



UNIL | Université de Lausanne

Institut de géographie
et durabilité

Analyse systémique et prospective des usages de l'eau dans la région de Crans-Montana-Sierre (Suisse)

Mariano Bonriposi





UNIL | Université de Lausanne

Institut de géographie
et durabilité

Analyse systémique et prospective des usages de l'eau dans la région de Crans-Montana-Sierre (Suisse)

Thèse de doctorat

présentée à la Faculté des géosciences et de l'environnement de l'Université de
Lausanne, Institut de géographie et durabilité, par

Mariano Bonriposi

Titulaire d'un Master en sciences de l'atmosphère et du climat (ETH Zürich)

Jury

Président	Prof. Eric Verrecchia Vice-doyen à la recherche Faculté des géosciences et de l'environnement, Université de Lausanne
Directeur	Prof. Emmanuel Reynard Institut de géographie et durabilité, Université de Lausanne
Experts	Prof. Olivier Graefe Département des Géosciences, Unité de Géographie, Université de Fribourg
	Dr. Georges-Marie Saulnier Chargé de recherche CNRS, Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie
	Prof. René Veron Institut de géographie et durabilité, Université de Lausanne

Lausanne, le 14 novembre 2013



UNIL | Université de Lausanne
Décanat Géosciences et de l'Environnement
bâtiment Géopolis
CH-1015 Lausanne

IMPRIMATUR

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

Président de la séance publique :	M. le Professeur Eric Verrecchia
Président du colloque :	M. le Professeur Eric Verrecchia
Directeur de thèse :	M. le Professeur Emmanuel Reynard
Expert interne :	M. le Professeur René Véron
Expert externe :	M. le Professeur Olivier Graefe
Expert externe :	M. le Docteur Georges-Marie Saulnier

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

Monsieur Mariano BONRIPOSI

Titulaire d'un
Master in Atmospheric and Climate Science
Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich

intitulée

**ANALYSE SYSTEMATIQUE ET PROSPECTIVE DES
USAGES DE L'EAU DANS LA REGION DE CRANS-
MONTANA-SIERRE (SUISSE)**

Lausanne, le 09 septembre 2013

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



Professeur Eric Verrecchia, Vice-doyen

Impressum

Manière de citer cet ouvrage :

Bonriposi, M. (2013). *Analyse systémique et prospective des usages de l'eau dans la région de Crans-Montana-Sierre (Suisse)* (Géovisions n°43). Lausanne : Université, Institut de géographie et durabilité.

Directeur de la publication :

Christophe Lambiel

Photo de la page de couverture :

Vue sur la vallée du Rhône et le vignoble du coteau de Sierre depuis les hauts de la commune de Miège. Juillet 2010. Cliché : Mariano Bonriposi.

Mise en page et graphisme :

Mariano Bonriposi

Impression :

Multiprint SA
Avenue Beauregard 9
CH-1700 Fribourg

Publié par :

Institut de géographie et durabilité
Université de Lausanne
Géopolis
1015 Lausanne

www.unil.ch/igd

Publié avec le soutien de :

Fonds national suisse de la recherche scientifique (subvention n° 406140-125964).

*Je dédie ce travail et ma profonde gratitude à mes parents
pour l'éducation qu'ils m'ont prodiguée ; avec tous les moyens
et au prix de tous les sacrifices eus à mon égard.*

[...] *on peut regarder une pièce d'un puzzle pendant trois jours et croire tout savoir de sa configuration et de sa couleur sans avoir le moins du monde avancé : seule compte la possibilité de relier cette pièce à d'autres pièces [...]; seules les pièces rassemblées prendront un caractère lisible, prendront un sens : considérée isolément une pièce d'un puzzle ne veut rien dire ; elle est seulement question impossible, défi opaque ; mais à peine a-t-on réussi, au terme de plusieurs minutes d'essais et d'erreurs, ou en une demi-seconde prodigieusement inspirée, à la connecter à l'une de ses voisines, que la pièce disparaît, cesse d'exister en tant que pièce.*

Georges Perec, extrait du préambule de « La Vie mode d'emploi », 1978.

Table des matières

Table des figures	II
Liste des tableaux	IV
Avant-propos	VII
Remerciements	VIII
Résumé	X
Abstract	XI
Zusammenfassung	XII
Riassunto	XIII
Abréviations	XIV
Premier chapitre : Introduction	17
1.1 Les buts du Programme national de recherche « Gestion durable de l'eau » (PNR 61)	18
1.2 Les objectifs du projet MontanAqua	19
1.3 L'approche méthodologique	21
1.4 Problématique	21
1.5 Questions générales	27
1.6 Hypothèses de travail	27
1.7 Structure du travail et méthodes	29
Deuxième chapitre : La région d'étude	31
2.1 Introduction	31
2.2 La gestion de l'eau dans la zone d'étude	38
Troisième chapitre : Le système actuel de gestion des usages de l'eau	41
3.1 Introduction aux usages de l'eau	41
3.2 Le milieu vital	43
3.3 L'eau potable	54
3.4 L'irrigation	67
3.5 L'hydroélectricité	84
3.6 L'eau industrielle	89
3.7 La production de neige artificielle	94
3.8 L'épuration des eaux usées et la qualité des eaux	103
3.9 Les usages récréatifs	106
3.10 Conclusions	108
Quatrième chapitre : Quantification du système actuel	109
4.1 Introduction	109
4.2 Démographie	110
4.3 Les conditions climatiques de 2010 et 2011	113
4.4 L'eau potable	117
4.5 L'irrigation	144
4.6 L'hydroélectricité	172
4.7 L'enneigement artificiel	176
4.8 Conclusions	178
Cinquième chapitre : Les usages futurs de l'eau	181
5.1 Introduction	181
5.2 Les scénarios climatiques	181
5.3 Visions de futurs possibles et scénarios socio-économiques	184
5.4 Variations des usages	200
5.5 Conclusions	223
Sixième chapitre : Conclusions	228
6.1 Ressources hydriques disponibles	228

6.2	Discussion des résultats	231
6.3	Réflexions finales	240
6.4	Difficultés rencontrées et limites du travail	242
6.5	Perspectives de recherche	243
Annexes, bibliographie et cartes		245
	Annexes	247
	Bibliographie	288
	Cartes	298

Table des figures

1.1	Comparaison entre démarche inductive et déductive.	21
1.2	Structure d'un système de gestion de l'eau	24
1.3	Les étapes du travail.	30
2.1	Localisation de la région d'étude	31
2.2	Les communes de la région de Crans-Montana-Sierre.	32
2.3	Carte tectonique de la région de Crans-Montana-Sierre.	34
2.4	Climogramme de Sion (1980-2009).	36
2.5	Climogramme de Montana (1980-2009).	36
2.6	Étages de la végétation.	36
2.7	Photos prises dans les communes du coteau de Sierre.	40
2.8	Photos prises dans les communes du Haut-Plateau.	40
3.1	Réseau hydrographique de la région d'étude.	44
3.2	Indice biologique global normalisé et débits résiduels.	50
3.3	Les glissements de terrain.	52
3.4	Les prairies et pâturages secs d'importance nationale.	53
3.5	Répartition spatiale des réseaux de la région.	55
3.6	Réseau hydraulique simplifié de la région de Crans-Montana-Sierre (ouest).	56
3.6	Réseau hydraulique simplifié de la région de Crans-Montana-Sierre (est).	57
3.7	Schéma du projet de stockage des eaux de la Raspille et de l'Ertentse dans le barrage de Tseuzier.	66
3.8	Superficies potentielles d'irrigation.	68
3.9	Le Grand Bisse de Lens (en haut) et le Sillonin (en bas).	72
3.10	Le Tsittoret (en haut) et le Bisse Neuf (en bas).	73
3.11	Le répartiteur des Planigettes (en haut) et le bisse du Marais (en bas).	74
3.12	Les étangs de la région.	77
3.13	Irrigation des vignes par aspersion et système de transport de l'eau.	78
3.14	Irrigation au goutte-à-goutte : infrastructure et arrosage du vignoble.	80
3.15	Irrigation des vergers et des prairies.	80
3.16	Irrigation des gazons.	81
3.17	Le golf de Noas.	83
3.18	Les parcours de golf du Haut-Plateau.	83
3.19	Le lac d'accumulation de Tseuzier	85
3.20	Hydroélectricité dans le bassin versant de la Liène.	86
3.21	Le lac d'Icogne et la nouvelle infrastructure d'Icogne Energie SA	89
3.22	Répartition par secteur des établissements économiques.	91
3.23	Les alpages de la région de Crans-Montana-Sierre.	93
3.24	Vaches au pâturage et veau à la ferme.	93
3.25	Dernier canon à neige au fond de la piste du Signal.	94
3.26	Les infrastructures de CMA SA.	95
3.27	Neige au sol au mois de janvier 1932-1994 et 1997-2004 [cm]	96
3.28	Schéma d'adduction projeté de CMA SA.	99
3.29	Super Géant du 24 février 2012 - Arrivée aux Violettes.	101
3.30	Super Géant du 24 février 2012 - Piste Nationale.	101
3.31	Epanchage de la paille après ensemencement de la piste Combe des Dames.	102
3.32	Neige artificielle persistant plus longtemps que la neige naturelle.	102

3.33	Les station d'épuration : taille, localisation et communes desservies.	104
3.34	La qualité de l'eau.	105
4.1	Nuitées touristiques à Crans-Montana-Sierre en 2010 et 2011.	112
4.2	Températures mensuelles à Sion (482 m) et à Montana (1507 m).	115
4.3	Précipitations mensuelles à Sion (482 m) et à Montana (1507 m).	115
4.4	Cartes des anomalies climatiques.	116
4.5	Consommation d'eau potable de la ville de Sierre.	120
4.6	Consommation d'eau potable de la commune de Montana.	121
4.7	Consommation d'eau potable de la commune de Lens et Icoigne.	122
4.8	Consommation d'eau potable de la commune de Randogne.	123
4.9	Consommation d'eau potable de la commune de St-Léonard.	124
4.10	Consommation d'eau potable de la commune de Miège.	125
4.11	Consommation d'eau potable de la commune de Venthône.	126
4.12	Consommation d'eau potable de la commune de Veyras.	127
4.13	Estimation de la consommation d'eau potable de Chermignon.	128
4.14	Estimation de la consommation d'eau potable de Mollens.	128
4.15	Consommation d'eau potable de Zermatt.	130
4.16	Comparaison de la consommation d'eau potable par équivalent-habitant journalière des communes de la région.	132
4.17	Les posters et les prospectus distribués.	136
4.18	Étude sur la consommation en eau des ménages : étude de cas 1.	137
4.19	Étude sur la consommation en eau des ménages : étude de cas 2.	138
4.20	Étude sur la consommation en eau des ménages : étude de cas 3.	139
4.21	Étude sur la consommation en eau des ménages : études de cas 4.	140
4.22	Étude sur la consommation en eau des ménages : études de cas 5.	140
4.23	Étude sur la consommation en eau des ménages : études de cas 6.	140
4.24	Consommation d'eau potable en 2010 et 2011	141
4.25	Consommation d'eau potable des résidents et température.	142
4.26	Volume d'eau transporté en 2010 et 2011 par les bisses de la région.	147
4.27	Photosynthèse et relations entre le sol et les plantes.	152
4.28	Le besoin en eau des cultures et le K_c	153
4.29	Type de sol et de cultures.	156
4.30	Demande en eau non satisfaite par culture entre 1980 et 2011.	160
4.31	Estimation de l'eau nécessaire aux cultures par année (2000-2011) dans la région de Crans-Montana-Sierre.	162
4.32	Estimation de l'eau nécessaire aux cultures par mois.	163
4.33	Catégories de gazons utilisées pour la cartographie qualitative.	164
4.34	Demande en eau non satisfaite pour les ZRI de Montana.	166
4.35	Demande en eau non satisfaite pour les ZRI de Veyras.	166
4.36	Surfaces des zones résidentielles irriguées à Montana-station.	168
4.37	Surfaces des zones résidentielles irriguées à Veyras.	169
4.38	L'écosystème forêt tel qu'il est interprété par MABIA et dans la réalité.	170
4.39	Irrigation des golfs (Ballesteros et Nicklaus) du Haut-Plateau.	171
4.40	Reconstruction tridimensionnelle du fond du lac de Tzeusier.	173
4.41	Eau en entrée et en sortie du lac de barrage de Tzeusier.	174
4.42	Plan général de Lienne SA - Profil en long.	175
4.43	Estimation de la consommation en eau utilisée pour l'enneigement artificiel.	176
4.44	Usage de l'eau en 2010 et 2011 dans la région de Crans-Montana-Sierre (l'hydroélectricité a été omise).	180
4.45	Usage de l'eau en 2010 et 2011 dans la région de Crans-Montana-Sierre.	180
5.1	L'adaptation des scénarios climatiques à des sites spécifiques.	182
5.2	Coefficients de variation pour la station météorologique de Montana.	183
5.3	Scénarios AR-00-2010 appliqués à la zone d'étude.	188
5.4	La fréquentation touristique hôtelière future selon les facteurs multiplicatifs.	189
5.5	Les effets de l'application du filtre de majorité.	191
5.6	L'évolution de la zone bâtie entre 1998 et 2010 (ouest).	194
5.6	L'évolution de la zone bâtie entre 1998 et 2010 (est).	195

5.7	Schéma de la variation de l'utilisation du sol par scénario socio-économique	197
5.8	Cartes de l'utilisation du sol par scénario socio-économique.	199
5.9	Estimation de la consommation d'eau potable future selon les différents scénarios.	202
5.10	Le besoin en eau des cultures conformément aux changements climatiques.	204
5.11	Estimation du besoin en eau des prairies pour le scénario 4.	206
5.12	Estimation du besoin en eau des vignes pour le scénario 4.	206
5.13	Estimation du besoin en eau des prairies pour le scénario 1a.	207
5.14	Estimation du besoin en eau des vignes pour le scénario 1a.	207
5.15	Estimation du besoin en eau des prairies pour le scénario 1b.	208
5.16	Estimation du besoin en eau des vignes pour le scénario 1b.	208
5.17	Estimation du besoin en eau des prairies pour le scénario 2.	209
5.18	Estimation du besoin en eau des vignes pour le scénario 2.	209
5.19	Estimation du besoin en eau des prairies pour le scénario 3.	210
5.20	Estimation du besoin en eau des vignes pour le scénario 3.	210
5.21	Estimation du besoin en eau des parcours de golf du Haut-Plateau.	211
5.22	Heures potentielles d'enneigement artificiel à 1600 m (conditions idéales).	214
5.23	Heures potentielles d'enneigement artificiel à 1600 m (conditions limites)	215
5.24	Vulnérabilité de la partie ouest du domaine skiable de CMA SA.	217
5.25	Vulnérabilité de la partie est du domaine skiable de CMA SA.	217
5.26	Heures potentielles d'enneigement artificiel à 1600 m (conditions idéales)	218
5.27	Surface du domaine skiable selon le scénario d'expansion et de stabilisation.	220
5.28	L'évolution du bassin multifonctionnel de Tseuzier.	222
5.29	Variations mensuelles des usages de l'eau par scénario socio-économique.	224
5.30	Demande en eau du Sc1a à l'échelle mensuelle (sans l'hydroélectricité).	226
5.31	Demande en eau du Sc1b à l'échelle mensuelle (sans l'hydroélectricité).	226
5.32	Demande en eau du Sc2 à l'échelle mensuelle (sans l'hydroélectricité).	227
5.33	Demande en eau du Sc3 à l'échelle mensuelle (sans l'hydroélectricité).	227
5.34	Demande en eau du Sc4 à l'échelle mensuelle (sans l'hydroélectricité).	227
6.1	Liaison entre ressources hydriques disponibles et usages de l'eau.	228
6.2	Estimation des ressources hydriques disponibles et des besoins en eau (en m ³).	230

Liste des tableaux

1.1	Organigramme du projet MontanAqua.	20
3.1	Caractéristiques principales des biens et services fournis par l'eau.	42
3.2	Les infrastructures d'eau potable au niveau communal.	58
3.3	Statistiques des superficies d'utilisation de l'eau.	69
3.4	Les bisses de la région de Crans-Montana-Sierre.	71
3.5	Les principaux ouvrages de stockage de la région de Crans-Montana-Sierre.	75
3.6	Techniques d'irrigation du vignoble.	79
3.7	Production hydroélectrique du bassin versant de la Liène.	87
3.8	Établissements et emplois du secteur secondaire et tertiaire.	90
3.9	STEP : capacité de traitement.	103
3.10	STEP : rendement relatif à plusieurs substances.	103
3.11	Évaluation de la qualité des eaux	104
3.12	Les activités praticables sur les lacs de la région.	107
4.1	Population résidente entre 1910 et 2010.	110
4.2	Nuitées touristiques par catégorie de logement en 2003.	112
4.3	Consommation d'eau potable de la ville de Sierre.	120
4.4	Consommation d'eau potable de la commune de Montana.	121
4.5	Consommation d'eau potable de la commune de Lens et d'Icogne.	122
4.6	Consommation d'eau potable de la commune de Randogne.	123
4.7	Consommation d'eau potable de la commune de St-Léonard.	124
4.8	Consommation d'eau potable de la commune de Miège.	125
4.9	Consommation d'eau potable de la commune de Venthône.	126

4.10	Consommation d'eau potable de la commune de Veyras.	127
4.11	Nombre de caves par commune.	133
4.12	Coordonnées des stations du réseau de mesures sur les bisses.	144
4.13	Exemple de données enregistrées par le réseau de mesures sur les bisses.	144
4.14	Coefficients de rugosité (k) des matériaux de construction des bisses.	146
4.15	Débit des principaux bisses de la région de Crans-Montana-Sierre en 2010.	148
4.16	Débit des principaux bisses de la région de Crans-Montana-Sierre en 2011.	150
4.17	Comparaison entre le débit des bisses des bassins versants de la Liène et de la Raspille entre mai et septembre 2011.	151
4.18	Caractéristiques des cultures dans la région.	157
4.19	Caractéristiques hydriques des sols les plus fréquents dans la région.	158
4.20	Coordonnées des stations météorologiques utilisées.	158
4.21	Provenance des données météorologiques utilisées dans MABIA.	158
4.22	Estimation de l'eau nécessaire aux cultures par année (2000-2011) dans la région de Crans-Montana-Sierre.	162
4.23	Besoin en eau durant les années sèches après 2000.	163
4.24	Surfaces des zones résidentielles irriguées.	164
4.25	Surface et besoin en eau annuel des ZRI par m ²	165
4.26	Volumes d'eau utilisés pour l'irrigation des parcours de golf du Haut-Plateau.	172
4.27	Consommation en eau utilisée pour l'enneigement artificiel.	177
5.1	Principes directeurs des scénarios socio-économiques.	184
5.2	Principes directeurs de la vision future du groupe RégiEau.	185
5.3	Population résidente en Valais par région.	187
5.4	Facteurs multiplicatifs saisonniers de la fréquentation touristique future.	188
5.5	Résumé des variations des surfaces	196
5.6	Variation du besoin en eau potable par scénario socio-économique.	202
5.7	Besoin en eau des cultures par scénario socio-économique.	204
5.8	Variation du besoin en eau des cultures par scénario socio-économique.	205
5.9	Variation du besoin en eau des golfs par scénario socio-économique.	212
5.10	Domaine skiable : surface enneigée artificiellement selon les scénarios socio-économiques.	219
5.11	Domaine skiable : quantité d'eau selon les scénarios socio-économiques.	220
5.12	Eau en sortie du barrage de Tseuzier à l'horizon 2050.	221
5.13	Méthode(s) utilisée(s) pour l'estimation des usages futurs.	223
5.14	Variation de la demande en eau annuelle par scénario socio-économique.	226
6.1	Estimation des ressources hydriques disponibles à l'avenir (en m ³).	229
6.2	Ressources hydriques disponibles à l'avenir et usages maximaux (en m ³).	230

Avertissement

Ce travail traduit l'état de la question le 14 novembre 2013.

Certains faits ont pu évoluer depuis.

Mots-clés

2050, Crans-Montana-Sierre, gestion intégrée de l'eau, eau potable, enneigement artificiel, hydroélectricité, irrigation, quantification, ressource, scénarios climatiques, scénarios socio-économiques, sécheresse, tourisme, utilisation du sol, WEAP.

Keywords

2050, Crans-Montana-Sierre, integrated water management, drinking water, artificial snowmaking, hydropower, irrigation, quantification, resource, climate scenarios, socio-economic scenarios, drought, tourism, land use, WEAP.

Avant-propos

Ce travail, qui représente le Working Package 2 du projet MontanAqua, a été réalisé à l'Institut de géographie et durabilité de l'Université de Lausanne sous la direction du Professeur Emmanuel Reynard et s'inscrit dans le Programme national de recherche 61 « Gestion durable de l'eau » (PNR 61).

Il a été réalisé avec le soutien financier du Fonds national suisse de la recherche scientifique (subvention n° 406140-125964).

