals and physiographic catchment properties to clustered hydrological response types ». *Hydrology and Earth System Sciences* 16, p. 2267–2283.

LEROY, E. (2015). « Proposition d'interface Science-Société pour la gestion intégrée de la ressource en eau dans un contexte de changements climatiques ». Thèse de doct. Université de Grenoble.

LETESSIER, I. et J. MARION (2007). *Etude géopédologique des vignobles de Ollon, Corin, Loc. Partie spécifique au secteur.* Rapp. tech. Bureau d'étude Sigales, Interprofession de la Vigne et du Vin du Valais et Office de la viticulture du Canton du Valais.

LINTON, J. et J. BUDDS (2014). « The hydrosocial cycle : defining and mobilizing a relational-dialectical approach to water ». *Geoforum* 57, p. 170–180.

LOUBIER, S., M .CAMPARDON, et S. MORARDET (2013). « L'irrigation diminue-t-elle en France ? Premiers enseignements tirés du recensement agricole de 2010 ». *Sciences Eaux et Territoires* 11, p. 12–19.

MABILLARD, G. (1997). *Le bisse du Rho et le tunnel du Mont Lachaux*. Levé de terrain, non publié. Université de Lausanne, Institut de Géographie.

MAGNIER, E. (2013). « Neige artificielle et ressource en eau en moyenne montagne : impacts sur l'hydrosystème. Les exemples d'Avoriaz (France) et de Champéry (Suisse) ». Thèse de doct. Université Paris IV Sorbonne et University of Lausanne.

MAIRE, R. (1990). « La haute montagne calcaire ». *Karstologia Mémoires* 3.

MALINOWSKI, B. (1963). « Les argonautes du Pacifique occidental ». *Revue Française de Sociologie* 4.2, p. 225.

MARCH, H., M. HERNANDEZ, et D. SAURI (2015). « Assessing domestic water use habits for more effective water awareness campaigns during drought periods : A case study in Alicante, eastern Spain ». *Natural Hazards and Earth System Sciences* 15.5, p. 963–972.

MARGAT, J. et H. COTTEZ (1995). « Usage de l'eau ». In : *Dictionnaire des Sciences Hydrologiques*. Commission de terminologie, Comité National Français des Sciences Hydrologiques.

MARNEZY, A. (2008). « Les barrages alpins ». *Revue de Geographie Alpine* 96.1, p. 92–102.

MÉTÉOSUISSE (2015). *Rapport climatologique 2015*. Rapp. tech. MétéoSuisse.

MÉTÉOSUISSE (2016). *Rapport climatologique 2016*. Rapp. tech. MétéoSuisse.

MÉTÉOSUISSE (2017). *Rapport climatologique 2017*. Rapp. tech. MétéoSuisse.

MILANO, M. (2012). « Changements globaux en Méditerranée : impacts sur le stress hydrique et la capacité à satisfaire les demandes en eau ». Thèse de doct. Université de Montpellier 2.

MILANO, M., N. CHÈVRE, et E. REYNARD (2017). « Assessing watercourse quality : challenges in implementing European and Swiss legal frameworks ». *Environmental Science and Pollution Research* 25.7, p. 1–19.

MILANO, M., E. REYNARD, N. KÖPLIN, et R. WEINGARTNER (2015). « Climatic and anthropogenic changes in western Switzerland : impacts on water stress ». *Science of the Total Environment* 536, p. 12–24.

MILANO, M., D. RUELLAND, A. DEZETTER, J. FABRE, et al. (2013a). « Modeling the current and future capacity of water resources to meet water demands in the Ebro basin ». *Journal of Hydrology* 500, p. 114–126.

MILANO, M., D. RUELLAND, S. FERNANDEZ, A. DEZETTER, et al. (2012). « Facing climatic and anthropogenic changes in the Mediterranean basin : What will be the medium-term impact on water stress ? » *Comptes Rendus Geoscience* 344.9, p. 432–440.

MILANO, M., D. RUELLAND, S. FERNANDEZ, A. DEZETTER, et al. (2013b). « Current state of Mediterranean water resources and future trends under climatic and anthropogenic changes ». *Hydrological Sciences Journal* 58.3, p. 498–518.

MILLINGTON, N. (2018). « Producing water scarcity in São Paulo, Brazil : The 2014-2015 water crisis and the binding politics of infrastructure ». *Political Geography* 65, p. 26–34.

MONTANA, Commune (1987). *Règlement d'irrigation du vignoble, prairies et jardins*. Rapp. tech. Commune de Montana.

MONTEITH, J.L. (1981). « Evaporation and surface temperature ». *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 107, p. 1–27.

MONTGINOUL, M. (1998). « Instruments économiques de gestion de l'eau ». *Annales des Ponts et Chaussées* 87, p. 47–54.