Remerciements

Cette thèse est le fruit de mon travail au sein du projet MontanAqua et représente le résultat de trois années de recherche à l'Institut de géographie et durabilité de l'Université de Lausanne (IGD) et sur le terrain. Il a été possible grâce à une collaboration avec plusieurs personnes, auxquelles j'exprime toute ma gratitude, notamment à :

- Emmanuel Reynard, Professeur de géographie à l'Université de Lausanne (UNIL), qui a contribué de manière décisive au succès du projet MontanAqua, qui a suivi constamment les progrès de ma thèse et qui m'a guidé dans les moments de difficulté ;
- Rolf Weingartner, Professeur de géographie à l'Université de Berne (UNIBE) et Chef du projet MontanAqua ;
- Les autres doctorants et post-doc du projet :
Christine Homewood, Martina Kauzlaric, Emmanuel Rey et Flurina Schneider ;
- L'ensemble de l'équipe MontanAqua et de ses collaborateurs.

Un grand merci va également à (par ordre alphabétique) :

- Daniela Balin, hydrologue et Post-Doc à l'UNIL, qui m'a aidé à me familiariser avec le modèle WEAP et avec l'hydrologie ;
- Laura Bernasconi, étudiante en master en géographie à l'UNIL, qui m'a donné une aide précieuse sur le terrain à plusieurs reprises ;
- Raphaël Charles, Claire Deléglise, Eric Mosimann, Philippe Monney et Vivian Zufferey, collaborateurs d'Agroscope qui m'ont expliqué dans le détail les caractéristiques des cultures de la région de Crans-Montana-Sierre ;
- Jean-Michel Fallot, climatologue et maître d'enseignement et de recherche à l'UNIL, qui a toujours su me donner de bons conseils ;
- Nicola Deluigi, doctorant à l'UNIL, avec qui j'ai souvent réfléchi autour d'une tasse de café.
- Pierre-Alain Gabbud, Fabian Hintz et Yvan Epiney, Directeur et employés chez DPE Electrotechnique SA, qui m'ont fourni les données relatives à l'eau potable pour une partie des communes ;
- Federica Gatti, qui a lu et patiemment corrigé mon travail à plusieurs reprises ;
- Diego Joss, formidable informaticien, qui est venu à mon secours en me permettant d'économiser du temps précieux ;
- Christian Kaiser, maître d'enseignement et de recherche à l'UNIL, qui m'a introduit à l'analyse du développement des villes ;
- Stuart Lane, professeur ordinaire en géomorphologie, qui a corrigé mes abstracts et mes articles en anglais ;

- Simon Martin, doctorant à l'UNIL et expert cartographe, qui a patiemment répondu aux multiples questions techniques que je lui ai posées ;
- Natan Micheletti, doctorant à l'UNIL et programmeur expérimenté, qui a su me conseiller sur la démarche à suivre à plusieurs occasions.
- Marj Tonini, responsable de recherche à l'UNIL, qui m'a fourni des données spatiales sur lesquelles elle a travaillé longtemps.
- Michele Volpi, doctorant à l'UNIL et profond connaisseur de la géomatique ;
- Antje, Cristian, Christophe, Gabriela, Giona, Gaston, Jean-Baptiste, Laetitia, Lea, Lucien, Maria, Nico, Nicola, Marcia et Simone.
- Tous les membres de l'Institut de géographie et durabilité de l'UNIL (IGD).

Je remercie également les participants au groupe de suivi RégiEau :

- Alain Perruchoud, Chef du département Technique et de la division Electricité de Sierre Energie SA ;
- Arthur Clivaz, Président des Remontées Mécaniques du Valais et directeur de l'entreprise CMA SA ;
- Stéphane Bétrisey et Jean-Marc Morard, Secrétaire et Responsable des travaux publics de la commune de St-Léonard ;
- Charly Wuilloud, Chef de la section Dangers naturels au Service valaisan des forêts et du paysage (SFP).
- Eric Kamerzin, Président d'Icogne ;
- Maurice Perraudin, Responsable de la production de Lienne SA ;
- Nicolas Bagnoud, viticulteur à Flanthey (Lens) ;
- Jean-Christophe Dufour, Ingénieur chez IDEALP ingénieurs Sàrl à Sion ;
- Serge Amoos, Conseiller communal de Veyras et responsable de l'approvisionnement en eau jusqu'en 2012 ;
- Steeve Maillard, Ingénieur d'arrondissement de l'Office des améliorations structurales du canton du Valais ;
- Stéphane Pont, Président de la commune de Mollens ;
- Véronique Jenelten-Biollaz, Ancienne députée du district de Sion.

Pendant ces trois années, j'ai également eu l'occasion de rencontrer et de collaborer avec une liste bien longue de personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont un lien avec l'eau ou la région de Crans-Montana-Sierre. J'en profite donc pour les remercier tous. Sans oublier que le projet MontanAqua a été soutenu par le Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS), subvention n° 406140-125964, que je remercie sincèrement.

Résumé

Crans-Montana-Sierre est une région touristique située dans la vallée du Rhône, dans le Valais central, qui se caractérise par un climat relativement pauvre en précipitations et qui plus que d'autres a subi les effets de la sécheresse qui a touché l'Europe occidentale durant l'été 2003. À l'avenir, les changements climatiques ainsi que le développement socio-économique modifieront de manière significative les besoins en eau de la région, ce qui risque de faire augmenter les rivalités d'usage concernant cette ressource. Afin de jouer à l'avance, les décideurs ont besoin d'informations précises sur la quantité d'eau nécessaire à la région, avec une attention particulière à sa concentration temporelle et spatiale, à l'heure actuelle et à l'horizon 2050. Ce travail vise donc à estimer la variation de la demande en eau en tenant compte de l'influence des changements climatiques (CH2011) et des scénarios socio-économiques, élaborés en collaboration avec les autorités compétentes. Cette thèse, qui met l'accent sur les usages de l'eau fait partie du projet MontanAqua « Gestion de l'eau en temps de pénurie et de changement global », est à l'intersection entre les ressources hydriques, l'aménagement du territoire et son organisation socio-politique, fait qui la met, non pas par son importance, mais par son emplacement et ses interconnexions, au cœur de cette recherche.

Les résultats obtenus montrent comment les développements socio-économiques d'ici à 2050 ont un impact potentiellement plus important que les changements climatiques prévus par les scénarios A1B de CH2011 pour le même horizon temporel sur la demande en eau. Démographie, aménagement du territoire et contexte économique-touristique, ne sont que quelques-uns des facteurs qui ont la capacité d'agir significativement sur les usages de l'eau en ce qui concerne les aspects qualitatif et quantitatif de la région de Crans-Montana-Sierre. Par rapport aux ressources en eau disponibles à l'avenir, la demande maximale d'eau prévue par les scénarios socio-économiques développés au sein du projet MontanAqua risque de ne pas être toujours satisfaite. Ce danger et la manifestation de phénomènes climatiques extrêmes, comme la sécheresse estivale survenue en 2003 ou celle d'avril/mai 2011, ne pourront être atténués que par l'adoption de politiques de gestion à l'échelle régionale favorisant une utilisation plus rationnelle et un stockage préventif de la ressource en eau.

Abstract

Crans-Montana-Sierre is a tourist area located in Rhone valley in central Valais, characterized by dry climate and scarce summer precipitations. More than other regions in Switzerland, this area has suffered the effects of the drought (heat wave) that affected all Western Europe during summer 2003. In the future, climate change together with societal and economic development will significantly modify the water need of the region and, consequently, may increase the potential conflicts of interest. Within a long term planning strategy, decision-makers require precise information about the current amount of water needed in the region, with particular attention to temporal and spatial concentration, and the forecasted amount for 2050. This work therefore aims at estimating the variation of the water demand by taking into account the influence of climate change (CH2011) and socio-economic scenarios, developed in cooperation with the competent authorities. This thesis, whose aim is to study the water management and water uses is a core part of the MontanAqua project “Water management in times of scarcity and global change” mainly because of its interdisciplinary topic at the interface between water resources, land development and the socio-political structure.

Results show that socio-economic development by 2050 could have a greater impact than expected climate changes (CH2011, A1B scenarios) for the same time horizon for water demand. Demography, spatial planning, tourism and economic development are just some of the factors that could significantly affect the water consumption of the Crans-Montana-Sierre region. Compared with the future water resources available, the maximal water demand forecasted by the socio-economic scenarios developed within the project MontanAqua, could not always be satisfied. This issue, like extreme climate phenomena (as it was the summer drought occurred in 2003 or in April / May 2011), could be mitigated adopting regional management policies relating to a more rational water use and preventive storage of water resource.

Zusammenfassung

Crans-Montana-Sierre ist eine touristische Region im Rhonetal, im Zentralwallis, und ist durch ein Sommerklima mit wenig Niederschlag gekennzeichnet. Sie hat mehr als andere Regionen der Schweiz unter den Folgen der Dürre, die Westeuropa im Sommer 2003 heimgesucht hat, gelitten. Die verfügbaren Wasserressourcen und die Wasserbedürfnisse in der Region werden durch den Klimawandel und die sozio-ökonomische Entwicklung erheblich beeinflusst und es besteht die Gefahr, dass eine Rivalität zwischen den verschiedenen Wassernutzungen entsteht. Um dies zu vermeiden, benötigen die Entscheidungsträger genaue Informationen über die Wassermenge, welche in der Region benötigt wird und insbesondere zur räumlichen und zeitlichen Konzentration von heute bis 2050. Diese Forschungsarbeit hat deshalb zum Ziel, die Veränderungen der Wassernachfrage abzuschätzen, unter Berücksichtigung der Einflüsse des Klimawandels (CH2011) und jener der sozio-ökonomischen Entwicklung. Letztere wurden in Zusammenarbeit mit den zuständigen Behörden erarbeitet. Diese Dissertation betrifft die Wassernutzung und ist Teil des Projekts MontanAqua. Sie ist der Schnittpunkt zwischen Wasser-Ressourcen, der Entwicklung eines Gebietes ihre sozio-politische Organisation. Dies macht sie, nicht wegen ihrer Wichtigkeit, sondern wegen ihrem interdisziplinärem Forschungsfeld zum Kern dieser Forschung.

Die Ergebnisse unterstreichen die Tatsache, dass die sozio-ökonomischen Entwicklungen bis zum Jahr 2050 potenziell einen größeren Einfluss haben werden, als der erwartete Klimawandel aus den Szenarien A1B aus CH2011 für den Wasserbedarf für den gleichen Zeitraum. Demographische, raumplanerische, touristische und wirtschaftliche Entwicklung sind nur einige der Faktoren, welche den Wasserverbrauch der Region Crans-Montana-Sierre signifikant beeinflussen. Aus einem Vergleich der zukünftig zur Verfügung stehenden Wasserressourcen mit der maximale Wassernachfrage, die aus den sozio-ökonomischen Szenarien des Projektes MontanAqua mit hervorgeht, folgt dass diese nicht immer erfüllt werden können. Allerdings können die Auswirkungen von maximale Wassernachfrage und Extremwetterereignissen, wie z.B. die Dürre im Sommer 2003 oder April / Mai 2011, nur durch regionale Managementstrategien, die auf eine bedachte Wassernutzung sowie eine vorsorgliche Wasserspeicherung abzielen, abgedämpft werden.

Riassunto

Crans-Montana-Sierre è una regione turistica situata nella valle del Rodano, nel Vallese centrale, che si caratterizza per il clima relativamente parco in ciò che concerne le precipitazioni estive e che più di altre ha patito gli effetti della siccità che ha colpito l'Europa occidentale nell'estate del 2003. I cambiamenti climatici e socio-economici in atto modificheranno sensibilmente le risorse disponibili sul territorio ed il fabbisogno d'acqua della zona, rischiando di far nascere delle rivalità d'uso importanti. Per poter giocare d'anticipo, gli organi decisionali necessitano di indicazioni precise circa la quantità d'acqua necessaria alla regione, con particolare attenzione alla concentrazione spaziale e temporale, al momento attuale ed all'orizzonte 2050. Questo lavoro si prefigge quindi di stimare la variazione del fabbisogno d'acqua prendendo in considerazione l'influenza dei cambiamenti climatici (CH2011) e di quelli socio-economici, elaborati in collaborazione con le autorità competenti. La presente tesi di dottorato, che verte sugli usi dell'acqua e facente parte del progetto MontanAqua « Gestione dell'acqua in tempi di scarsità e cambiamento globale », funge da intersezione tra risorse idriche, sviluppo del territorio e la sua organizzazione socio-politica, ciò che la rende, non per importanza, ma per ubicazione ed interconnessioni, il nodo centrale di questa ricerca.

I risultati ottenuti evidenziano la possibilità che l'evoluzione socioeconomica di qui al 2050 abbia un impatto maggiore di quello dei cambiamenti climatici previsti dagli scenari A1B di CH2011 per lo stesso orizzonte temporale sulla domanda d'acqua della regione di Crans-Montana-Sierre. Demografia, pianificazione territoriale e contesto economico-turistico sono solo alcuni dei fattori che hanno la capacità di influenzare significativamente gli usi dell'acqua sotto l'aspetto qualitativo e quantitativo della regione di Crans-Montana-Sierre. Confrontata con le risorse idriche future disponibili, la domanda massimale d'acqua prevista dagli scenari socioeconomici elaborati in seno al progetto MontanAqua, potrebbe in futuro non poter essere soddisfatta. Questa problematica e la manifestazione di fenomeni climatici estremi, come lo è stato la siccità estiva verificatasi nel 2003 o quella di aprile/maggio 2011, potrà però essere mitigata solo adottando politiche di gestione su scala regionale vertenti ad un uso più razionale ed a uno stoccaggio preventivo della risorsa idrica.

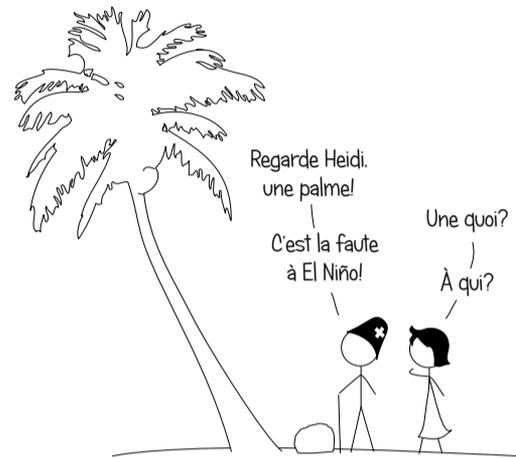
Abréviations

ACCM	Association des communes de Crans-Montana
AEE	Agence européenne pour l'environnement
ANPNC	Association Nationale des Professionnels de la Neige de Culture
APACH	Association des propriétaires d'appartements et de chalets de Crans-Montana
C2SM	Center for Climate Systems Modeling
CDE	Centre for Development and Environment
COD	Carbone organique dissous
CMA	Crans-Montana-Aminona SA
Cons.	Consommation
DBO ₅	Demande biochimique ou biologique en oxygène pour 5 jours
DDC	Direction du développement et de la coopération
Dév.	Développement
EH	Équivalent-habitant
EPFL	École polytechnique fédérale de Lausanne
ET _a	Évapotranspiration actuelle
ET _{max}	Évapotranspiration maximale
ETH Zürich	École polytechnique fédérale de Zurich
FNS	Fonds national suisse de la recherche scientifique
GCMs	Global climate models
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
H	Hauteur
IBGN	Indice biologique global normalisé
ISSKA	Institut suisse de spéléologie et de karstologie
LAT	Loi fédérale sur l'aménagement du territoire
LEaux	Loi fédérale sur la protection des eaux
MABIA	Module agronomique (acronyme inconnu) intégré dans WEAP
MCG	Modèles climatiques globaux
MCR	Modèles climatiques régionaux
MES	Matières en suspension
MétéoSuisse	Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse
m H ₂ O	Mètres de colonne d'eau
mi.	Mi-saison
MM	Moyenne mensuelle
MNT	Modèle numérique de terrain
n.c.	Non communiqué
n.d.	Non disponible
NCCR	National Centre of Competence in Research
OcCC	Organe consultatif sur les changements climatiques
OFEFP	Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage
OFEN	Office fédéral de l'énergie
OFEV	Office fédéral de l'environnement
OFS	Office fédéral de la statistique
ONU	Organisation des Nations Unies
PAES	Plan d'action environnement et santé
PNR61	Programme national de recherche 61
PPS	Prairies et pâturages secs
P	Précipitations
Q ₃₄₇	Débit résiduel minimal
RQG	Règlement intercommunal des quotas et du contingentement
SAVI	Ski Area Vulnerability Index
Sc1a et 1b	Scénarios d'expansion
Sc2	Scénario de stabilisation
Sc3	Scénario de modération
Sc4	Scénario RégiEau

SIG	Systèmes d'information géographique
SSIGE	Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux
STEP	Station d'épuration des eaux usées
SHRV	Société d'histoire du Valais Romand
T	Température
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UV	Rayonnement ultraviolet
WEAP	Water Evaluation and Planning System
WP	Work Package
WWF	World Wide Fund for Nature
Y_a	Rendement actuel
Y_{max}	Rendement maximal
ZRI	Zones résidentielles irriguées

Premier chapitre

Introduction



Après les conférences de Rio¹ en 1992 et de Kyoto² en 1997, la thématique des changements climatiques et des événements climatiques extrêmes est désormais devenue du domaine public, et ceci grâce à l'écho majeur relayé par les médias. À partir de ce moment, grâce aux moyens de diffusion de masse, ce que l'on appelle également « réchauffement global » est devenu le bouc émissaire pour tout genre de catastrophe naturelle et serait le déclencheur d'improbables calamités causant des répercussions globales. Le grand public, généralement, n'a pas la possibilité d'avoir une vue d'ensemble ou une connaissance approfondie des dynamiques climatologiques et, souvent, il est informé par les médias avec des notions fréquemment incomplètes, inexactes et incohérentes. Ces derniers, exploitent également le fait que la mémoire humaine est mauvais guide lorsqu'il s'agit des fluctuations du climat (Anctil, 2007), caractéristique qui leur permet d'ajouter une composante émotionnelle au message médiatique, qui en sort renforcé. En Suisse, la tempête Lothar et les crues de l'année 2000 ont fait considérablement augmenter l'envie d'avoir des réponses de la part des scientifiques. Parallèlement, comme dans la plupart des pays industrialisés, les citoyens suisses développent une nouvelle conscience écologique qui donne naissance à un marché « vert » en plein essor (Pearse, 2012). Jusqu'ici, la Suisse a été systématiquement touchée par des catastrophes naturelles caractéristiques d'un territoire alpin : crues, inondations, glissements de terrain et avalanches. En 2003, de plus, le pays a dû faire face à une menace inhabituelle : une sécheresse estivale d'une portée à peine inférieure de celle historique de 1947 (OFEV, 2009). L'écho médiatique généré par les conséquences de la

1. Conférence ONU sur l'environnement et le développement, Rio de Janeiro, 4 - 14 juin 1992.

2. Troisième conférence ONU sur les changements climatiques, Kyoto, 1 - 12 décembre 1997.

sécheresse et de la canicule estivale de 2003 (OFEV, 2009) ont poussé la Confédération à lancer des programmes de recherche ambitieux, comme le Programme national de recherche « Gestion durable de l'eau » (PNR 61), auquel ce travail appartient.

L'objectif du PNR61 est d'élaborer une stratégie permettant l'adaptation des systèmes naturels et socio-économiques aux changements climatiques, en réduisant le plus possible les facteurs de risque (PNR61, 2010).

1.1 Les buts du Programme national de recherche « Gestion durable de l'eau » (PNR 61)

Les périodes de crise, comme la sécheresse de l'année 2003, accroissent le besoin de prévisions fiables (Krogerus et Tschäppeler, 2012). Le Programme national de recherche « Gestion durable de l'eau » (PNR 61) répond à cette nécessité en élaborant des bases et des méthodes scientifiques pour une gestion durable des ressources hydrologiques et en cherchant des solutions globales et multidimensionnelles (PNR 61, 2012). Les objectifs du PNR 61 sont au nombre de quatre (PNR 61, 2012) :

- élaborer des bases, méthodes et stratégies scientifiquement éprouvées à même d'apporter des solutions aux défis à venir dans le domaine de l'exploitation des ressources en eau ;
- étudier les effets des changements climatiques et sociaux sur les ressources hydrologiques ;
- examiner la gestion des risques et des conflits d'utilisation dans une perspective globale ;
- développer des systèmes de gestion efficaces et durables des ressources en eau.

Les acteurs de l'ensemble des domaines dépendant et influençant la gestion de l'eau (hydroélectricité, agriculture, tourisme, etc.) ont été intégrés dans la recherche, car les solutions axées sur un seul secteur dans certains sous-domaines de la gestion de l'eau peuvent avoir une influence néfaste sur les progrès (PNR 61, 2010). Les travaux de recherche du PNR 61 envisagent la mise au point de solutions futures durables qui pourront rendre service, en fournissant des bases solides aux décideurs (PNR 61, 2012). Les axes de recherche du PNR 61 sont au nombre de deux et concernent d'une part le système naturel et d'autre part le système social. L'étude des systèmes naturels met l'accent sur les variations du cycle de l'eau, du régime hydrologique, de la qualité de l'eau et des écosystèmes liés à l'eau, suite aux changements climatiques, aux modifications de l'utilisation du territoire et à d'autres changements provoqués par des interventions anthropiques (PNR 61, 2010). L'analyse du système socio-économique traite de son propre changement, des stratégies suprasectorielles à adopter et de la

gestion durable de l'eau, tant sur le plan de l'exploitation que sur celui de la protection (PNR 61, 2010). Les deux axes de recherches se rencontrent et interagissent entre eux.

1.2 Les objectifs du projet MontanAqua

Le projet MontanAqua est l'un des 16 projets du PNR 61 « Gestion durable de l'eau ». Son but est d'étudier la gestion de l'eau en situation de pénurie et de changement global, en construisant des connaissances qui permettront d'anticiper le stress hydrique dans les Alpes. Dans le futur, le changement climatique et les développements socio-économiques vont modifier l'offre et la consommation d'eau ; des conflits d'usage pourraient ainsi surgir. Les régions sèches des Alpes sont particulièrement concernées, car il faut partir du principe que les risques de pénurie d'eau seront encore plus aigus dans ces régions. La région de Crans-Montana-Sierre est à ce titre représentative de ce type de régions sèches des Alpes, ce qui l'a amenée à être choisie comme région d'étude du projet MontanAqua (Weingartner et al. 2010a, 2010b ; Weingartner et Reynard 2010). Si aujourd'hui la distribution de l'eau a le plus souvent lieu au niveau des communes et suit des règles et structures d'origine historique, il faut s'interroger si, dans le futur il ne faudra pas passer d'une gestion basée sur les besoins (*use-driven management*) à une gestion organisée autour d'une offre limitée (*supply-driven management*).

En collaboration avec les responsables locaux et les personnes intéressées, le projet MontanAqua vise à élaborer des propositions pour une gestion et une distribution de l'eau optimales et équilibrées. Le projet a été divisé en quatre « Work Packages » (WP) de la manière suivante (tableau 1.1). Le WP1 est responsable du recensement de l'eau à disposition aujourd'hui et à l'avenir dans la région de Crans-Montana-Sierre. Le Glacier de la Plaine Morte, les systèmes de dérivation de l'eau et l'utilisation du sol y sont également examinés. Le WP2 étudie la consommation d'eau par les divers usagers et l'estimation de la consommation future, en tenant compte des changements climatiques et socio-économiques. Le WP2 constitue également le nœud du projet et relie les sciences naturelles avec les sciences sociales. Le WP3 s'occupe de l'examen de l'organisation juridique et sociale de la gestion de l'eau en place aujourd'hui. Des propositions sont élaborées permettant d'organiser au mieux la distribution de l'eau à l'avenir. Les répercussions de telles solutions sur les diverses utilisations de l'eau sont également examinées. Le module de synthèse, enfin, est responsable de la coordination et de l'intégration des WPs précédents. Il doit par ailleurs assurer l'intégration transdisciplinaire des résultats de recherche en satisfaisant les attentes des acteurs impliqués, principalement à travers une approche participative (Renner et al. 2013). Le groupe de suivi RégiEau, avec lequel les membres du projet MontanAqua se réunissent

régulièrement (jusqu'à trois fois par année), a été créé précisément pour assurer la collaboration avec les acteurs régionaux. RégiEau est un groupe très hétérogène composé de politiciens, de collaborateurs scientifiques, d'ingénieurs, d'agriculteurs et de directeurs d'entreprises privées. Toutefois, les participants sont concernés, directement ou indirectement, par la gestion de l'eau dans la région de Crans-Montana-Sierre. Le groupe de suivi Transfer, comme son nom l'indique, a pour but de partager les connaissances acquises avec des scientifiques travaillant dans des domaines analogues à celui du projet MontanAqua, et de profiter également de leur expérience personnelle. En résumé, ce travail est particulièrement significatif car la plupart des travaux existants se caractérise soit par une approche holistique sur une région très vaste, soit par l'attention à un aspect plus particulier à une échelle plus réduite (PNR61, 2010). Plusieurs études ne prennent en considération que les changements climatiques ou que les changements socio-économiques ; les deux genres de scénarios n'interagissent souvent pas à cause du manque d'informations sur l'un des deux. Le projet MontanAqua vise à combler cette lacune en étudiant la région de Crans-Montana-Sierre, en intégrant les changements climatiques et socio-économiques dans une étude transdisciplinaire, et en collaborant activement avec les acteurs locaux (Weingartner et al. 2010a, 2010b ; Weingartner et Reynard 2010).

Gestion du projet Rolf Weingartner Bruno Schädler			
WP1		WP2	WP3
Ressources en eau		Usages de l'eau	Structure socio-économique
Université de Berne Institut de géographie Rolf Weingartner Bruno Schädler	Université de Fribourg Géographie physique Martin Hoelzle Matthias Hüss	Université de Lausanne Institut de géographie et durabilité Emmanuel Reynard	Université de Fribourg Dép. des Géosciences Unité de Géographie Olivier Graefe
		Université de Berne CDE Hanspeter Liniger Karl Herweg	
Martina Kauzlaric Doctorante	Emmanuel Rey Doctorant	Mariano Bonriposi Doctorant	Christine Homewood Doctorante
Synthesis Package : paysage multifonctionnel Université de Berne CDE Stephan Rist Flurina Schneider			
Groupe de suivi RégiEau		Groupe de suivi Transfer	Partenaires scientifiques et politiques

Tab. 1.1 – Organigramme du projet MontanAqua.

Photo d'équipe à l'annexe 0.

1.3 L'approche méthodologique

L'approche choisie pour ce travail peut être définie comme systémique et hypothético-déductive. Les phénomènes sont en effet étudiés dans leur complexité, en partant d'hypothèses formulées sur la base de l'observation. L'approche systémique permet d'établir les caractéristiques d'un phénomène, ses mécanismes, son fonctionnement et ses interactions avec les autres phénomènes du système auquel il appartient. La méthode hypothético-déductive formule des hypothèses découlant de l'observation du « général », afin de tester leur validité en passant par des études de cas (figure 1.1). Contrairement à la démarche inductive, en utilisant la méthode hypothético-déductive il n'y a pas le risque de faire des suppositions sur la base de l'observation du « particulier » qui, même si elles sont correctes, peuvent porter à des règles générales incorrectes (figure 1.1).

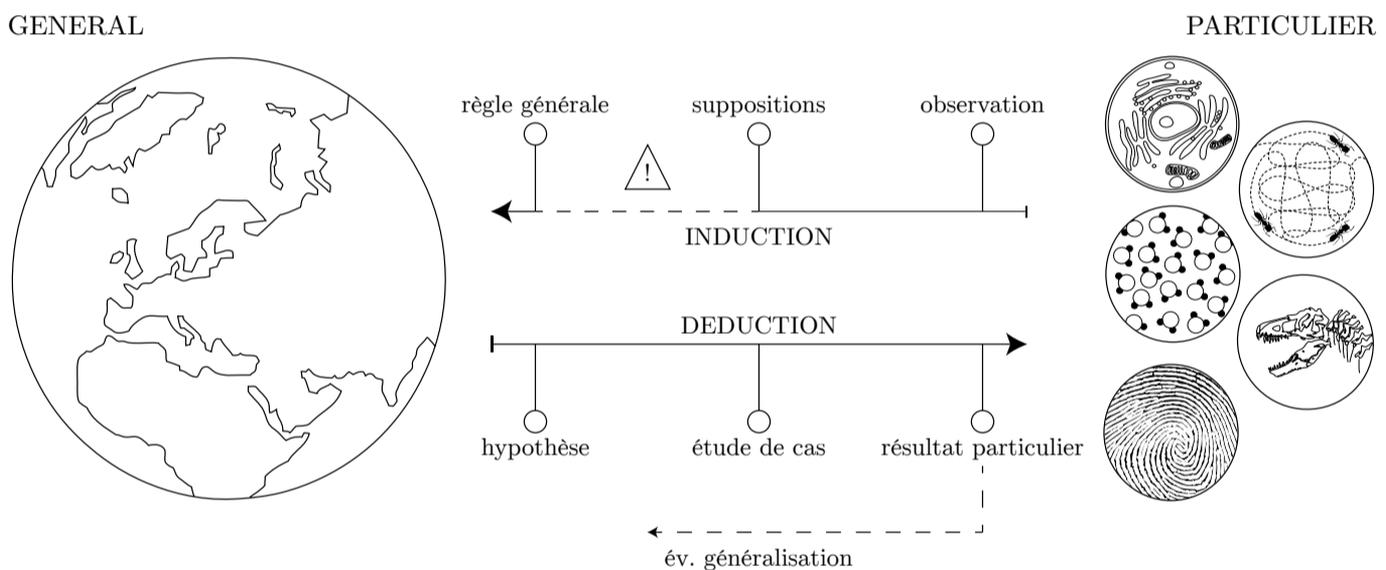


Fig. 1.1 – Comparaison entre démarche inductive et déductive.

1.4 Problématique

1.4.1 Introduction à l'eau : caractéristiques, histoire et enjeu

L'eau est un composé chimique très simple, constitué que de deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène, mais pourtant si fondamental pour la vie sur Terre grâce à ses caractéristiques extraordinaires. L'eau a une température d'ébullition de 100°C au niveau de la mer, ce qui est anormal pour un composé chimique avec une masse moléculaire si réduite et une température de fusion de 0°C, ce qui est également exceptionnel. Ces anomalies sont dues aux liaisons hydrogènes engendrées par la structure de l'eau, conséquence de la complexe interaction entre les atomes constituant ses molécules (Van Vliet-Lanoë, 2005). Ces caractéristiques font donc de l'eau une molécule unique. Tout en étant constituée d'éléments chimiques très communs dans l'univers,

elle a permis le développement de la vie sur Terre (Pomerol et al. 2005).

Pendant les premiers jours de l'existence humaine, les relations entre les activités humaines et le cycle hydrologique étaient presque insignifiantes ; les activités humaines étaient en grande partie dictées par les contraintes imposées par l'environnement naturel (Juuti et al. 2007). Le développement technologique et économique, à partir de la révolution industrielle, a déterminé une augmentation exponentielle de l'importance de ce lien (Varis, 2006 ; Gleick, 2000). À partir de ce moment, l'homme a désormais la possibilité d'influencer et d'endommager le cycle hydrologique en polluant les eaux ou en épuisant les ressources hydriques disponibles (Peirce et al., 1997). L'eau a donc joué un rôle fondamental dans le développement de la civilisation humaine, en permettant d'irriguer les cultures, d'abreuver le bétail, de transporter les marchandises, de propulser les machines à vapeur, de produire de l'électricité et toute une longue série d'autres activités.

En revanche, tout au long de l'histoire, l'eau a également détruit des villages par des crues et des laves torrentielles, favorisé la propagation de maladies infectieuses dans des zones marécageuses et créé des déserts par son absence.

Ce double aspect de la ressource en eau implique que sa maîtrise, son aménagement et sa gestion ont été et restent d'un intérêt primordial pour toute civilisation (Papilloud, 2002). À ce propos, Denys d'Halicarnasse, historien grec contemporain de l'empereur Octavien, écrivait dans son œuvre intitulée « Les antiquités romaines »³ :

« La grandeur de l'Empire romain est admirablement démontrée par trois choses : les aqueducs, les routes et les égouts ».

Même dans un passé lointain, l'accès et la gestion de l'eau étaient fondamentales pour toutes les civilisations et aujourd'hui, avec plus de 7 milliards de personnes qui vivent sur la planète, ces défis ont gagné une importance encore plus grande (WWDR, 2003). Les chiffres actuels montrent que 80 pays, représentant environ le 40% de la population mondiale, font désormais face à des pénuries d'eau chroniques (Lasserre et Descroix, 2011) et les estimations pour l'avenir concordent sur l'aggravation de la situation, déterminée surtout par la croissance démographique prévue. De plus, développer des modèles qui reproduisent précisément le cycle hydrologique et les facteurs qui l'influent s'avère extrêmement difficile (GIEC, 2007).

Dans un tel contexte d'incertitude, une gestion de l'eau conforme aux objectifs de l'Agenda 21 et ayant les moyens de s'adapter en suivant l'évolution des événements semble la façon plus rationnelle (Bruch, 2009) enfin de faire face à ce que plusieurs indiquent comme l'enjeu mondial pour le XXI^e siècle (Musy et al., in prep.).

3. Traduites du grec par le P. Gabriel François le Jay, de la Compagnie de Jésus.

1.4.2 Les enjeux de l'eau dans les Alpes et en Suisse

Les Alpes sont considérées comme le château d'eau de l'Europe (Viviroli et Weingartner, 2004), et par conséquent on pourrait conclure que cette caractéristique les met à l'abri de problèmes concernant l'eau aujourd'hui comme à l'avenir (Reynard et Bonriposi, 2012).

La morphologie complexe de la chaîne alpine influence la circulation atmosphérique et notamment la distribution des précipitations, phénomène qui explique la grande variété de climats qu'on rencontre tout au long des Alpes. La concentration spatiale et temporelle des précipitations est également responsable d'événements extrêmes tels que sécheresses et crues (OFEV, 2009). Malgré ces contraintes naturelles, qui touchent des vastes régions lors de leur manifestation, la gestion de l'eau en Suisse se fait encore principalement à l'échelle communale (Reynard et Bonriposi, 2012). En fait, même si l'Office fédéral de l'environnement (OFEV, 2012b) a posé les bases théoriques de la gestion intégrée de l'eau par bassin versant, cette dernière est loin d'être appliquée systématiquement en Suisse.

La gestion intégrée (figure 1.2) se caractérise par la prise en compte de la complexité du cycle et des usages de l'eau (Charnay, 2010), en principe dans l'espace géographique du bassin versant (Reynard et al., 2001 ; ASL, 2009a, 2009b et 2010). Par rapport au concept de gestion de l'eau traditionnelle, la gestion intégrée introduit les notions d'organisation, d'interdépendance, de hiérarchisation, de coordination et d'intégration (Reynard, 2000a). Pour faire face à la complexité de la gestion intégrée (figure 1.2), l'approche systémique s'impose (Schwarz, 1996). Les multiples interactions à l'intérieur des systèmes complexes, en effet, mènent à des résultats non prévisibles lorsque leurs composantes sont analysées individuellement (Mortier, 2001). Dans ce cas, l'approche systémique est utile afin de mieux comprendre l'ensemble des éléments liés à la gestion de l'eau, en permettant également d'analyser sa structure, son fonctionnement et le rôle des acteurs impliqués (Reynard et al., 2001).

Cette manière de gérer l'eau est particulièrement adaptée aux régions où les interactions à l'intérieur du système social (figure 1.2) font varier le volume des prélèvements de ressource hydrique de manière significative, comme par exemple dans les stations touristiques de montagne. Pourtant dans ces régions, en Suisse comme dans les Alpes, la gestion intégrée reste peu connue et rarement appliquée. La forte autonomie dont jouissent les communes en Suisse est sûrement un des facteurs qui empêchent l'affirmation de cette pratique. À ce facteur déterminant, il faut également ajouter que les problèmes liés à une pénurie relative d'eau en Suisse ne se présentent pas assez fréquemment pour remettre vraiment en question le système de gestion actuel.

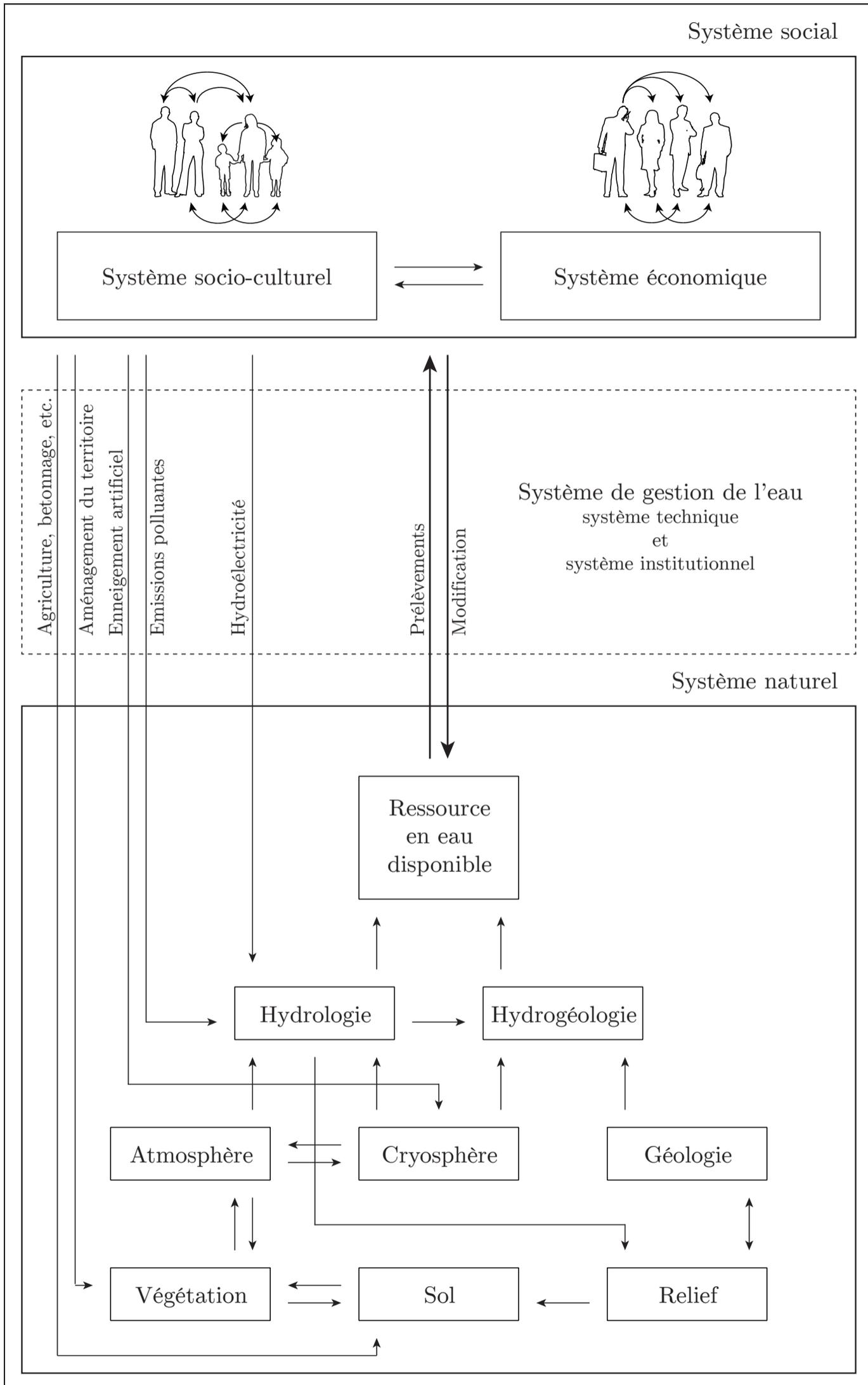


Fig. 1.2 – Structure d'un système de gestion de l'eau

Source : Reynard, 2000, 2008 (modifié).

Les flèches représentent les interactions entre les éléments qu'elles relient. Les usages de l'eau qui apparaissent dans le schéma ont un impact sur le système naturel qui va au-delà du prélèvement de la ressource.

1.4.3 Spécificités des stations touristiques de montagne

En termes de gestion de l'eau, les stations touristiques de montagne doivent faire face à plusieurs problématiques spécifiques, en particulier la présence de touristes et d'infrastructures qui leur sont dédiées et la fréquentation touristique qui varie selon la période de l'année (haute et basse saison) et d'une année à l'autre en fonction de la conjoncture économique courante (Reynard, 2000a, 2000b et Bréthaut, 2012). Par rapport à un village de montagne traditionnel, les usages de l'eau sont plus nombreux et diversifiés. De l'enneigement artificiel (Paccard, 2010 ; Serquet et Thalmann, 2011 ; Serquet et Rebetez, 2013) au remplissage des piscines ou à l'entretien des patinoires, en passant par l'arrosage systématique des fleurs sur les balcons, les usages de l'eau dans les stations touristiques se traduisent souvent par une augmentation de la quantité d'eau distribuée qui n'est pas observée dans les communes résidentielles (BLFUW, 2012). Si la station est encore caractérisée par des surfaces agricoles d'une certaine importance (extension et poids économique), l'irrigation et l'abreuvement des animaux y jouent toujours un rôle considérable. La coexistence du tourisme et de l'agriculture est une thématique complexe (Charnay, 2010) qui ne concerne pas que les usages de l'eau, mais l'ensemble du développement durable du territoire. Les deux traduisent les racines paysannes et le fruit de la période de forte croissance économique des Trente Glorieuses (1945-1975). De plus, les territoires de montagne sont souvent concernés par des installations hydroélectriques, qui ajoutent des difficultés supplémentaires à la déjà complexe situation de la gestion de l'eau dans les stations touristiques. L'optique de durabilité représente aujourd'hui une perspective essentielle pour toute réflexion en termes de processus de développement ; en fait, en englobant économie, environnement et social, elle s'avère particulièrement pertinente pour les stations touristiques de montagne (Marcelpoil et Langlois, 2010). La gestion intégrée n'est par contre pas encore appliquée systématiquement sur le territoire suisse, ce qui peut potentiellement porter à des conflits d'usage et des situations critiques ponctuelles dues à la concentration temporelle de la demande en eau. Les usages préférentiels de l'eau dans les stations touristiques de montagne ont des caractéristiques sensiblement différentes par rapport à d'autres régions. Normalement, l'approvisionnement en eau potable a une priorité absolue sur les autres usages, typiquement l'irrigation et la production d'énergie, car il pourvoit aux besoins fondamentaux de la population. L'utilisation de la ressource en eau, afin de garantir l'offre touristique, peut entrer en conflit avec les autres usages et parfois rivaliser avec l'approvisionnement en eau potable (Boulogne, 2010). L'offre originelle comprend les éléments de la ressource (rivières, lacs, cascades) qui deviennent des objets touristiques en raison de leur force d'attraction (Reynard, 2000a). L'offre dérivée regroupe par contre l'ensemble des installations et prestations qui visent à satis-

faire la demande touristique. Il s'agit autant des infrastructures touristiques (piscines, patinoires, installations d'enneigement artificiel) que des services liés à l'eau comme le rafting, le canyoning, etc. (Reynard, 2000a). Les rivalités d'usage de l'eau naissent du besoin, pour les acteurs, de se servir de la ressource en question au même endroit et en même temps. Inévitablement, ces situations de concentration temporelle et/ou spatiale aboutissent au partage de la ressource en eau disponible entre les acteurs. Cette vision n'est valable que sur le plan théorique, où les acteurs ont tous la même influence, car elle ne tient pas compte des intérêts économiques qui se cachent derrière les différents usages. Dans les stations touristiques de montagne, on parle souvent d'usages préférentiels (Reynard, 2000a). Dans ces cas, des rivalités naissent, voyant l'acteur avec un poids économique inférieur se soumettre, souvent aidé par des compensations financières, à l'acteur ayant un poids économique supérieur. Les acteurs les plus influents dans les stations touristiques de montagne sont ceux qui sont directement liés à l'offre touristique et à l'image de la région.