MONTGINOUL, M. (2013). « La consommation d'eau en France : historique, tendances contemporaines, déterminants ». *Sciences Eaux et Territoires* 10, p. 68–72.

MONTGINOUL, M., S. LOUBIER, B. BARRAQUÉ, et A. ANGENAIS (2015). « Water Pricing in France : Toward More Incentives to Conserve Water ». In : *Water Pricing Experiences and Innovations*. Sous la dir. d'A. DINAR, V. POCHAT, et J. ALBIAC-MURILLO. T. 9. Global Issues in Water Policy. Springer.

MORARDET, S., J.-C. MAILHOL, A. VIDAL, P. GARIN, et al. (1998). « Sécheresse et demande en eau d'irrigation : éléments de réflexion ». *Ingénieries - EAT* 13, p. 15–28.

MOROTE, A.-F., M. HERNANDEZ, et A.-M. RICO (2016). « Causes of Domestic Water Consumption Trends in the City of Alicante : Exploring the Links between the Housing Bubble, the Types of Housing and the Socio-Economic Factors ». *Water* 8.374, p. 1–18.

MUNIZ-MIRANDA, G. (2017). « Gestion intégrée des ressources en eau dans les pays fédéraux : les cas suisse et brésilien ». Thèse de doct. Lausanne : Université de Lausanne, 390p.

MUSY, A., C. HIGY, et E. REYNARD (2014). *Hydrologie 1 Une science de la nature, Une gestion sociétale*. 2e éd. T. 1. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 516p.

NARATH, S. et C. BRÉTHAUT (2016). « Coordination Between Institutional Resource Regimes as a Condition for Sustainable Management of Alpine Touristic Resources ». *Journal of alpine research* 104.3.

NAZEMI, A. et H.S. WHEATER (2015). « On inclusion of water resource management in Earth system models - Part 2 : Representation of water supply and allocation and opportunities for improved modeling ». *Hydrology and Earth System Sciences* 19.1, p. 63–90.

OFEFP (2000). *Débits résiduels convenables – comment peuvent-ils être déterminés ?* Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage. Berne ,142p.

OFS (2016). *Indicateur d'environnement – Consommation d'eau potable*. Office fédéral de la statistique. Berne.

ONDE, H. (1953). « Le château d'eau helvétique et valaisan ». *Bulletin de la Murithienne* 70, p. 1–8.

ONEMA (2017). *Fiche pédagogique : le cycle de l'eau*. Office national de l'eau et des milieux aquatiques.

PACCARD, P. (2010). « Gestion durable de l'eau en montagne : le cas de la production de neige en stations de sports d'hiver ». Thèse de doct. Université de Savoie.

PAYAN, J.-Ch et E. SALANÇON (2002). « Définition de la contrainte hydrique : incidences sur les caractéristiques de la vendange ». In : *Les Entretiens Viti-Vinicoles Rhône- Méditerranée*. Gruissan, p. 6–9.

PFISTER, S., A. KOEHLER, et S. HELLWEG (2009). « Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA ». *Environmental Science and Technology* 43, p. 4098–4104.

POLLA, M. (2016). *Impacts climatiques et anthropiques sur les ressources en eau du bassin versant du Talent (Vaud)*.

PUECH, D. et J.-M. BOISSON (1995). « Eau-ressource et eau-milieu. Une interdépendance croissante impliquant une évolution des modalités de gestion ». *Les cahiers de l'économie méridionale* 1, p. 5–47.

RENAUD, E., J. PILLOT, A. AUCKENTHALER, et C. AUBRUN (2014). *Réduction des pertes d'eau des réseaux de distribution d'eau potable, guide pour l'élaboration du plan d'actions de l'ONEMA (décret 2012-97 du 27 janvier 2012)*. 170p.

REY, Y. (2009). « Nouveau concept de gestion des eaux de la région de Crans-Montana ». Travail de MAS en ingénierie hydraulique. Laboratoire de Constructions Hydrauliques : EPFL.

REY-FAVRE-BONVIN-CORDONNIER (1984). *Etude de faisabilité aménagement hydraulique du vallon de l'Ertentse, Crans-Montana*. Rapp. tech. Consortium d'ingénieurs.

REYNARD, E. (2000a). « Cadre institutionnel et gestion des ressources en eau dans les Alpes : deux études de cas dans des stations touristiques valaisannes ». *Revue Suisse de Sciences Politiques* 6.1, p. 53–85.

REYNARD, E. (2000b). « Gestion patrimoniale et intégrée des ressources en eau dans les stations touristiques de montagne, les cas de Crans-Montana-Aminona et Nendaz (Valais) ». Thèse de doct. Université de Lausanne, Institut de Géographie.

REYNARD, E. (2001). « Aménagement du territoire et gestion de l'eau dans les stations touristiques alpines. Le cas de Crans-Montana-Aminona (Valais, Suisse) ». *Revue de Geographie Alpine* 89.3, p. 7–19.