1.4.4 Ressources hydriques et climat

Dans les Alpes, une grande partie des précipitations sont stockées sous forme de neige et de glace. Ce phénomène influence le régime hydrologique des rivières (ACQWA, 2013 ; EEA, 2009 ; OFEV, 2012c) et par conséquent les volumes de ressource hydrique exploitables pour satisfaire la demande générée par le système social (figure 1.2), d'où l'importance de connaître les volumes d'eau actuellement disponibles et d'estimer leur évolution en accord avec les changements climatiques prévus (GIEC, 2007). Dans tout cela, la fonte des glaciers alpins, joue un rôle clé. À la lumière des faits susmentionnés, une réflexion sur les conséquences des changements climatiques sur la gestion de l'eau dans les Alpes est indispensable (CIPRA, 2011 ; Alp-Water-Scarce, 2012). À cause de la complexité de la topographie, des caractéristiques climatiques et de l'unicité du réseau hydrographique, les régions alpines sont concernées par les changements climatiques de façon diversifiée. La réalisation de cette étape implique une investigation approfondie sur la ressource hydrique actuelle pour ensuite estimer la variation future de cette dernière (PNR, 2010). Ce genre de recherche se focalise typiquement sur le rôle du glacier ou celui de la neige stockée sous forme de neige, pour ensuite s'étendre aux autres éléments du réseau hydrographique (Finger et al., 2013), tout en tenant compte des caractéristiques géologiques et géomorphologiques de la zone d'étude (ISSKA, 2011). La précision de l'estimation de l'évolution future du système naturel (figure 1.2) est dépendante de la marge d'erreur des scénarios climatiques utilisés. Dans le contexte alpin, l'utilisation de modèles climatiques régionaux comporte une réduction d'échelle (ou *downscaling*) de ces derniers, sans laquelle les caractéristiques propres de la région

d'étude ne seraient pas prises en compte. En l'état actuel de la recherche et à notre connaissance, cette opération est uniquement possible en Suisse, grâce au travail de Bosshard et al. (2011).

1.5 Questions générales

Le but de ce travail est d'améliorer la compréhension des usages de l'eau dans la région de Crans-Montana-Sierre, de considérer des scénarios d'évolution probables en tenant compte des changements climatiques et socio-économiques, pour enfin proposer, si nécessaire, les contre-mesures souhaitables. Les questions fondamentales auxquelles cette thèse de doctorat cherche une réponse sont donc les suivantes :

- Quels sont les besoins en eau actuels de la région de Crans-Montana-Sierre ?
- Quels seront les besoins de la région à l'horizon 2050 ? Et les ressources hydriques disponibles⁴ ?
- Quels seront les mesures à prendre à l'avenir pour garantir la satisfaction de la demande en eau de la région ?

Les réponses à ces questions mettront en évidence les usages qui pourraient potentiellement causer des problèmes à l'échelle communale ou régionale. Les résultats obtenus permettront ainsi aux acteurs locaux d'avoir une vision plus claire et pragmatique des usages de l'eau et, si nécessaire, de prendre des décisions au préalable, afin d'éviter des problèmes dans le futur. Les changements climatiques et leur renommée catastrophique font parler les médias du monde entier, mais leur impact sur les besoins en eau de la région de Crans-Montana-Sierre, reste à évaluer. Les questions qui se posent sont donc les suivantes :

- Quels seront les impacts des changements climatiques sur les usages de l'eau dans la zone d'étude ?
- Et celles des changements socio-économiques ?

1.6 Hypothèses de travail

L'énonciation des hypothèses de travail permet d'avoir une vue d'ensemble sur les fins de cette thèse de doctorat. Chaque hypothèse est formulée sous forme d'affirmation et sera vérifiée au cours de cette recherche. De caractère général, ces affirmations ne sont pas liées aux spécificités de la zone de Crans-Montana-Sierre et peuvent ainsi être utilisées pour répondre aux mêmes questions dans d'autres régions d'étude dans le cadre de la gestion de l'eau dans les stations touristiques de montagne. Ces hypothèses visent à mieux comprendre certains aspects quantitatifs et qualitatifs des usages de l'eau pour

4. En collaboration avec le WP1.

permettre aux organes responsables de la gestion de l'eau d'avoir une base solide pour prendre leurs décisions, en laissant le moins d'espace possible aux spéculations et en donnant l'image de l'état des choses la moins subjective possible.

Hypothèse n°1 : l'impact des changements climatiques à l'horizon 2050

Les changements climatiques auront une incidence importante sur les usages de l'eau dans la région en 2050. De ce fait, les habitudes des acteurs locaux devront changer. La disparition progressive du glacier de la Plaine Morte engendre des problèmes d'approvisionnement en eau pendant les mois chauds de l'année d'une manière systématique, problème qui devient encore plus important dans le cas où des sécheresses similaires à celles de 1947 ou 2003 se reproduisent.

Hypothèse n°2 : les changements socio-économiques

Les changements socio-économiques ont un impact important sur la demande en eau régionale. Si le développement régional reste inchangé, garantir l'approvisionnement en eau devient de plus en plus difficile, surtout à la lumière d'une quantité de ressources en eau disponibles en constante diminution (cf. hypothèse 1).

Hypothèse n°3 : l'importance de l'évolution démographique

L'évolution démographique est le facteur qui influence le plus la demande en eau des scénarios socio-économiques à l'horizon 2050. Ce facteur prépondérant génère une chaîne de conséquences qui touchent la plupart des aspects liés aux scénarios socio-économiques, comme par exemple la taille de la zone bâtie et sa densité, la surface destinée aux vignes ou encore celle destinée aux prairies ; une série d'évolutions qui modifieront fortement la demande en eau dans le futur.

Hypothèse n°4 : conflits d'usage

L'eau potable est souvent utilisée pour l'irrigation de pelouses, de jardins et de gazons. Par conséquent, l'eau potable utilisée de cette façon représente une tranche importante de la consommation pendant la saison d'irrigation. Si pendant cette période, les précipitations sont moins fréquentes que d'habitude, la quantité d'eau potable utilisée augmente proportionnellement au phénomène climatique, favorisant des conflits d'usage.

Hypothèse n°5 : types d'habitations et consommation d'eau potable

Par rapport aux maisons individuelles et aux villas, la consommation d'eau potable par personne et par jour dans les immeubles est plus stable. Ici la consommation d'eau potable est plus influencée par la présence et l'absence des locataires, alors que la consommation d'eau potable des maisons individuelles est largement influencée par les

conditions climatiques à cause de l'arrosage des jardins. Vu la structure de l'habitat dans la région (prédominance de l'habitat individuel), on doit s'attendre à un fort impact du changement climatique sur la demande en eau potable.

Hypothèse n°6 : évolution de la consommation d'eau d'irrigation

Les volumes d'eau amenés par le réseau d'irrigation mis à disposition de l'agriculture sont largement suffisants pendant les années ne présentant pas de phénomènes climatiques extraordinaires de sécheresse (printanière ou estivale). Ils sont par contre insuffisants lors d'années sèches. À l'avenir, la demande en eau de cet usage de l'eau sera influencée par les changements climatiques d'une manière importante, ce qui déterminera une nette augmentation de la quantité d'eau nécessaire pour la satisfaire.

Hypothèse n°7 : la durabilité de la pratique de l'enneigement artificiel

L'altitude minimale de l'enneigement artificiel est influencée par les changements climatiques. De ce fait, la partie du domaine skiable équipée de canons à neige varie. Les besoins futurs d'eau pour l'enneigement artificiel resteront par conséquent dans la fourchette actuelle, en mettant en évidence la durabilité de la pratique.

Hypothèse n°8 : les mesures à prendre

La gestion actuelle de la ressource hydrique est à revoir. La division politique de la zone d'étude implique une fragmentation de la gestion de l'eau qui pourrait être évitée en adoptant une gestion intégrée de la ressource. La rationalisation du réseau d'approvisionnement de l'eau potable et de l'infrastructure permettant l'irrigation dans la région est fondamentale pour réduire les pertes et économiser également de l'argent.

1.7 Structure du travail et méthodes

Le travail a été structuré en trois parties principales : la description du système actuel, la quantification des besoins actuels et les prévisions des usages de l'eau en 2050 (figure 1.3 ; Reynard et Bonriposi, 2012). Le but de la description du système actuel est de mieux connaître la région d'étude, en mettant en évidence les caractéristiques locales des usages de l'eau et les infrastructures communales. Le manque chronique d'informations récentes a impliqué des entretiens avec la plupart des responsables de la gestion de l'eau, ce qui a permis de préciser le fonctionnement de la région en ce qui concerne la gestion de l'eau. Après la récolte des informations, chaque commune a reçu une proposition de texte la concernant avec la possibilité d'amener des corrections. Cette récolte a largement profité des études déjà réalisés (principalement le travail de Reynard, 2000a), des statistiques existantes (OFS et Office de la statistique

du canton du Valais), de la documentation fragmentaire disponible sur les sites Internet des communes de la région et des portails d'information locale. La deuxième partie concernant la quantification s'occupe de récolter, uniformiser et interpréter les données volumétriques concernant les usages de l'eau (eau potable, irrigation, etc.). Le manque de données quantitatives, la non-coopération de certaines communes et les longs temps bureaucratiques ont compliqué et fait changer à plusieurs reprises la démarche prévue. L'accent a enfin été mis sur la variation mensuelle des besoins et sur la compréhension des facteurs qui la déterminent. A chaque hypothèse posée, une investigation plus approfondie a été menée, ce qui a permis de préciser les observations précédentes. À cause de l'impossibilité de quantifier de manière traditionnelle certains usages, comme l'irrigation des cultures ou l'enneigement artificiel, un changement de perspective radical s'est imposé : à l'aide du modèle WEAP (Höllermann et al. 2010 ; Mounir et al., 2011 ; Reynard et Bonriposi, 2012 ; Bonriposi et Reynard, 2013), la demande en eau des cultures non satisfaite par les précipitations a été calculée. Ceci a permis une comparaison entre le besoin théorique et l'apport en eau des bisses de la région, enregistré par un réseau de mesures construit de manière *ad hoc*. En ce qui concerne l'enneigement artificiel, nous avons utilisé les informations fournies par les responsables des remontées mécaniques concernant les conditions idéales pour enneiger artificiellement afin de calculer le nombre d'heures d'enneigement potentiel et les effets sur la consommation d'eau. Les prévisions des usages de l'eau en 2050 prennent en compte à la fois des scénarios climatiques et des scénarios socio-économiques pour le futur. En collaboration avec le groupe de suivi RégiEau, constitué par des représentants des acteurs locaux, l'équipe du projet MontanAqua a élaboré quatre visions socio-économiques concernant le développement de la région de Crans-Montana-Sierre à l'horizon 2050 (Schneider et Rist, 2013). Ces scénarios, basés sur l'état actuel des connaissances, ont permis d'estimer la quantité d'eau utilisée en 2050 dans la région d'étude (figure 1.3). Finalement, les résultats seront discutés en mettant en évidence les enseignements les plus importants, mais également les limites de cette étude. Des recommandations pour la gestion de l'eau seront également élaborées. Bien qu'elles aient été conçues expressément pour la région de Crans-Montana-Sierre, elles pourront servir de guide pour d'autres zones présentant des caractéristiques similaires.

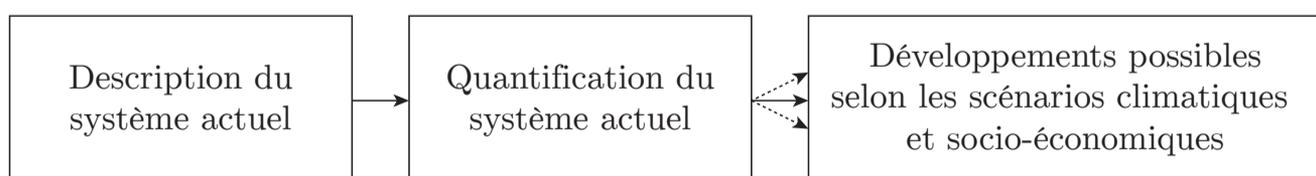


Fig. 1.3 – Les étapes du travail.

Deuxième chapitre

La région d'étude

2.1 Introduction

La région de Crans-Montana-Sierre se situe au sud de la Suisse, dans le canton du Valais (figure 2.1). Le principal cours d'eau du canton est le Rhône, qui prend sa source à l'extrémité nord-est du canton. La vallée du Rhône est comprise entre les Alpes pennines, au sud, et les Alpes bernoises, au nord, qui provoquent une double situation d'abri qui explique la relative sécheresse de la région à basse altitude (Reynard, 1995). Par conséquent, le Valais est la région la plus sèche de Suisse, avec des précipitations moyennes en plaine nettement inférieures au reste du pays.

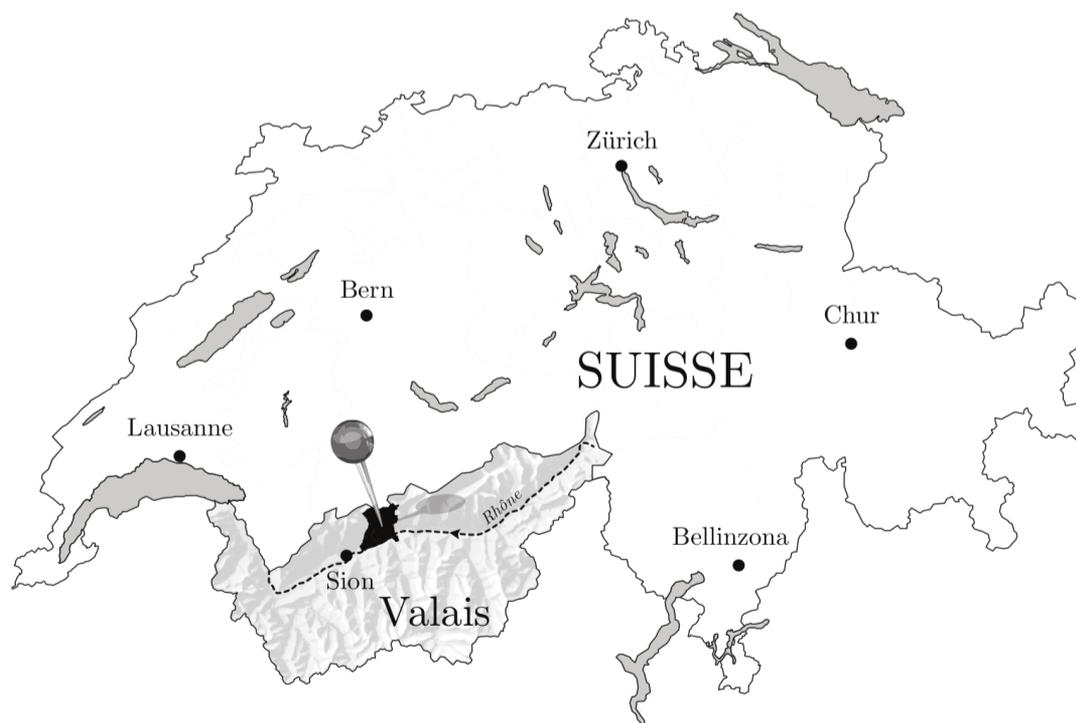


Fig. 2.1 – Localisation de la région d'étude

Source du fond de carte : Swisstopo.

Lors du dernier siècle, la région de Crans-Montana-Sierre a connu une forte croissance démographique qui a plus que quadruplé le nombre de résidents, en passant de moins de 9'000 individus en 1910 à plus de 36'000 en 2010 (OVS, 2011). La zone présente trois groupes de communes (figure 2.2) : la ville de Sierre, située dans la plaine du Rhône avec environ 15'500 habitants (OVS, 2011), les communes périurbaines situées sur le coteau de Sierre et entourées de vignes (Miège, Venthône, Veyras ainsi que St-Léonard), et les communes du Haut-Plateau⁵ où est située la station touristique de Crans-Montana, fameuse dans le monde entier principalement pour son tournoi de golf, ce qui détermine un important découpage économique altitudinal (Reynard, 2001). La station touristique de Crans-Montana a été créée à partir de 1892. Elle a profondément transformé l'économie de la région, avec l'apparition des cliniques d'altitude, du tourisme hivernal, des terrains de golf et d'un nombre toujours plus grand d'appartements de vacance (Bachmann, 1976). La ville de Sierre, située dans la plaine du Rhône, se caractérise par trois zones principales : l'espace urbain, la zone industrielle et les surfaces agricoles. Les villages du coteau de Sierre (figure 2.7), sont des communes résidentielles où la culture de la vigne joue encore un rôle très important dans l'économie et dans la culture locale. L'importance de l'agriculture pour les communes faisant partie de la station touristique de Crans-Montana est grande en termes d'hectares

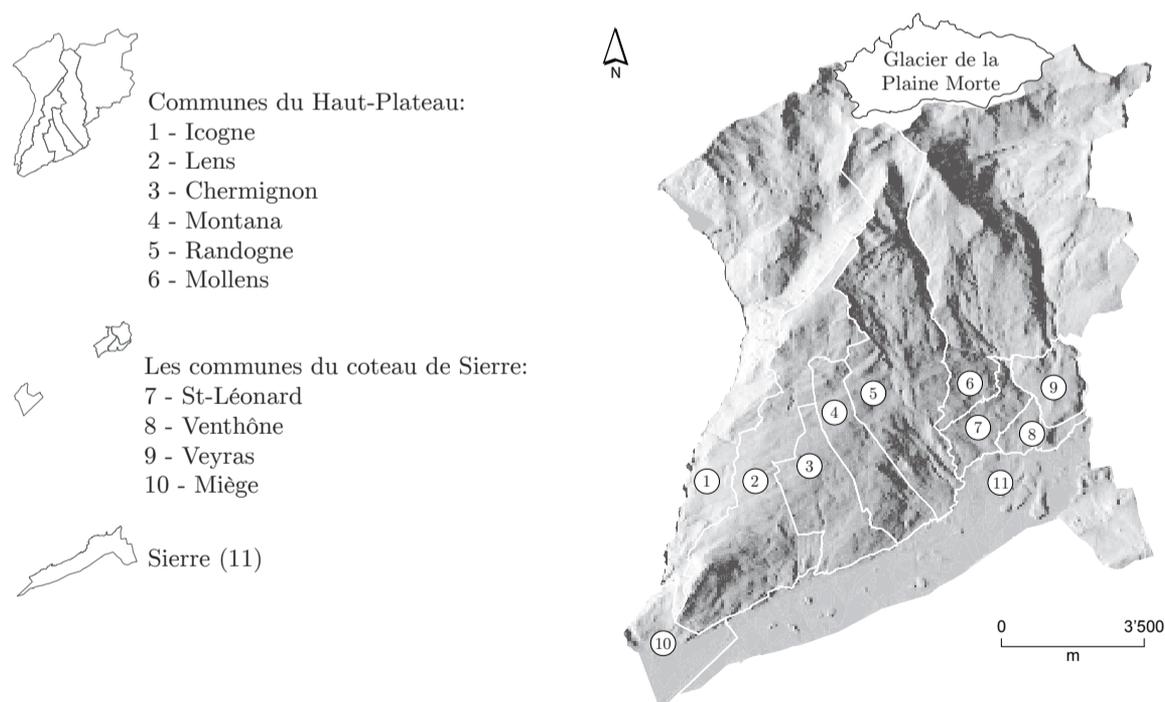


Fig. 2.2 – Les communes de la région de Crans-Montana-Sierre.

Source : Service des registres fonciers et de la géomatique du canton du Valais (modifié).

5. Crans-Montana n'est pas un plateau au sens géomorphologique du terme, en ne présentant pas des couches géologiques sédimentaires empilées horizontalement (Reynard, 2005b).

à cause de l'extension des prairies et des pâturages, mais les moteurs économiques sont ici les parcours de golf, les remontées mécaniques et les cliniques de montagne (figure 2.8). L'accès à l'eau a marqué profondément l'histoire de la région déjà à partir du Moyen-Age. La ressource était relativement abondante mais difficilement accessible (Reynard, 2001), ce qui a porté à la construction des bisses (canaux d'irrigation traditionnels) qui ont permis d'intensifier l'irrigation des prairies - qui se pratique environ 4 à 5 fois par année - et des alpages - qui sert également d'abreuvement du bétail et épandage du purin. Pour ce faire, l'eau était prise au fond du vallon de la Liène et de la Raspille (Mariétan, 1948 et Reynard, 1995). L'irrigation des prairies est une pratique ancienne, remontant en tout cas au 13e siècle; l'arrosage des vignes s'est par contre généralisé beaucoup plus tard, durant le 19e siècle (Reynard, 2001).

2.1.1 Structure géologique et évolution géomorphologique

La région de Crans-Montana-Sierre se situe dans les Alpes calcaires (comprenant les nappes de Sion-Courmayeur, Wildhorn et Diablerets) du domaine Helvétique au nord et dans les nappes du domaine Pennique au sud (figure 2.3). Du point de vue de la tectonique, la zone se caractérise par la présence de failles très persistantes, de séries d'anticlinaux et de synclinaux (figure 2.3). Dans une perspective géomorphologique la région d'étude est profondément marquée par les processus glaciaires, qui ont été prépondérants lors des glaciations quaternaires, notamment par l'occupation de la vallée par le glacier rhodanien (Reynard, 2000a) et, plus récemment par l'évolution de la plaine alluviale du Rhône (Laigre et al., 2010). D'un volume d'environ 0.8 km³ (Hüss et al., 2011, 2013), le glacier en cuvette de la Plaine Morte (cf. chapitre 3.2) surmonte la région en reposant sur un milieu karstique à 2'750 m d'altitude. Les eaux de fonte de ce dernier alimentent les nombreuses sources karstiques présentes dans la région (Pütz et al., 2003).

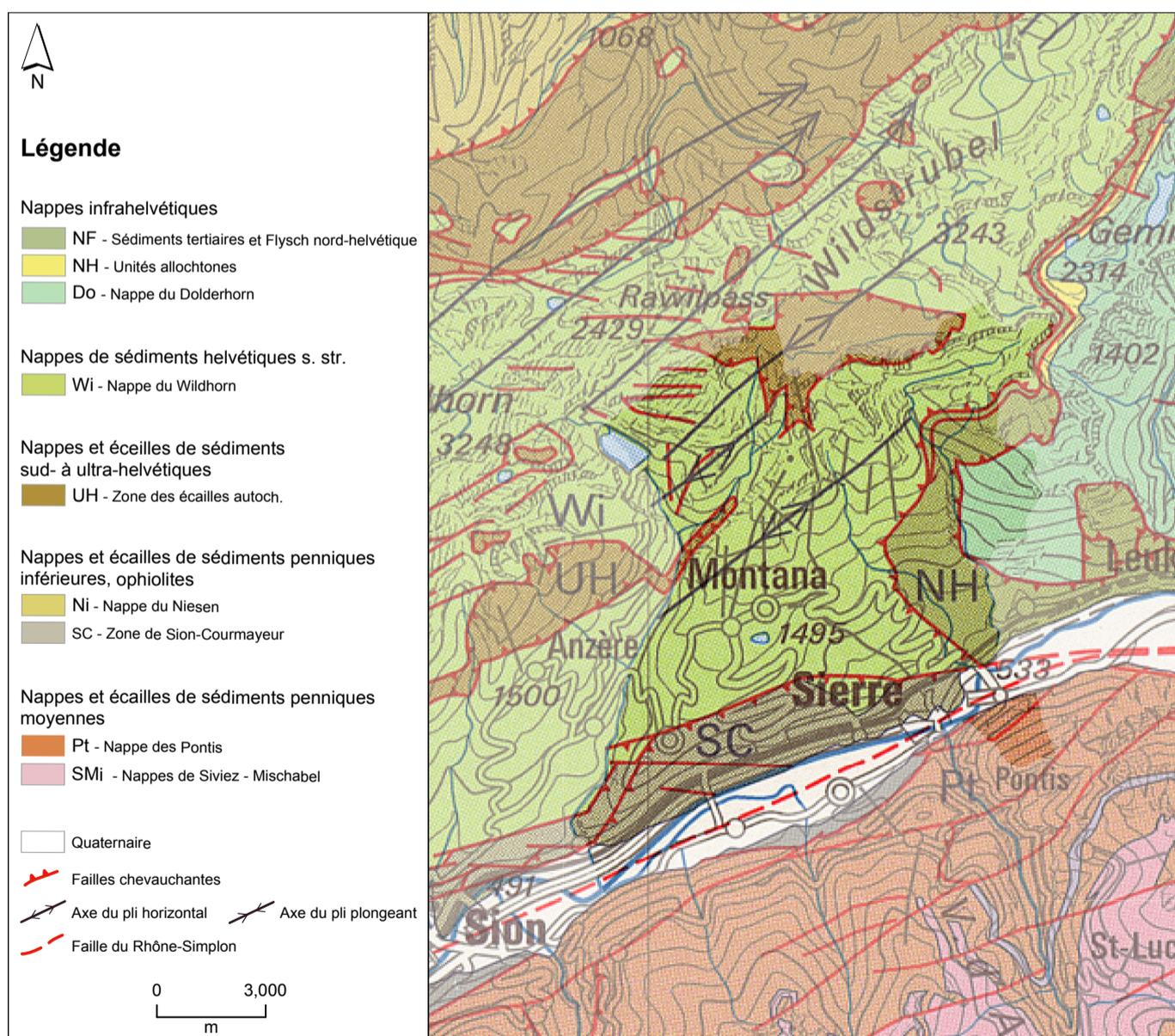


Fig. 2.3 – Carte tectonique de la région de Crans-Montana-Sierre.

Extrait de la carte tectonique de la Suisse au 1:500'000 (2005) (modifié).

2.1.2 Climat, végétation et agriculture

Le climat de la région est un des facteurs qui a permis le développement de la station touristique au début du siècle dernier (Doriot Galofaro, 2005a). L'ensoleillement extraordinaire (plus de 2'000 heures par année) qui caractérise le Haut-Plateau (Bouët, 1948) convient à certains convalescents, aux asthmatiques, aux tuberculeux pulmonaires après la cessation de la fièvre et aux formes extra-pulmonaires de la tuberculose (Guillaume, 1991). En 1897, Christian Bühler, pharmacien à Clarens, décrivait les caractéristiques climatiques valaisannes de la manière suivante :

« Le Valais central [...] , ainsi que les principales vallées latérales, possèdent les caractères d'un climat extrême : étés chauds et hivers froids. [...] La sécheresse du climat de la vallée du Rhône va en augmentant de Martigny à Brigue ; son maximum se trouve entre Sierre et Brigue. »

Les climogrammes de Sion (482 m) et de Montana (1427 m)⁶ (figure 2.4 et 2.5), montrent les importantes différences de température (Sion enregistre des températures nettement plus hautes tout au long de l'année) et de précipitations (Montana peut compter sur une quantité de précipitations considérablement plus importante que Sion, surtout pendant l'hiver) entre les deux localités. Les gradients de précipitations et température en déterminent un troisième, celui d'évapotranspiration, qui diminue avec l'altitude. Comme on pouvait s'y attendre, la végétation (figure 2.6) et l'agriculture sont fortement influencées par les caractéristiques climatiques de la région de Crans-Montana-Sierre. L'extraordinaire ensoleillement, dû à l'exposition de la région, favorise la culture des vignes dans l'étage collinéen jusqu'à une altitude d'environ 800 m. Le Haut-Plateau, se situe entre l'étage montagnard et subalpin et se caractérise par des forêts d'épicéas, pins, sapins et mélèzes, mais également par de vastes surfaces consacrées à la prairie et aux pâturages.

6. Les valeurs pour la période 1981-2010 ne sont pas disponibles à cause du déplacement de la station de mesure pendant le mois de février 2009.

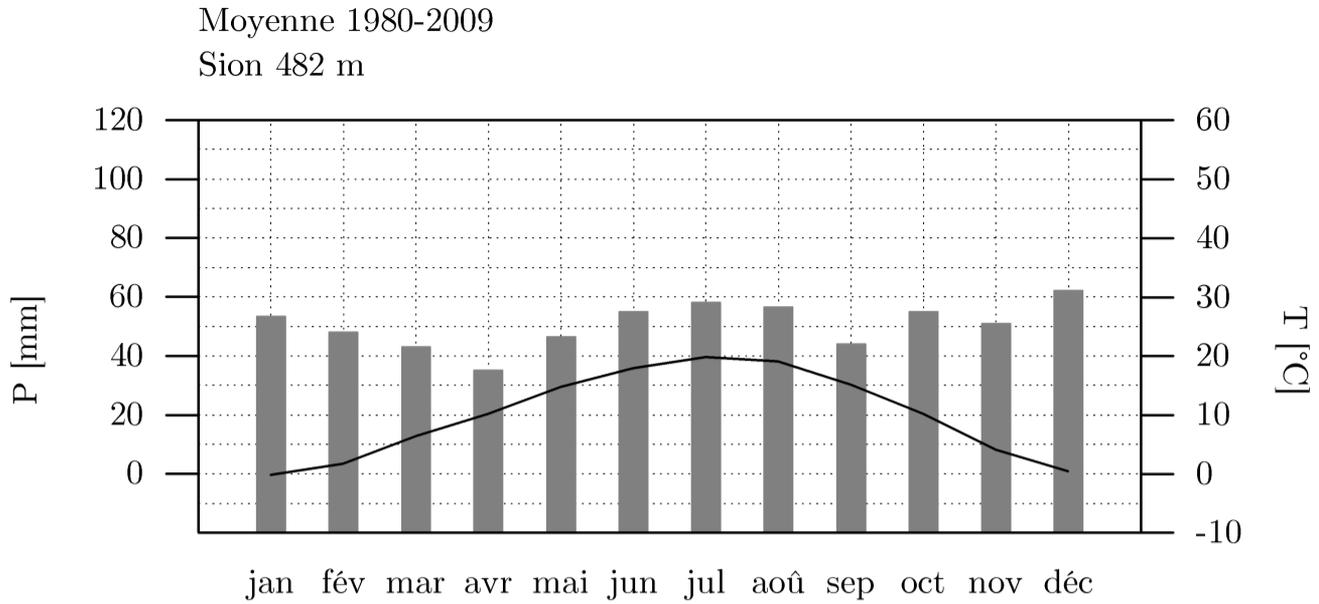


Fig. 2.4 – Climogramme de Sion (1980-2009).

Source des données : MétéoSuisse.

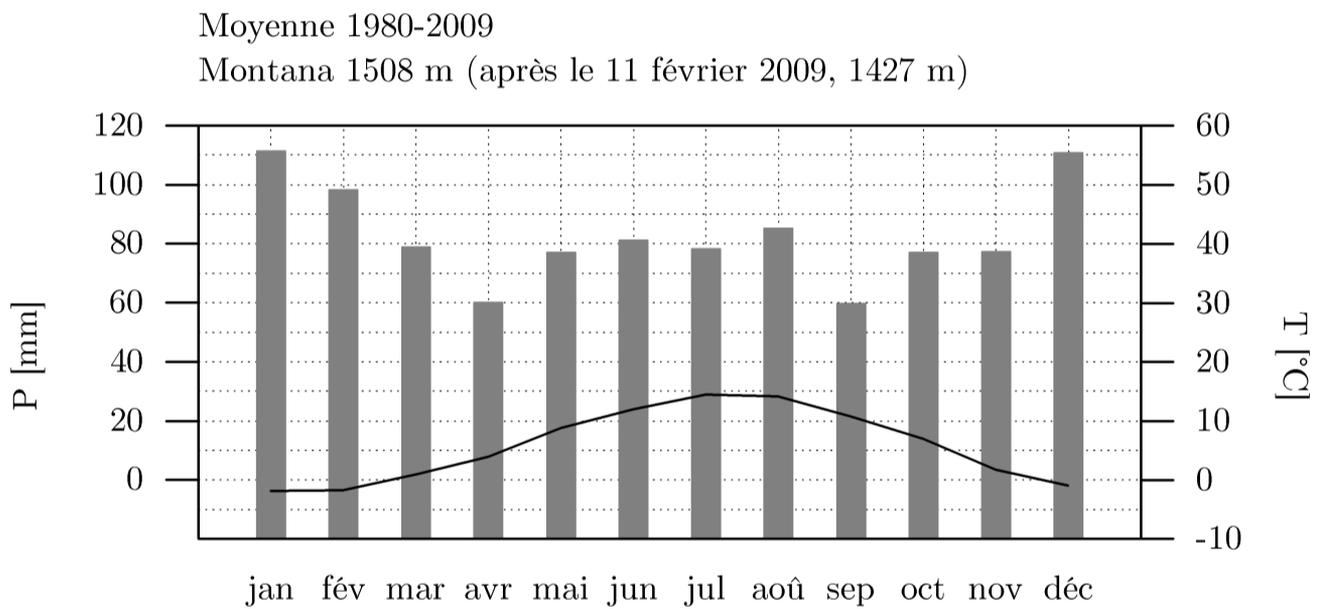


Fig. 2.5 – Climogramme de Montana (1980-2009).

Source des données : MétéoSuisse.

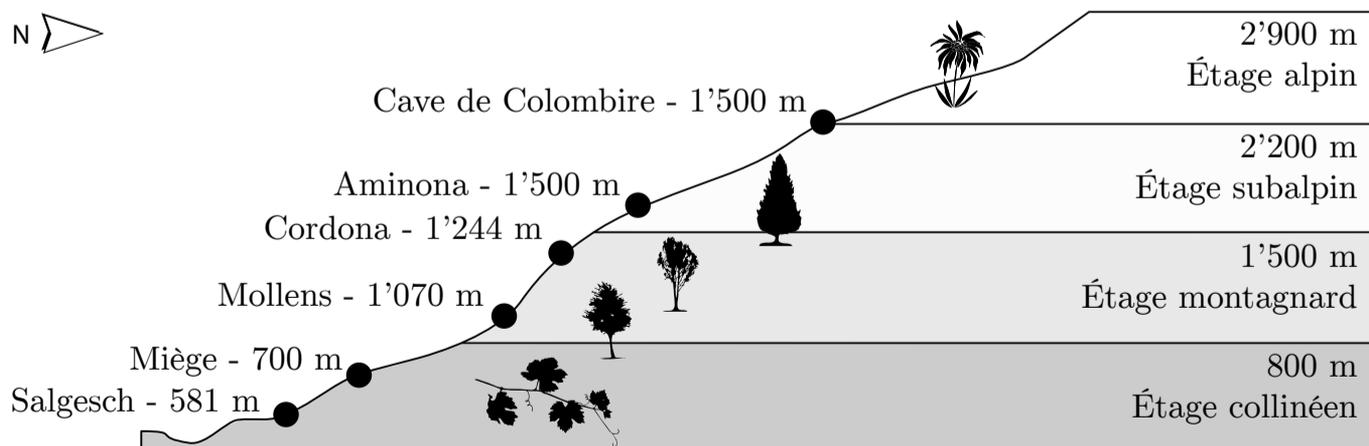


Fig. 2.6 – Étages de la végétation.

Source : Werner, 1988 (modifié).

2.1.3 Territoire et société

La morphologie du territoire et son climat, conjointement aux relatives difficultés d'accès à l'eau, ont influencé la vie des habitants de la région pendant des siècles. Les activités d'une société rurale comme celle qui existait à Crans-Montana-Sierre, en tout cas jusqu'à la fin du 19e siècle, ont été contraintes par ces facteurs naturels. Le montant de surfaces disponibles pour l'agriculture et l'élevage a par contre été toujours très favorable à la population. La venue de la modernité et les conséquentes transformations socio-économiques ont progressivement détaché l'homme du territoire, qui ne subit plus les contraintes naturelles mais, au contraire, les exploite. En 1902, le Haut-Plateau n'était qu'un lieu de pâturages, où les mayens et l'Hôtel du Parc étaient les seules constructions (Doriot Galofaro, 2005b). Aujourd'hui, sous la pression démographique et celle du développement de la station touristique de Crans-Montana, ce panorama a bien changé.

2.1.4 Développement et état du tourisme

Déjà en 1976, Fritz Bachmann, professeur de géographie à l'Université de Zurich, affirmait que la station de Crans-Montana était le résultat négatif d'un manque de planification et d'une insuffisante coordination qui devrait servir d'exemple à ne pas suivre pour la transformation des zones de montagne (Bachmann, 1976). Selon lui, la collaboration entre les responsables du développement de la région a laissé beaucoup à désirer : chaque commune s'est développée et a construit selon les critères imposés par ses apports financiers (Rudaz, 2009), sans véritable collaboration avec les communes voisines. Il termine avec une phrase emblématique⁷ :

« Les périodes de crise économique projettent leur ombre même et surtout sur les plateaux les plus ensoleillés ».

Même après plus de trente ans, les observations de Bachmann (1976) sont plus que jamais actuelles. Après une période de croissance incontrôlée sans aucune planification à long terme, la station de Crans-Montana se trouve surdimensionnée et moins attractive par rapport aux autres stations touristiques valaisannes. Le 25 août 2012, pendant la conférence publique de l'APACH, cette situation a été évoquée par plusieurs intervenants et peut être résumée de la manière suivante : le manque de planification du développement de la station a porté a provoqué un surendettement des communes concernées qui a limité les investissements permettant d'améliorer l'offre touristique qui, pourtant, a accumulé une bonne vingtaine d'années de retard par rapport à la concurrence.

7. Traduction du texte original en italien.

2.2 La gestion de l'eau dans la zone d'étude

2.2.1 Entre droits ancestraux et besoins actuels

Dans la région de Crans-Montana-Sierre, l'esprit d'indépendance des communes, phénomène très accentué au Valais, implique une gestion de l'eau principalement à l'échelle communale et non à celle du bassin versant (cf. figure 3.1). Les usages de l'eau dans la zone d'étude sont encore influencés par des édits et des droits médiévaux (Reynard, 2000a), par des accords verbaux (Bréthaut, 2012) et par des collaborations ponctuelles entre municipalités. Aux entités communales se superposent ensuite les consortages d'irrigation, systèmes communautaires qui fonctionnent de manière similaire à un club, où l'affiliation permet d'avoir droit à l'exploitation de la ressource (Reynard, 2012). Étant donné la complexité des interactions entre les différents acteurs impliqués dans cette région, le WP3 leur a été consacré (Homewood, in prep. ; Schneider et Homewood, 2013). Malgré l'existence de ce travail détaillé, dans le chapitre 2.2.2 les acteurs locaux impliqués dans la gestion de l'eau sont introduits de manière synthétique. L'accent est mis également sur les interactions entre les différents acteurs et leur localisation géographique. Même si ce travail vise principalement à décrire et quantifier les usages de l'eau, la présentation des principales caractéristiques de la gestion de l'eau dans la région de Crans-Montana-Sierre se révèle indispensable pour avoir une vue d'ensemble de la thématique.

2.2.2 Les acteurs principaux de la gestion de l'eau

Dans ce chapitre sont présentés de manière concise les acteurs principaux impliqués dans la gestion de l'eau de la zone d'étude. De cette manière, le lecteur peut se faire une idée du nombre d'acteurs et de la complexité et fragmentation de la gestion de l'eau pratiquée à l'heure actuelle.

Les communes En Suisse, la commune est la plus petite unité administrative : elle est gouvernée par le maire, le syndic ou le président et les représentants des pouvoirs exécutif et législatif. La zone d'étude comprend 11 communes ; chacune a ses propres responsables de la gestion de l'eau, au moins un pour la partie institutionnelle et un pour la partie technique. Sierre est la seule commune qui confie l'exploitation du réseau d'eau à une société anonyme (Sierre-Energie SA). Les six municipalités d'Icogne, Lens, Chermignon, Montana, Randogne et Mollens ont constitué l'Association des Communes de Crans-Montana en 2004 (ACCM, 2012). Malgré cela, chaque commune garde une forte indépendance en ce qui concerne la gestion de l'eau.

Les consortages d'irrigation Le consortage d'irrigation est une association dédiée à la gestion de l'eau en tant que bien collectif et local visant à satisfaire les besoins en eau de l'agriculture. Comme déjà annoncé dans le chapitre précédent, l'affiliation à un consortage donne la possibilité d'utiliser la ressource en eau. Les consortages représentent donc une voie alternative entre la privatisation et le contrôle par l'État (Reynard, 2012). Les consortages d'irrigation de la région de Crans-Montana-Sierre sont liés à l'existence d'un « bisse », un canal d'irrigation traditionnel, qui permet d'amener l'eau depuis les rivières encaissées au fond des vallons de la Liène et de la Raspille.