REYNARD, E. (2005). « La trame naturelle : un plateau qui n'en est pas un ! » In : *Un siècle de tourisme à Crans-Montana*. Sous la dir. de Sylvie DORIOT-GALOFARO. Porte-Plumes, Ayer, p. 24–33.

REYNARD, E. (2008). « Transporter l'eau : regards croisés sur les réseaux urbains et ruraux de l'eau en Suisse ». *Flux* 2-3.72, p. 27–38.

REYNARD, E. (2014). « Projet MontanAqua : les principaux résultats ou comment communiquer avec les acteurs locaux ». *Aqua and Gas* 11, p. 50–57.

REYNARD, E. et M. BAUD (2002). « Les consortages d'irrigation par les bisses en Valais (Suisse). Un système de gestion en mutation entre agriculture, tourisme et transformations du paysage ». In : *Histoires d'une eau partagée. Provence, Alpes, Pyrénées*. Sous la dir. d'O AUBRIOT et G JOLLY. Presses de l'Université de Provence, p. 187–212.

REYNARD, E. et M. BONRIPOSI (2012). « Water use management in dry mountains of Switzerland. The case of Crans-Montana-Sierre area ». In : *The impact of urbanisation, industrial, agricultural and forest technologies on the natural environment*. Sous la dir. de M NEMÉNYI et H BALINT. Nyugat-magyarorszagi Egyetem, p. 281–301.

REYNARD, E., M. BONRIPOSI, O. GRAEFE, C. HOMEWOOD, et al. (2014). « Interdisciplinary assessment of complex regional water systems and their future evolution : how socioeconomic drivers can matter more than climate ». *WIREs Water* 1.4, p. 413–426.

RICO-AMOROS, A. M., J. OLCINA-CANTOS, et D. SAURI (2009). « Tourist land use patterns and water demand : Evidence from the Western Mediterranean ». *Land Use Policy* 26.2, p. 493–501.

RINAUDO, J.-D. (2013). « Prévoir la demande en eau potable : une comparaison des méthodes utilisées en France et en Californie ». *Sciences Eaux et Territoires* 10.78-85.

RINAUDO, J.-D. (2015). « Long-Term Water Demand Forecasting ». In : *Understanding and managing urban water in transition*. Sous la dir. de Q. Grafton et AL. Global Issues in Water Policy 15. Springer, p. 239–268.

ROBBINS, L. (1935). *An essay in the nature and significance of economic science*. Macmillan, Londres, 160p.

ROMANO, G., N. SALVATI, et A. GUERRINI (2016). « An empirical analysis of the determinants of water demand in Italy ». *Journal of Cleaner Production* 130, p. 74–81.

SAULNIER, G.-M., W. CASTAINGS, D. HOHENWALLNER, A. BRANCELJ, et al. (2011). *Monitoring and Modelling of Mountain Water Resources - a short guideline based on the results of Alp-Water-Scarce*. Rapp. tech. Alp-Water-Scarce (Interreg IV B, Alpine Space Programme, project 5-1-3-F).

SAUQUET, E. (2015). « R2D2 2050 : Risque, ressource en eau et gestion durable de la Durance en 2050 ». *RéférenceS, Direction de la recherche et de l'innovation (DRI) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD)*, p. 47–55.

SAX, M., J. SCHMUDE, et A. DINGELDEY (2016). « Water Demand in Tourism Facilities ». In : *Regional assessment of global change impacts*. Sous la dir. de W. MAUSER et M. PRASCH. Springer, p. 153–158.

SCA, Service Cantonal d'Agriculture du Valais (2017). « Les paiements directs ». [en ligne] URL : https ://www.vs.ch/web/sca/paiements-directs.

SCHÄDLER, B., P. BLANC, et D. VOLKEN (2012). *Impacts des changements climatiques sur les eaux et les ressources en eau. Rapport de synthèse du projet "Changement climatique et hydrologie en Suisse" (CCHydro)*. Rapp. tech. Office fédéral de l'environnement (OFEV).

SCHÜEPP, M. (1978). « Die Stellung der Schweiz im europäischen Klimaraum und Gesamtüberblick ». In : *Regionale Klimabeschreibung, 1. Teil : Gesamtübersicht, Westschweiz, Wallis, Jura und Juranordfuss sowie Mittelland*. T. 18. Serie Klimatologie der Schweiz. SMZ. Zürich, p. 1–42.

SHGN (1999). *Le débit d'étiage Q347. Etat de la question.* Service hydrologique et géologique national. Berne.

SHIKLOMANOV, I. A. (1998). *World water resources. A new appraisal and assessment for the 21st century.* UNESCO, Paris, 40p.

SILM, S. et R. AHAS (2010). « The seasonal variability of population in Estonian municipalities ». *Environment and Planning* 42, p. 2527–2546.