Remontées Mécaniques Crans-Montana-Aminona SA La société qui exploite le domaine skiable de Crans-Montana-Aminona (CMA SA) utilise l'eau principalement pour la production de neige artificielle. Les communes de l'ACCM en sont actionnaires pour environ un tiers (qui n'est pas également réparti entre les communes) (CMA SA, 2012).

Lienne SA Cette société produit et distribue l'électricité qu'elle fabrique en exploitant le barrage d'accumulation de Tseuzier, construit dans le bassin versant de la Liène. Une partie de l'eau stockée dans le lac artificiel est également amenée sur le Haut-Plateau. Lienne SA est le seul acteur qui exploite l'eau pour produire un bien, l'électricité, qui sera utilisé en dehors de la zone d'étude.



Fig. 2.7 – Photos prises dans les communes du coteau de Sierre.

En haut : le vignoble de St-Léonard ;
En bas à gauche : les vignes de Miège dès Venthône ;
En bas à droite : vaches *Highland* au pâturage à Miège.



Fig. 2.8 – Photos prises dans les communes du Haut-Plateau.

En haut à gauche : arrivée des télécabines de CMA SA à Cry d'Er (2'267 m) ;
En haut à droite : l'Étang Grenon à Montana ;
En bas à gauche : golfeur sur le parcours Ballesteros ;
En bas à droite : le Haut-Plateau sous la neige.

Troisième chapitre

Le système actuel de gestion des usages de l'eau

3.1 Introduction aux usages de l'eau

Dans cette partie du travail, le système actuel va être décrit et analysé en cherchant à comprendre au mieux ses caractéristiques et son fonctionnement. Il est donc tout d'abord nécessaire de définir qu'est-ce que l'on entend par « usages de l'eau » et quelle classification d'usage sera adoptée.

L'eau répond à des besoins de l'homme qui deviennent de plus en plus nombreux et complexes. Il en est résulté une transition croissante entre la ressource limitée et la multiplication des besoins, tension qui a souvent débouché sur une opposition entre deux approches de gestion : une approche hydrocentrée, visant à coordonner les usages en fonction de la disponibilité de la ressource, et une approche qualifiée d'urbano-centrée, qui vise au contraire à organiser la gestion de la ressource en fonction de l'évolution des besoins (Reynard, 2008). Afin de structurer ce chapitre, nous avons décidé de nous appuyer sur des listes préexistantes d'usages possibles de l'eau en Suisse.

Plusieurs auteurs ont proposé et/ou utilisé des classifications d'usages de la ressource en eau. Nous avons opté pour celle proposée par Reynard et al. (2001). La classification en question est résumée dans le tableau 3.1, où les usages présents dans la région de Crans-Montana-Sierre sont mentionnés en italique. La classification proposée par Reynard et al. (2001) se concentre sur l'usage matériel de l'eau, sur la catégorie d'utilisation et sur le type d'usager. Cette étude permet de déterminer comment l'eau est une ressource fortement exploitée pour différents usages concurrents (Reynard et al., 2001).

N°	Catégories d'usage	Types d'utilisation par catégorie	Types d'utilisateurs
1	Milieu vital	<i>Nourriture, reproduction</i>	Organismes vivants, animaux et végétaux
2	Consommation	<i>Prélèvement d'eau de boisson</i>	Collectivités publiques (producteurs), ménages (consommateurs finaux).
3	Production	<i>3.a Prélèvement d'eau industrielle</i> <i>3.b Refroidissement des centrales thermiques</i> <i>3.c Prélèvement d'eau agricole (irrigation)</i> <i>3.d Drainage des zones humides pour l'agriculture</i> <i>3.e Production d'eaux minérales</i> <i>3.f Infrastructure de loisirs et tourisme (piscines, etc.)</i>	Entreprises privées, industrielles ou artisanales Entreprises privées ou mixtes Entreprises agricoles privées, associations d'irrigants Entreprises agricoles privées et collectivités publiques Entreprises privées Entreprises privées ou collectivités publiques
4	Production d'énergie	<i>4.a Hydroélectricité (avec barrage et chute)</i> <i>4.b Hydroélectricité (au fil de l'eau)</i>	Entreprises privées ou mixtes Entreprises privées ou mixtes
5	Transport et absorption de déchets et de sédiments	<i>5.a Transport et absorption des rejets ménagers, industriels et agricoles</i> <i>5.b Transport de sédiments</i>	Collectivités publiques (producteurs), ménages et entreprises (consommateurs finaux) -
6	Support à des activités économiques ou récréatives	<i>6.a Navigation commerciale (lacs et rivières)</i> <i>6.b Navigation de plaisance (lacs et rivières)</i> 6.c Extraction de granulats 6.d Pêche commerciale <i>6.e Pêche sportive (lacs et rivières)</i>	Entreprises privées ou publiques Particuliers Entreprises privées et collectivités publiques Entreprises privées ou pêcheurs professionnels indépendants Pêcheurs particuliers, sociétés de pêche
7	Récréation	<i>7.a Paysage</i> <i>7.b Sport</i> 7.c Thermalisme	Particuliers (indigènes et visiteurs d'une région)
8	Médicale	Thermalisme	Cliniques (producteurs), particuliers (consommateur finaux)
9	Transformations géomorphologiques	<i>9.a Modelé du relief</i> <i>9.b Régulation du cycle hydrologique</i>	Collectivités publiques (producteurs), population et entreprises (consommateurs finaux)
10	Réserve stratégique	10.a Réserve en cas de guerre 10.b <i>Réserve incendie</i>	Collectivités publiques, population

Tab. 3.1 – Caractéristiques principales des biens et services fournis par l'eau.

Source : Reynard et al., 2001.

En italique, les usages présents à Crans-Montana-Sierre.

3.2 Le milieu vital

3.2.1 Définition du milieu vital

Afin d'appréhender les biens et les services fournis par l'eau à un endroit donné, il faut souligner que la ressource en eau n'est pas à disposition exclusive de l'homme, les organismes vivants étant aussi à considérer comme des usagers. Les animaux, les végétaux et tous les autres organismes vivants appartenant aux autres règnes biologiques (Cavalier-Smith, 2004) nécessitent un milieu vital permettant de satisfaire leurs besoins en eau. On peut ainsi considérer que les organismes vivants exploitent l'eau pour satisfaire leurs besoins primordiaux en s'adaptant à la variabilité spatiale et temporelle de la ressource. Dans un premier temps, nous présenterons brièvement les principales composantes de l'hydrosystème (cf. chapitre 3.2.2), avant d'évaluer la qualité de l'hydrosystème régional en tant que milieu vital.

3.2.2 Les composantes principales de l'hydrosystème

Ce chapitre vise à décrire les composantes principales de l'hydrosystème de la région de Crans-Montana-Sierre (figure 3.1) en partant de l'amont, c'est-à-dire du glacier de la Plaine Morte, pour arriver au Rhône.

Le glacier de la Plaine Morte

Le glacier de la Plaine Morte est situé dans le massif du Wildstrubel à 2'750 m d'altitude et recouvre une surface d'environ 10 km². En dépit de sa renommée touristique internationale, les caractéristiques naturelles du glacier sont relativement peu connues. Ainsi, jusqu'à récemment, on ne connaissait ni son volume (Hüss et al. 2010, 2013), ni les quantités d'eau coulant vers le canton de Berne, situé au nord, ou vers le Valais, situé au sud. Afin de combler ces lacunes, plusieurs études ont été lancées dans le cadre du PNR 61.

La Plaine Morte, comme la majorité des glaciers des Alpes, est en phase de retrait depuis plusieurs décennies, n'arrivant pas à compenser la fonte estivale par les précipitations neigeuses hivernales. Trois quarts des écoulements qui ont lieu pendant la fonte des neiges (qui a une durée de 2-4 mois) et qui représentent 60 à 80% des précipitations annuelles, s'écoulent par voie souterraine (Wildberger, 1981). Afin de mieux comprendre ce phénomène, l'Institut suisse de spéléologie et de karstologie (ISSKA) a réalisé un modèle hydrogéologique tridimensionnel qui s'étend aussi du côté bernois (ISSKA, 2011).

Ce modèle, réalisé dans le cadre du PNR 61, permet de mieux définir l'écoulement des

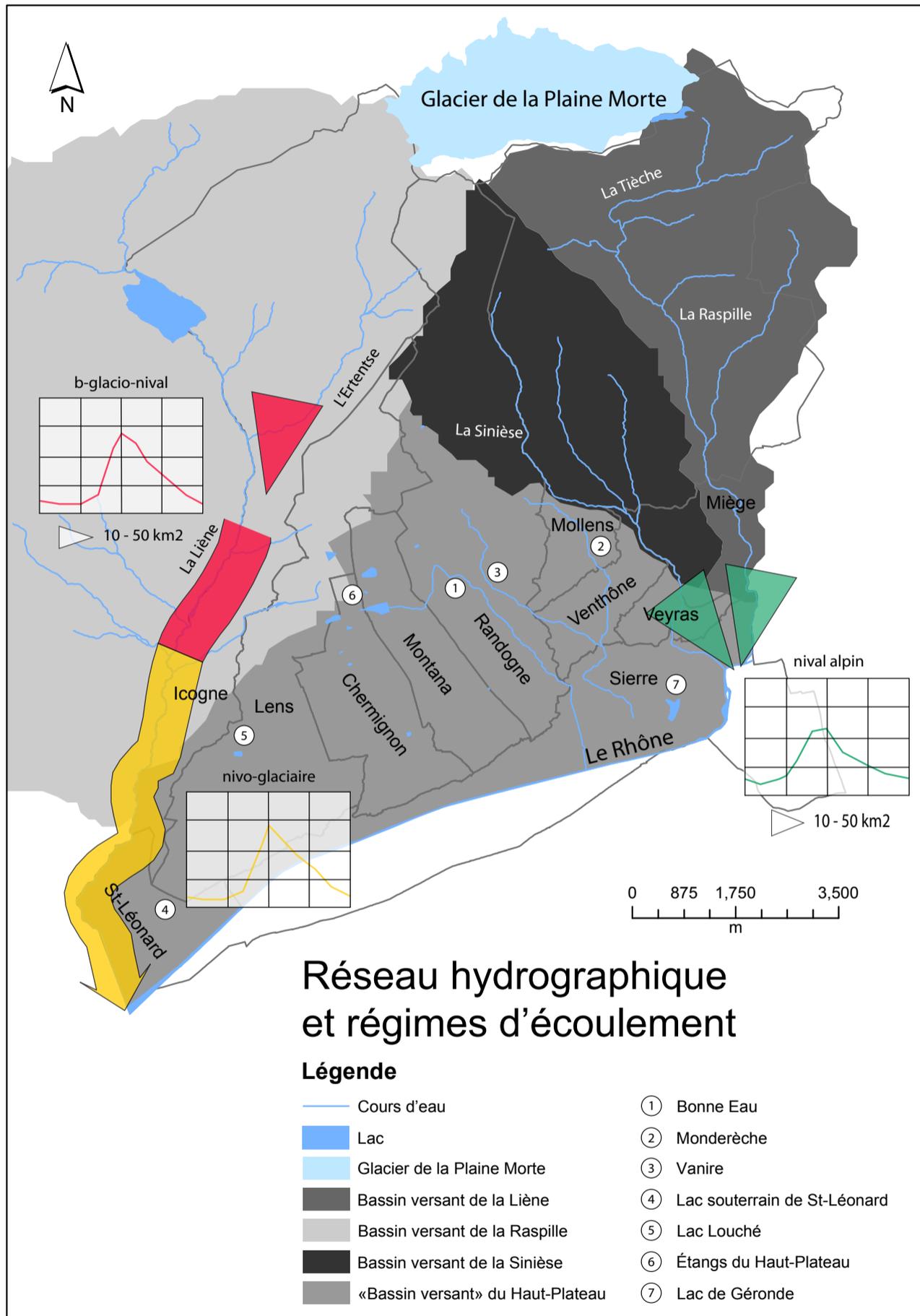


Fig. 3.1 – Réseau hydrographique de la région d'étude.

Source : Service des registres fonciers et de la géomatique du canton du Valais (modifié) et Weingartner et Aschwanden, 1992.

eaux souterraines et propose des modifications de la morphologie des bassins versants dans une région géologiquement aussi complexe que les nappes helvétiques (Weber, 2010). La prospection géophysique (radar géologique) menée par Matthias Hüss et Martin Hoelzle (WP1) a permis de préciser le volume de glace actuel (0.8 km^3) (annexe 1) et de cartographier les variations d'épaisseur du glacier (moyenne 96 m, maximale 235 m).

La contribution hydrologique et hydrogéologique du glacier a fait l'objet de plusieurs expériences au sein du WP1 (avec la collaboration marginale des membres du WP2 et 3), dont l'investigation avec des traceurs naturels et fluorescents (annexe 1), la modélisation karstique, la modélisation de la fonte du glacier et les projections des changements climatiques (Finger et al. 2013). Les expériences scientifiques menées ont porté aux conclusions suivantes :

1. Aujourd'hui, la plupart de l'eau de fonte pendant les périodes les plus chaudes de l'été est évacuée à travers des canaux sous-glaciers. Pendant les périodes de fonte les plus intenses, la pression de l'eau augmente dans le glacier et, par conséquent, l'eau de fonte surmonte les dépressions topographiques du bassin glaciaire pour ensuite suivre le thalweg en direction du nord (vers le Trübbach). Pendant la saison d'hiver, l'eau de fonte est piégée dans les dépressions topographiques du bassin glaciaire, ce qui détermine son infiltration dans le système karstique et la conséquente alimentation des nombreuses sources karstiques de la région.
2. La composition isotopique de l'eau des sources karstiques autour du glacier indique que l'eau karstique est principalement composée de l'eau de fonte des neiges au printemps, de l'eau de fonte du glacier dans la deuxième moitié de l'été et de précipitations locales à l'automne.
3. Les scénarios climatiques indiquent qu'il y aura une augmentation de la fonte des glaciers d'ici à 2050 et une ultérieure drastique augmentation à l'horizon 2100. Ces projections indiquent que le ruissellement durant les mois les plus chauds de l'été s'intensifiera. Par conséquent, le risque de débordement des lacs glaciaires augmentera. Comme la plupart des eaux de fonte de surface de la Plaine Morte sont amenées vers le Trübbach, les sources karstiques les plus petites profiteront de cette alimentation en eau supplémentaire.
4. À la fin du 21e siècle, la taille de la Plaine Morte sera considérablement réduite, ce qui diminuera la fonte du glacier au minimum. La composition isotopique de l'eau des sources karstiques révèle que pendant la deuxième partie de l'été, l'eau de fonte du glacier y joue un rôle très important. La diminution de la fonte du glacier affectera la quantité d'eau qui alimente les sources de manière conséquente.
5. Globalement, on peut conclure qu'à l'avenir les changements climatiques affecte-

ront lourdement l'alimentation des sources karstiques pendant la deuxième partie de l'été. Par contre, à cause de l'invariance des précipitations, la ressource en eau disponible pendant le reste de l'année ne variera pas significativement.

Les principaux bassins versants

En Suisse, le périmètre d'un bassin versant ne correspond que rarement au périmètre politico-administratif et ainsi, dans la région d'étude, les bassins versant se situent sur plusieurs communes (figure 3.1). Il faut également remarquer que, en milieu karstique, les bassins versants superficiels ne correspondent pas aux bassins versants souterrains et que l'écoulement souterrain est important. La région d'étude peut être divisée en quatre bassins versants superficiels : Liène, Raspille, Sinièse et Haut-Plateau. Le bassin versant de la Liène se trouve à l'ouest de la région d'étude, principalement sur les communes d'Icogne et Lens. Il faut remarquer qu'une partie importante de ce bassin versant se trouve sur la commune d'Ayent, qui ne rentre pas dans notre périmètre d'étude. Le bassin versant de la Raspille se situe sur la commune de Mollens et Miège mais également sur les communes de Varen et Salgesch, qui, comme Ayent, ne font pas partie de notre zone d'étude. Le bassin versant de la Sinièse se situe principalement sur le territoire de Mollens, Randogne et Miège. Le « bassin versant » du Haut-Plateau représente un cas particulier ; en effet, bien qu'il soit entouré par des lignes de crêtes, il ne possède pas de structure dendritique (figure 3.1). Sa particularité est due à la morphologie caractéristique du Haut-Plateau, qui ne présente pas de vallées entaillées dans le relief, mais plutôt un relief vallonné créé par l'érosion glaciaire (Reynard, 2000a, 2005).

La Liène et l'Ertentse

La Liène est une rivière qui prend sa source au col du Rawyl pour rejoindre le Rhône à St-Léonard. Son écoulement a été modifié par la construction du barrage de Tseuzier et par l'exploitation hydroélectrique qui lui a fait suite. Le régime hydrologique de la Liène, après la confluence avec l'Ertentse, est de type b-glacio-nival (figure 3.1), selon la classification de Weingartner et Aschwanden (1985, 1992). L'Ertentse est le plus grand affluent de la Liène et son régime hydrologique naturel est nivo-glaciaire (figure 3.1).

La Raspille et la Sinièse

Cette rivière a été choisie comme limite orientale du projet MontanAqua. La Raspille se jette dans le Rhône entre Salquenen et Sierre, son régime hydrologique est de type

nival alpin (figure 3.1). Dans son cours amont, elle est nommée Tièche. La Sinièse est le plus grand affluent de la Raspille et partage avec cette rivière le même régime hydrologique (figure 3.1) et dans son cours amont, elle est nommée Boverèche.

Le Rhône

Les deux corrections du Rhône et le drainage de la plaine ont fortement contribué à l'évolution des paysages de la plaine du Rhône (Reynard et al., 2009; Laigre et al., 2010). A partir d'un paysage fluvial encore relativement naturel en 1850, on constate aujourd'hui une plaine dominée par l'agriculture intensive et l'urbanisation (Zanini et al., 2007). Le régime hydrologique naturel du Rhône alpin est de type glacio-nival à nivo-glaciaire (Weingartner et Aschwanden, 1992), mais le développement des aménagements hydroélectriques dans le bassin du Haut-Rhône a changé radicalement le régime hydrologique naturel de la rivière, qui est actuellement classé comme régime nival de transition à régime nivo-pluvial préalpin, avec un transfert partiel des débits écoulés de l'été vers l'hiver (Reynard et al., 2009).

Cours d'eau secondaires, lacs et étangs de la région

En plus de ces cours d'eau principaux, il faut mentionner quelques cours d'eau secondaires, mentionnés sur la figure 3.1 (la Bonne Eau, la Monderèche et la Vanire), ainsi qu'un nombre important d'affluents non nommés sur la carte topographique au 1:25'000. Il faut aussi mentionner les lacs et les étangs de la région : le lac souterrain de St-Léonard, le lac Louché, les étangs du Haut-Plateau et le lac de Géronde (figure 3.1).

3.2.3 Ecologie des rivières et débits résiduels

Selon le plan cantonal d'assainissement des cours d'eau (Canton du Valais, 2009) seul le débit de la Liène, qui, à l'étiage, va de faible à nul, est mesuré. Actuellement, l'Association des eaux de la Raspille observe le bassin versant homonyme de manière indépendante. Le débit d'étiage Q_{347} est le débit atteint ou dépassé pendant 347 jours par année (Castella, 2006), c'est-à-dire 95% des jours de l'année (figure 3.2). Les rivières sont également affectées par des problèmes d'ordre écologique et environnemental :

- obstacles infranchissables pour les poissons, comme le barrage de Tzeusier ;
- pas de dynamique en raison de la correction du cours d'eau ;
- colmatage dans les zones de vidange ;
- pas d'habitats pour les poissons près de St-Léonard et d'Uvrier.

La plupart de ces problèmes supplémentaires sont à mettre en relation directe avec l'exploitation hydroélectrique et la construction d'ouvrages en béton (digues, barrages, etc.). Les autres rivières de la région sont certainement moins affectées par ces problèmes.

Le débit résiduel minimal (Q_{347})

La fixation de débits résiduels en aval d'une prise d'eau joue un rôle fondamental pour le maintien de la biodiversité des cours d'eau (Castella, 2006). Selon l'article 4 de la Loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux) du 24 janvier 1991 (RS 814.20), le débit Q_{347} (ou débit résiduel minimal) est défini comme « le débit d'un cours d'eau atteint ou dépassé pendant 347 jours par année, dont la moyenne est calculée sur une période de 10 ans et qui n'est pas influencé sensiblement par des retenues, des prélèvements ou des apports d'eau ». La figure 3.2 met en évidence que des débits résiduels minimaux ne sont prévus que pour la Liène, affectée par la production hydroélectrique. La Raspille, dont les eaux sont captées afin de les utiliser comme eaux d'irrigation ou potabilisées, n'a par contre pas de débits résiduels minimaux fixés.

Le WWF (communiqué de presse du WWF du 5 décembre 2012), dénonce le Canton du Valais qu'il accuse de ne pas respecter la LEaux en fixant des débits résiduels totalement insuffisants, voire inexistantes (WWF, 2012). En ce qui concerne la région de Crans-Montana-Sierre, l'organisation constate que (WWF, 2012) :

[...] les débits naturels dans la Lienne sont tellement réduits que certains tronçons sont parfois asséchés et qu'il est impossible pour les poissons d'y vivre naturellement toute l'année, particulièrement à l'aval du bassin de Croix.

Le WWF dénonce donc non seulement des mesures de protection de l'environnement aquatique insuffisantes, mais également le non respect de ces dernières.

La réponse du Canton du Valais ne tarde pas et le 6 décembre 2012, dans les colonnes de *Nouvelliste*, les responsables nient catégoriquement toutes les accusations faites par le WWF (Le *Nouvelliste*, 2012).

Au-delà des jugements légaux et des accusations des organisations pour la protection de la nature et de l'environnement, la discussion sur les débits résiduels reste toujours ouverte, malgré que la LEaux soit entrée en vigueur il y a désormais plus de vingt ans.

L'indice biologique global normalisé (IBGN)

L'Indice biologique global normalisé ou IBGN est une méthode standardisée utilisée en écologie appliquée afin de déterminer la qualité biologique d'un cours d'eau (Woolsey, 2005). La méthode de l'IBGN a l'avantage de prendre en compte toutes les mosaïques d'habitats et par conséquent la nature et la qualité des substrats du fond, qui déterminent la diversité et l'abondance des macro-invertébrés benthiques (Canton du Valais, 2007b). En Valais, il s'agit principalement de larves d'insectes pétricoles (appartenant essentiellement aux ordres des Plécoptères, Ephéméroptères, Trichoptères, Diptères) ou fousseurs caractéristiques des cours d'eau de montagne (Canton du Valais, 2007b). L'IBGN a des valeurs bonnes à excellentes dans la partie amont de la Liène et une valeur médiocre avant de se jeter dans le Rhône; le Rhône présente également des valeurs qui vont d'excellent à médiocre (figure 3.2) (Canton du Valais, 2007b). Les autres cours d'eau de la région d'étude n'ont pas fait l'objet d'investigations concernant l'IBGN.

3.2.4 Les glissements de terrain

Dans la région de Crans-Montana-Sierre, on compte trois glissements de terrain d'une taille remarquable. Ces phénomènes semblent avoir un lien direct ou indirect avec l'eau.

Le glissement de Montana-Mollens Ce glissement (figure 3.3) couvre environ 10 km² (sur le territoire de Mollens, Randogne, Venthône et Veyras) et présente un dénivelé de 1'700 m pour une pente moyenne de 14° (Noverraz et al., 1998). Il s'agit d'un glissement lié au retrait glaciaire, qui a été fortement actif après le retrait würmien, mais au sujet duquel nous ne possédons aucun élément de datation (Noverraz et al., 1998). Les déplacements moyens annuels du glissement de Montana-Mollens se situent entre 0.3 et 1.9 cm/an pour l'ensemble de la période 1924-1993; il est donc compréhensible que les autorités n'ont pas prévu d'intervenir sur l'ensemble du glissement (Noverraz et al., 1998).

Le glissement du Boup (ou de Corin-Loc) Le glissement du Boup (figure 3.3) occupe une surface d'environ 1 km² pour une pente moyenne de 17°. Il est situé sur les communes de Montana, Randogne et Sierre (Rey et Bonvin, 1999). Ce glissement est probablement causé par l'effet lubrifiant de l'eau souterraine provenant de zones situées plus en amont qui pénètrent jusqu'au plan de glissement que les géologues situent à une profondeur de 40 m dans la partie supérieure et de 75 m dans la partie inférieure (Rey et Bonvin, 1999). Les déplacements de ce glissement varient de 10 à 50 cm par an; pour freiner ce phénomène, plusieurs campagnes de drainage ont été entreprises (Rey et Bonvin, 1999).

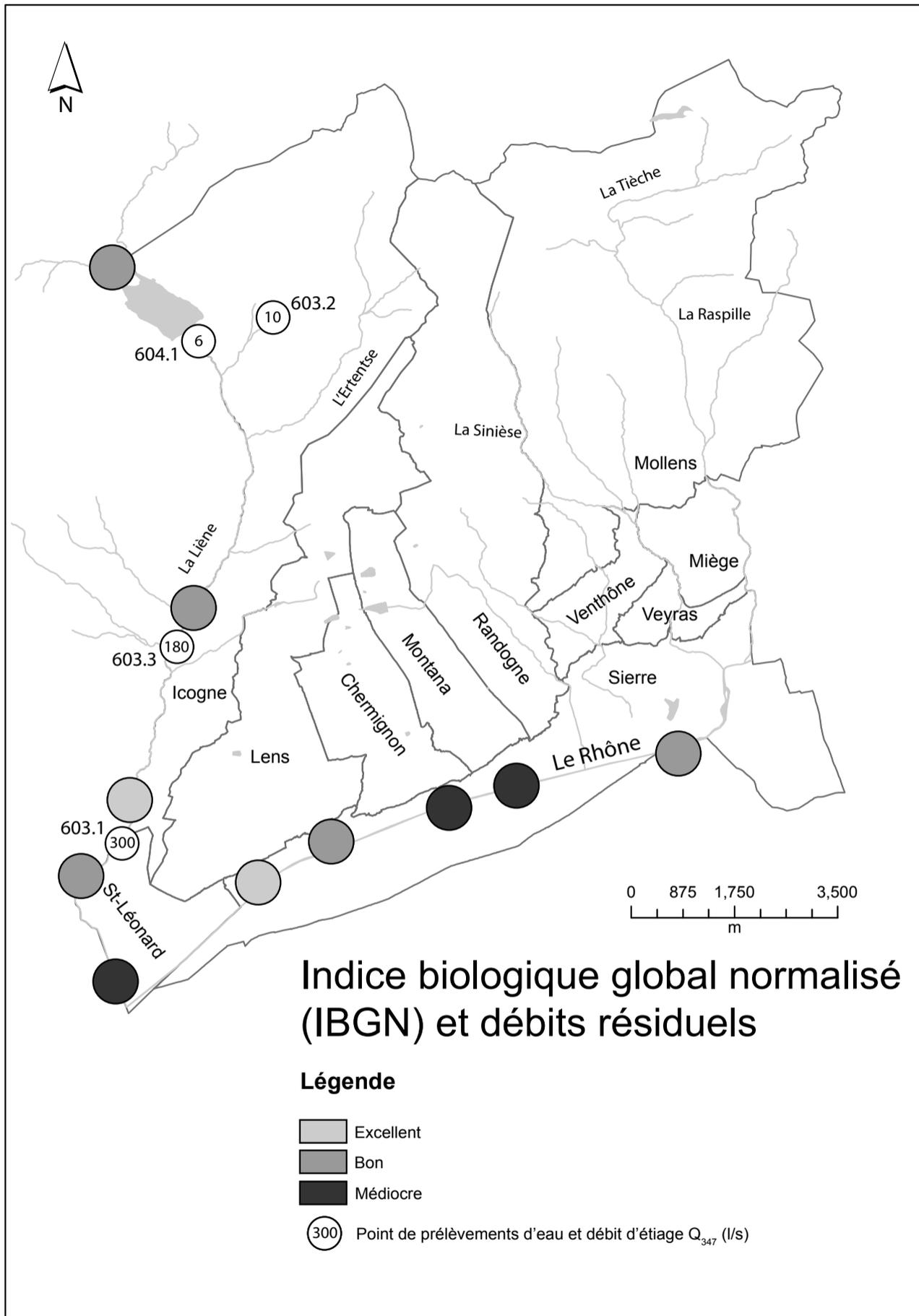


Fig. 3.2 – Indice biologique global normalisé et débits résiduels.

Source : Service des registres fonciers et de la géomatique du canton du Valais et Canton du Valais, 2007b.

Le glissement de la Bonne Eau Ce glissement peu connu et étudié (figure 3.3) se trouve entre Bluche et l'Hôpital de Sierre, dans une zone pratiquement inhabitée (Noverraz et al., 1998). D'une taille similaire à celle du glissement du Boup, ce glissement est indiqué, avec celui du Boup, comme étant plus actif que celui de Montana-Mollens (Noverraz et al., 1998), mais à notre connaissance, il ne pose pas de problèmes nécessitant une intervention.

3.2.5 Zones protégées

Une zone protégée indique qu'à cet endroit l'influence de l'homme est limitée au minimum. Ces zones représentent donc les surfaces les plus proches d'un environnement naturel intact et, par conséquent, elles acquièrent une valeur scientifique et paysagère supplémentaire. Malheureusement, les zones protégées liées à la présence d'eau ou aux biotopes du milieu aquatique occupent souvent des surfaces extrêmement réduites dans la région d'étude (figure 3.4).

Le Parc naturel régional de Pfyng-Finges Une des zones de la région d'étude faisant partie d'une zone protégée se trouve à l'est de la ville de Sierre, dans le Parc naturel régional de Pfyng-Finges. La surface d'intersection entre notre zone et le parc en question n'est que de 0.18 km², ce qui en fait une zone marginale dans le cadre du projet.

Les prairies et pâturages secs La richesse en espèces des prairies et pâturages secs (PPS) est en net contraste avec la pauvreté en nutriments de ces surfaces qui, dans la plupart des cas, se situent dans un endroit ensoleillé et plat (Dipner-Gerber, 2008). Ce genre de surfaces a fortement diminué durant les dernières décennies ; afin de protéger les PPS, l'OFEV a récemment établi un inventaire des prairies et pâturages secs d'importance nationale. Le 13 janvier 2010, le Conseil fédéral a approuvé l'ordonnance fédérale réglant la mise en œuvre de l'Inventaire fédéral des prairies et pâturages secs (RS 451.37), qui est entrée en vigueur le 1^{er} février 2010 (OFEV, 2010). Ces biotopes occupent des surfaces restreintes du territoire de la région de Crans-Montana-Sierre (figure 3.4), raison de plus pour protéger ce qui n'a pas été surfertilisé, embroussaillé, construit, imperméabilisé ou détruit.

Les haut- et bas-marais et les zones alluviales Actuellement, la région d'étude ne présente pas de hauts- ou bas-marais d'importance nationale, ni de zones alluviales d'importance nationale.

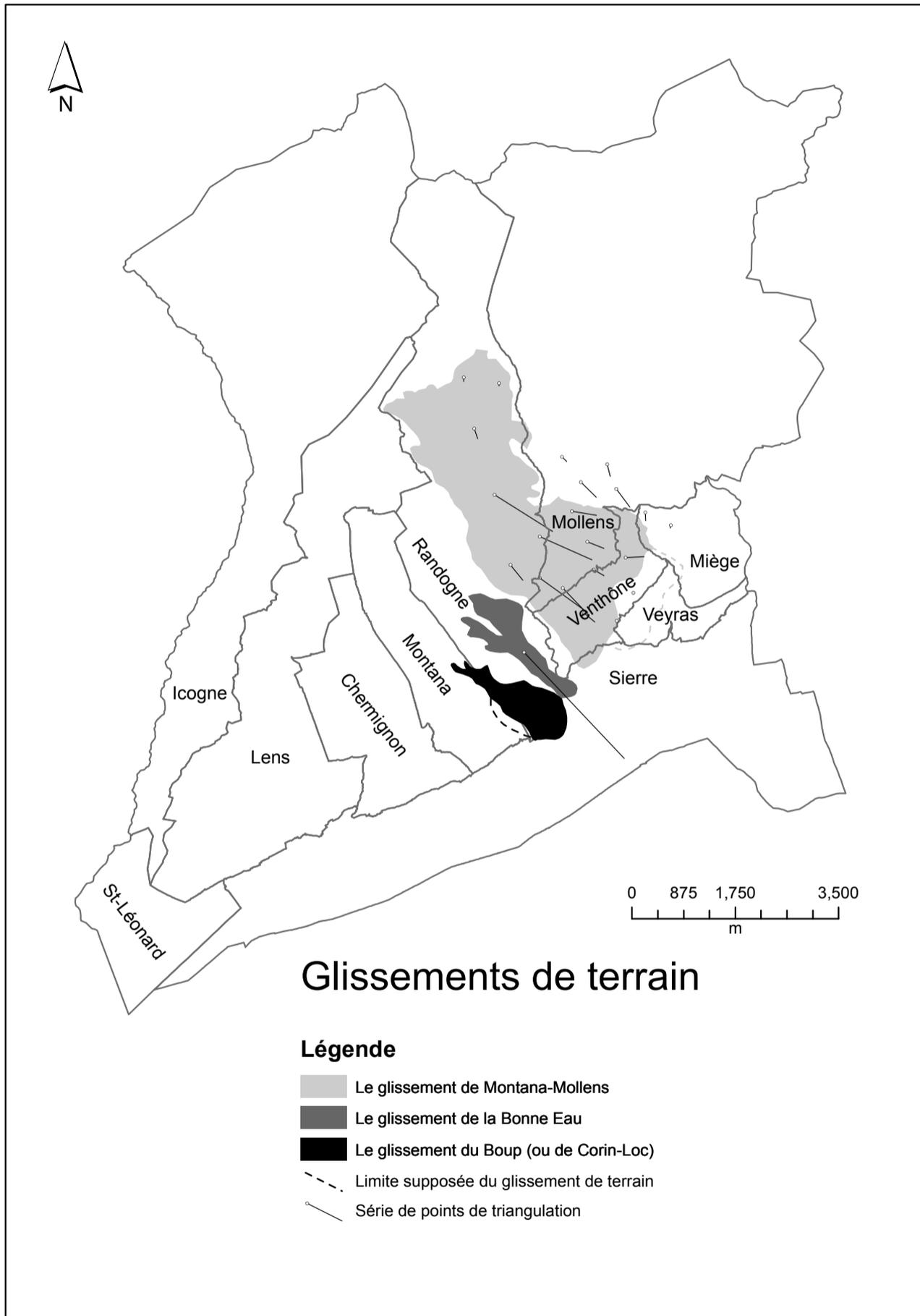


Fig. 3.3 – Les glissements de terrain.

Source : Service des registres fonciers et de la géomatique du canton du Valais et Noverraz et al. (1998).

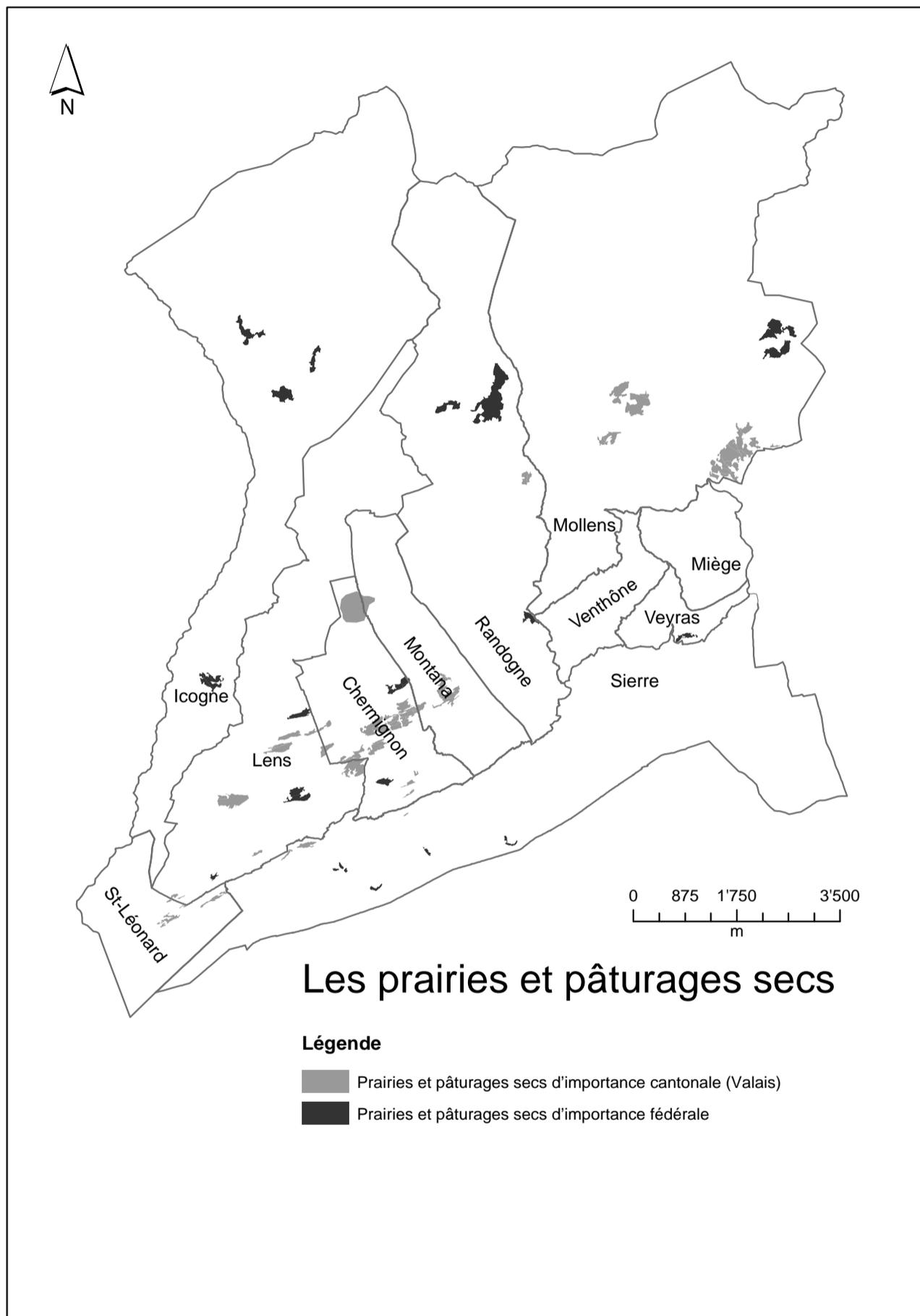


Fig. 3.4 – Les prairies et pâturages secs d'importance nationale.

Source : Service des registres fonciers et de la géomatique du canton du Valais.

3.3 L'eau potable

3.3.1 Introduction

En Suisse, l'eau est dite potable quand elle répond aux exigences de la Loi fédérale sur les denrées alimentaires et les objets usuels (RS 817.0) et elle est donc propre à la consommation humaine (SSIGE, 1998). Les services communaux sont responsables de l'approvisionnement en eau et les laboratoires cantonaux doivent garantir à la population la possibilité de consommer l'eau du robinet sans danger (SSIGE, 1998). Les problèmes d'approvisionnement en eau potable sont ponctuels et souvent liés à des cas de pollution ou à des problèmes techniques, toujours résolus en quelques jours. La distribution de l'eau potable dans les stations touristiques de montagne se caractérise par une variation de la consommation due à la présence des résidents et des touristes (Charnay, 2010). Ces deux facteurs déterminent des pics de consommation auxquels les réseaux de distribution doivent faire face. Ces derniers doivent donc garantir la possibilité d'approvisionner en eau la station aussi lorsque la fréquentation touristique est maximale.

3.3.2 Les trois réseaux principaux

La région d'étude présente trois réseaux hydrauliques distincts (figure 3.5) : celui du Haut-Plateau, celui de Sierre et celui de St-Léonard. À notre connaissance, les trois réseaux ne sont pas raccordés entre eux. À l'intérieur de chaque réseau, par contre, une certaine collaboration existe entre les communes pour ce qui concerne l'adduction et le transport de l'eau ; sa distribution se fait toujours sur un mode communal (Reynard, 2000a).

Afin de mettre à jour les informations récoltées par Reynard (2000a) et Putz (2003), les onze communes ont reçu un questionnaire avec des questions ciblées sur le sujet et également une version préliminaire du schéma des infrastructures régionales, sur lequel elles ont pu faire leurs observations (annexe 2).

Le réseau du Haut-Plateau

Le nœud central du réseau du Haut-Plateau se trouve à la sortie du tunnel du Mont-Lachaux, à Plans-Mayens. Le tunnel a été creusé pour remplacer le bisse du Rho et a été inauguré en 1946 (Reynard, 2000a). Il servait initialement au transport gravitaire de l'eau d'irrigation. Le répartiteur de Plans-Mayens gère toute l'eau provenant du barrage de Tseuzier et transitant par une conduite construite par la commune de Lens en 1969 (Reynard, 2000a) et destinée aujourd'hui principalement aux communes

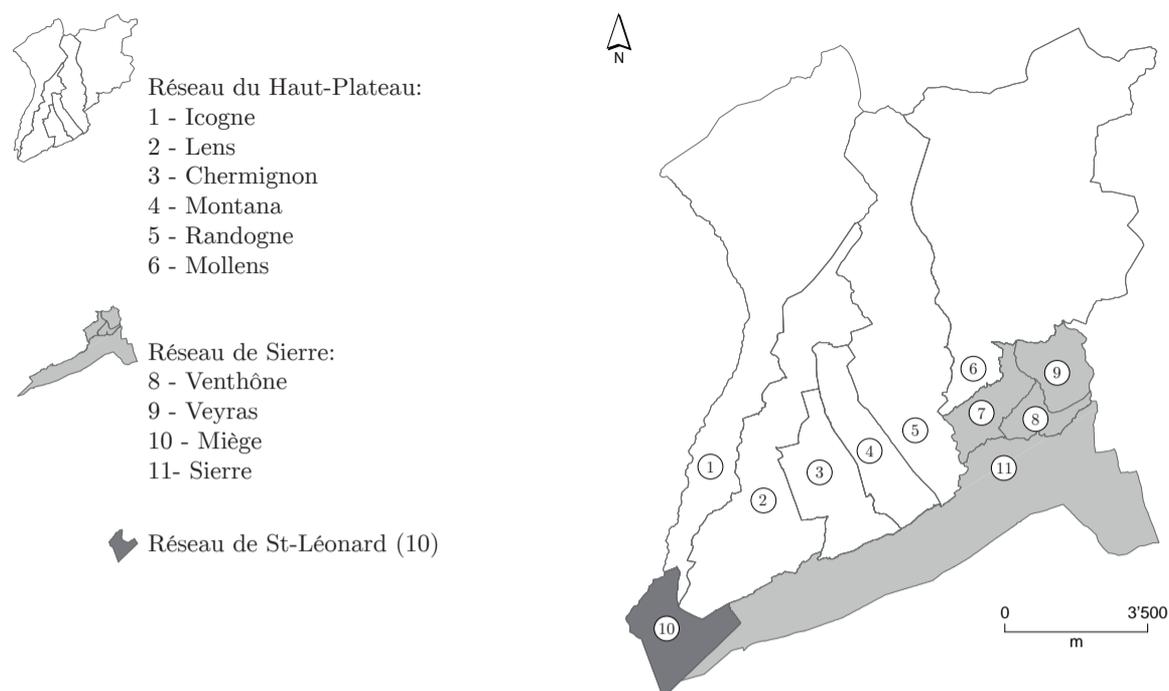


Fig. 3.5 – Répartition spatiale des réseaux de la région.

d'Icogne, Lens, Chermignon, Montana. Les deux communes les plus orientales du Haut-Plateau, Randogne et Mollens, exploitent par contre essentiellement les eaux de la Raspille, transitant par une conduite construite par la commune de Randogne en 1969 (Reynard, 2000a) et toute une série de sources.