SOBOLL, A. et J. SCHMUDE (2011). « Simulating tourism water consumption under climate change conditions using agent-based modeling : the example of ski areas ». *Annals of the Association of American Geographers* 101.5, p. 1049–1066.

SPULBER, N. et A. SABBAGHI (1994). *Economics of water resources : from regulation to privatization*. Kluwer Academic Publishers, Boston-Dordrecht-London, 329p.

STEWART, R. A., R. WILLIS, D. GIURCO, Kriengsak PANUWATWANICH, et al. (2010). « Web-based knowledge management system : linking smart metering to the future of urban water planning ». *Australian Planner* 47.2, p. 66–74.

SWYNGEDOUW, E. (2009). « The political economy and political ecology of the hydro-social cycle ». *Journal of contemporary water research and education* 142, p. 56–60.

TAYLOR, J. (1998). « Measuring short-term population mobility among indigenous Australians : options and implication ». *Australian Geographer* 29.1, p. 125–137.

TEMPLIN, W. E., R. A. HERBERT, C. B. STAINAKER, M. HORN, et al. (1999). *National Handbook of Recommended Methods for Water Data Acquisition*. USGS. Office of Water Data Coordination. Chap. 11.

TENEVIA (2014). *Réalisation d'un « outil de modélisation du système naturel et des actions anthropiques », modélisation du potentiel hydroélectrique en fonction de scénarii d'évolution*. Rapp. tech. Projet Alpine Space Recharge Green.

UNWWAP (2015). « The United Nations World Water Development Report 2015 : Water for a Sustainable World ». In : United Nations World Water Assessment Program. UNESCO, Paris, 139 p.

VALLÈS-CASAS, M., H. MARCH, et D. SAURI (2017). « Examining the reduction in potable water consumption by households in Catalonia (Spain) : Structural and contingent factors ». *Applied Geography* 87, p. 234–244.

VANHAM, D., S. MILLINGER, H. PLIESSNIG, et W. RAUCH (2011). « Rasterised water demands : methodology for their assessment and possible applications ». *Water Resources Management* 25, p. 3301–3320.

VAN-LEUUWEN, C., R. RENARD, O. LERICHE, C. MOLOT, et al. (1998). « Le fonctionnement de 3 sols viticoles du Bordelais : conséquences sur la croissance et sur le potentiel œnologique du raisin en 1997 ». *Revue Française d'œnologie* 170, p. 28–32.

VIVIROLI, D., H. H. DÜRR, B. MESSERLI, M. MEYBECK, et al. (2007). « Mountains of the world, water towers for humanity : Typology, mapping, and global significance ». *Water Resources Research* 43.

VÖRÖSMARTY, C. J. (2000). « Global water resources : vulnerability from climate change and population growth ». *Science* 289, p. 284–288.

VÖRÖSMARTY, C. J., P. B. MCINTYRE, M. O. GESSNER, D. DUDGEON, et al. (2010). « Global threats to human water security and river biodiversity ». *Nature* 467, p. 555–561.

WADA, Y., L. P. H. VAN BEEK, D. VIVIROLI, H. H. DÜRR, et al. (2011). « Global monthly water stress : 2, water demand and severity of water stress ». *Water Resources Research* 47.7, W07518.

WEINGARTNER, R. et H. ASCHWANDEN (1992). « Régimes d'écoulement ». In : *Atlas hydrologique de la Suisse*. Service hydrologique et géologique national, Berne, 52 p.

WEINGARTNER, R., D. HERWEG, H LINIGER, S RIST, et al. (2010). « Water Scarcity in InnerAlpine Regions. Options for sustainable water use in the Crans-Montana-Sierre region (Valais) ». *Mountain Research Initiative Newsletter* 5, p. 13–15.

WEISSBRODT, B. (2014). « Du (bon) usage des chiffres de l'eau ». *Lettre Aqueduc.info du 6 mai 2014*.

YATES, D., J. SIEBER, D. PURKEY, et A. HUBERT-LEE (2005). « WEAP21 — a demand-, priority- and preference-driven Water Planning Model — part 1 : model characteristics ». *Water International* 30.4, p. 487–500.

ZHOU, S. L., T. A. MCMAHON, A. WALTON, et J. LEWIS (2002). « Forecasting operational demand for an urban water supply zone ». *Journal of Hydrology* 259.1-4, p. 189–202.

ZOUNGRANA, D. (2003). *Cours d'approvisionnement en eau potable*. Ecole inter-états d'ingénieurs de I'équipement rural, Ouagadougou, 143p.

ZUFFEREY, V. et F. MURISIER (2004). *Etude des terroirs viticoles vaudois : comportement de la vigne en fonction des conditions pédo-climatiques*. Rapp. tech. Agroscope Changins.