Le réseau de Sierre

Le réseau de Sierre dessert la ville homonyme et, en cas de nécessité, les communes du coteau : Venthône, Veyras et Miège. Ce réseau est alimenté par les eaux de la Raspille, les achats aux communes de Salquenen et Grône, ainsi que des sources.

Le réseau de St-Léonard

St-Léonard est la commune la plus occidentale de notre région d'étude et son réseau d'eau potable n'est pas raccordé aux autres réseaux de la région de Crans-Montana-Sierre. La plupart des besoins de la commune sont satisfaits par un pompage dans la nappe phréatique du Rhône, le reste étant assuré par un raccordement au réseau d'eau potable de Sion.

3.3.3 Les infrastructures au niveau communal

La présence d'eau sur le territoire d'une commune ou la possibilité d'y accéder facilement génèrent des disparités entre les communes de la région d'étude. Au sens le plus large, celui qui détient le contrôle de l'eau détient en général aussi le pouvoir politique et économique (DDC, 2005). Les infrastructures et le fonctionnement du réseau sont

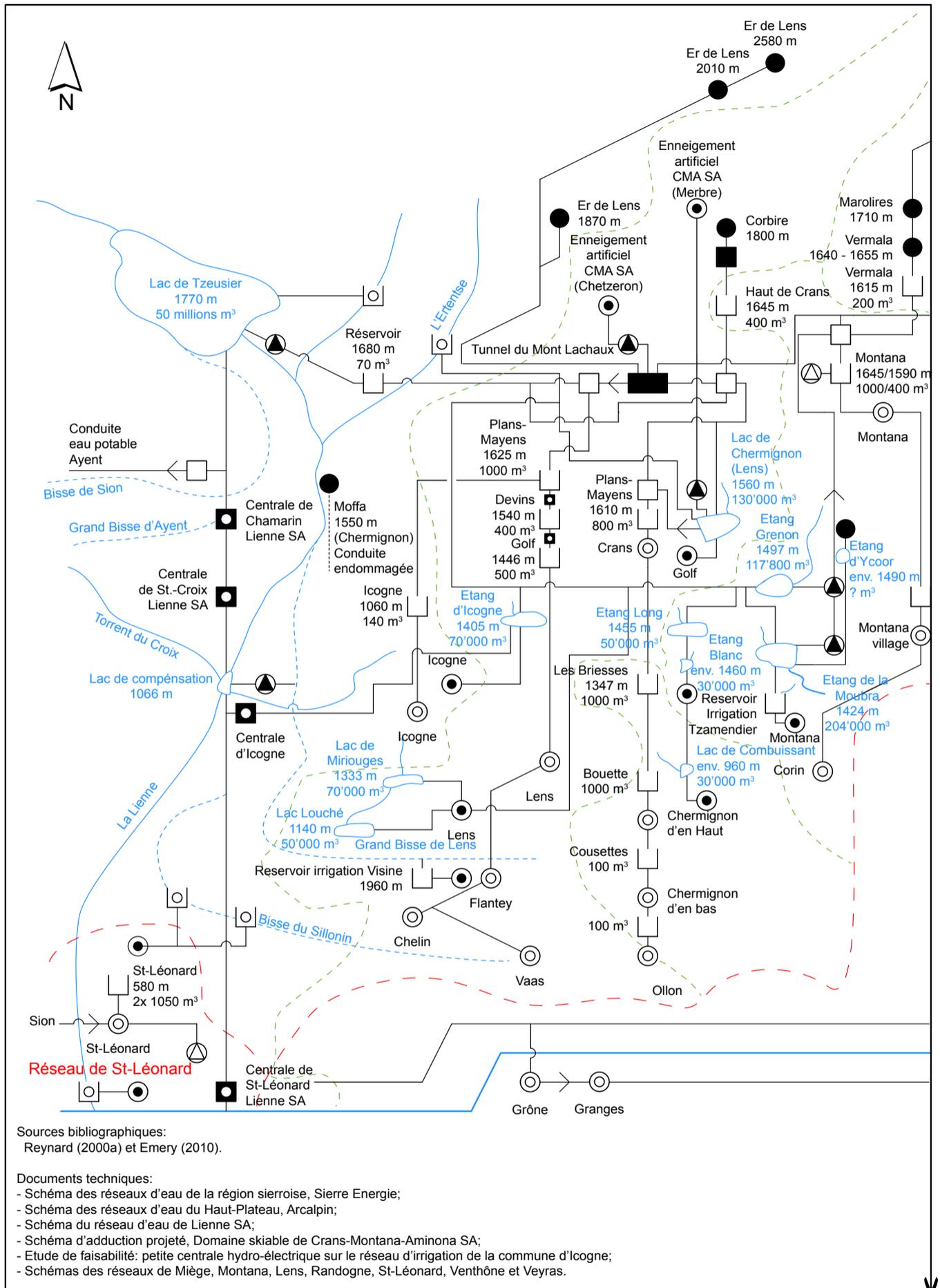


Fig. 3.6 – Réseau hydraulique simplifié de la région de Crans-Montana-Sierre (ouest).

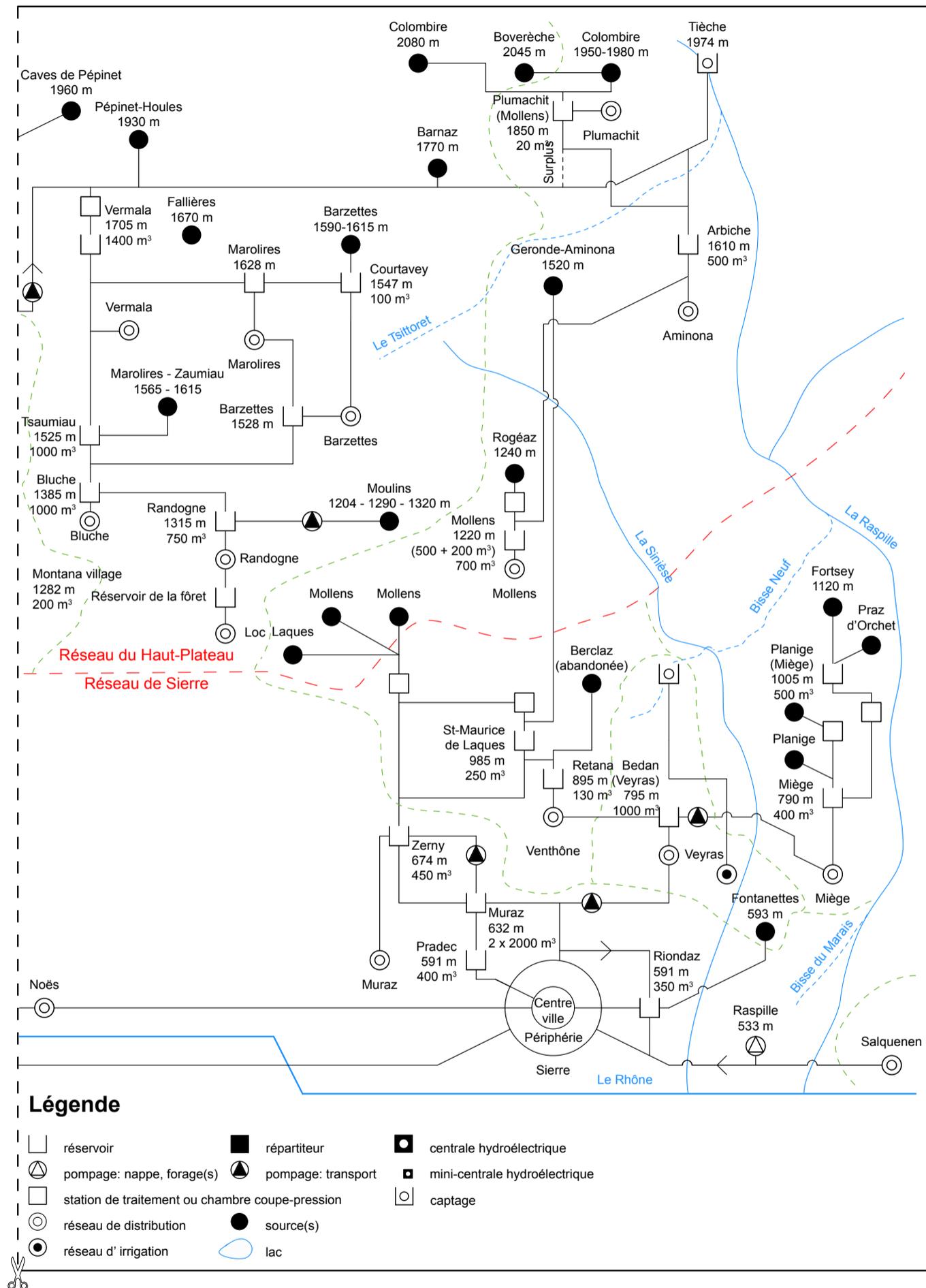


Fig. 3.6 – Réseau hydraulique simplifié de la région de Crans-Montana-Sierre (est).

ainsi directement dépendantes des ressources naturelles. Leur description permettra de mieux comprendre la relative complexité de la gestion de l'eau potable à l'échelle communale (figure 3.6 et tableau 3.2). Pour chacune d'elles, nous décrivons la ressource disponible, les principales infrastructures et leur fonctionnement.

Communes	Achats	Sources	Pompages	Prélèvements
Chermignon	x	x		x^b
Icogne		x		x^b
Lens	x	x		x^b
Miège		x		
Mollens	x	x		x^c
Montana	x	x		x^b
Randogne	x	x		x^c
Sierre	x	x	x^a	
St-Léonard	x		x^a	
Venthône		x		
Veyras	x			

^a dans la nappe phréatique du Rhône

^b dans le barrage de Tseuzier, par la conduite de Lens

^c dans la Tièche (Raspille), par la conduite de Randogne

Tab. 3.2 – Les infrastructures d'eau potable au niveau communal.

La commune d'Icogne

Les ressources disponibles Icogne couvre l'ensemble du bassin versant apparent de l'Ertentse ainsi que la rive gauche de celui de la Liène (Reynard, 2000a). La commune capte les eaux des sources du vallon de l'Ertentse (Reynard, 2000a). Les sources d'Er de Lens se trouvent également sur le territoire d'Icogne, mais elles appartiennent aux quatre communes (Icogne, Lens, Chermignon et Montana).

L'infrastructure La commune d'Icogne partage une bonne partie de ses infrastructures avec Lens, notamment le tunnel du Mont Lachaux, la conduite de Lens (par l'utilisation de laquelle elle paie un droit d'usage annuel) et les infrastructures de répartition de Plans-Mayens. Elle dispose d'un seul réservoir (1060 m, 140 m³).

Le fonctionnement La commune a droit au $\frac{1}{4}$ des eaux qui proviennent des sources d'Er de Lens et qui coulent dans le répartiteur d'eau potable de Plans-Mayens entre le 1^{er} octobre et le 15 avril. Entre le 15 avril et le 1^{er} octobre, elle est la seule commune ayant droit d'exploiter ces eaux⁸. Bien que la commune ne prélève que rarement de

8. D'après l'entretien du 30 mars 2011 avec Eric Kamerzin, Président de la commune d'Icogne.

l'eau par le barrage de Tseuzier, une solide collaboration existe entre Lienne SA, société qui exploite le barrage de Tseuzier, et les consortages pour ce qui concerne l'irrigation (Bréthaut, 2012). La quantité de ressource en eau à disposition d'Icogne permet à la commune de vendre ses surplus d'eau aux communes demandeuses (Bréthaut, 2012), de remplir les lacs/étangs artificiels du Haut-Plateau pendant le printemps et de garantir l'enneigement artificiel des pistes pendant l'hiver.

La commune de Lens

Les ressources disponibles La ressource en eau de la commune de Lens provient principalement des sources d'Er de Lens, situées sur le territoire de la commune d'Icogne. Entre le 1^{er} octobre et le 15 avril, Lens (comme Icogne, Chermignon et Montana) a droit au $\frac{1}{4}$ des eaux acheminées au répartiteur de Plans-Mayens.

L'infrastructure Les infrastructures principales de Lens sont constituées par le tunnel du Mont Lachaux, la conduite de Lens, construite en urgence en 1969 par la commune de Lens pour l'approvisionnement au barrage de Tseuzier (Reynard, 2000a), les infrastructures de répartition de Plans-Mayens et trois réservoirs : Plans-Mayens (1624 m, 1000 m³), Devins (1540 m, 400 m³) et le réservoir du Golf (1446 m, 500 m³).

Le fonctionnement Le réseau de la commune de Lens fonctionne d'une manière relativement simple : l'eau potable provient du répartiteur de Plans-Mayens et est ensuite répartie, en plusieurs étapes successives, en exploitant toute une série de réservoirs secondaires, entre les fractions de Lens, Flanthey, Chelin, Vaas et (Petit) Ollon.

La commune de Chermignon

Les ressources disponibles Les eaux potables proviennent en majeure partie du vallon de l'Ertentse, Chermignon ayant droit (entre le 1^{er} octobre et le 15 avril) comme les trois autres communes de la Louable Contrée (Icogne, Lens et Montana) au $\frac{1}{4}$ des eaux de source (du 15 avril au 15 octobre), d'achats de surplus à la commune d'Icogne et en dernier recours du barrage de Tseuzier (Reynard, 2000a).

L'infrastructure La station de traitement de la commune de Chermignon traite la ressource en eau provenant de Plans-Mayens (eaux de l'Ertentse et Tseuzier), les sources de Corbire, les sources de Pépinet (Montana) et divers forages. Les ouvrages de stockage d'eau potable utilisés par Chermignon sont principalement au nombre de deux : le réservoir de Plans-Mayens (1530 m, 800 m³) et le réservoir des Briesses (1347

m, 1000 m³). La commune exploite également, après les avoir potabilisées, les eaux d'irrigation stockées dans le lac de Chermignon (1560 m, 130'000 m³).

Le fonctionnement L'eau qui passe par les répartiteurs de Plans-Mayens est ensuite dirigée vers Crans et le réservoir des Briesses. À partir de ce réservoir, la ressource en eau est distribuée aux villages de Chermignon d'En-Haut, Chermignon d'En-Bas et Ollon.

La commune de Montana

Les ressources disponibles Entre le 1^{er} octobre et le 15 avril, Montana a droit (comme Icogne, Lens et Chermignon) au $\frac{1}{4}$ des eaux acheminées au répartiteur de Plans-Mayens. La commune exploite également toute une série de sources (Corbire, Marolires, Vermala, et Pépinet) et de forages (à Montana et à l'Arnouva).

L'infrastructure Les ouvrages principaux de la commune de Montana sont la station de traitement des eaux et les pompages de l'étang Grenon (1497 m, 117'800 m³) et de l'étang de la Moubra (1424 m, 204'000 m³).

La commune stocke l'eau potable dans les deux réservoirs de Montana (1645 m, 1000 m³ et 1590 m, 400 m³).

Le fonctionnement La distribution de la ressource en eau est possible grâce à un réseau secondaire qui reçoit les eaux des réservoirs de Montana. Les lacs de la Moubra et Grenon sont utilisés pour le stockage de l'eau brute, qui peut être ensuite potabilisée grâce à la station de traitement.

La commune de Randogne

Les ressources disponibles La commune de Randogne exploite de nombreuses sources et une prise d'eau sur la Tièche aménagée en 1969 (Reynard, 2000a). Elle peut également acheter de l'eau à Lienne SA et la transporter via la conduite de Lens provenant du barrage de Tseuzier et via les infrastructures d'adduction de Montana. En cas de besoin en eau, Randogne peut aussi exploiter un forage.

L'infrastructure Les ouvrages principaux de la commune de Randogne sont la conduite dite de Randogne (diamètre de 300 mm), qui passe sur le territoire de la commune de Mollens et les réservoirs de Vermala (1705 m, 1400 m³), de Bluche (1385 m, 1000 m³) et de Randogne (1315 m, 750 m³). Plusieurs réseaux de distribution secondaires et réservoirs de taille inférieure sont présents sur le territoire de la commune.

Le fonctionnement La commune de Randogne est approvisionnée prioritairement avec de l'eau de source. Le réseau est constitué par toute une série de réservoirs qui sont rendus nécessaires par la morphologie du territoire de la commune, qui va de la Plaine Morte à Sierre⁹.

La commune de Mollens

Les ressources disponibles Le réseau communal de distribution d'eau potable est alimenté par deux séries de sources : les huit sources de Colombire (ainsi qu'une série de forages), situées entre 1950 et 1980 m, et les deux sources de Rogéaz à 1220 m (Reynard, 2000a).

L'infrastructure L'eau est accumulée dans deux réservoirs : celui d'Arbiche (1610 m, 500 m³) et celui de Mollens (1220 m, 700 m³). La commune dispose aussi d'un raccordement sur la conduite de Randogne.

Le fonctionnement L'approvisionnement de Mollens se divise entre des eaux de source et quelques prélèvements sur la Tièche

La commune de Venthône

Les ressources disponibles La ressource en eau de la commune de Venthône provient de plusieurs sources. Les sources de Géronde-Aminona sont propriété de Venthône et se trouvent sur le territoire de Mollens. Deux sources, qui appartiennent à Sierre, se trouvent également sur le territoire de Mollens et exploitent le réseau de distribution de l'eau potable de Venthône pour atteindre celui de la ville de Sierre. Les sources de Berclaz ont été abandonnées pour des raisons qualitatives (germes, pollutions, etc.)¹⁰.

L'infrastructure L'eau est accumulée dans le réservoir de St-Maurice de Laques (985 m, 250 m³). Le réservoir de Retana (795 m, 130 m³) fonctionne comme répartiteur. La capacité totale de stockage en eau potable de la commune est de 93 m³ (plus 132 m³ de réserve incendie), qui correspond à la capacité maximale du réservoir de St-Maurice de Laques.

Le fonctionnement Après avoir été traitée dans une station UV, l'eau des sources appartenant à Sierre et de la source de Venthône située à Mollens est dirigée vers le réservoir de St-Maurice de Laques (Venthône) ou vers le réservoir de Zerny (Sierre). La

9. D'après le questionnaire rempli par Louis-Philippe Berclaz, responsable technique de Randogne.

10. D'après le questionnaire rempli par les responsables techniques de Venthône.

source Géronde-Aminona alimente directement le réservoir de St-Maurice de Laques. Les deux réservoirs sont reliés et l'eau peut passer de celui de St-Maurice de Laques à celui de Retana.

La commune de Veyras

Les ressources disponibles La commune de Veyras n'a pas de sources. Le manque d'eau oblige la commune à en acheter à Miège, Venthône et Sierre afin de remplir le réservoir de Bédan (795 m, 1000 m³).

L'infrastructure L'eau est accumulée dans le réservoir de Bédan (795 m, 1000 m³). La capacité totale de stockage de la commune est de 1000 m³.

Le fonctionnement La commune de Veyras se trouve en condition de devoir acheter de l'eau auprès des communes limitrophes¹¹ :

- Miège ; par le pompage de leur réseau dans le réservoir de Bédan
- Venthône ; par gravitation dans le réservoir de Bédan
- Sierre ; par pompage directement du réseau de Sierre dans celui de Veyras

Le réseau de la région de Sierre, équipé avec plusieurs pompes, permet ce type d'opération. Cette démarche fonctionne seulement si les communes limitrophes n'ont pas de problèmes d'eau à leur tour.

Projets Pour remédier à cette situation, la commune de Veyras a l'ambition de se relier à la commune de Mollens (réseau du Haut-Plateau). Ce projet, encore en phase préliminaire, vise la construction d'une conduite qui permettrait de satisfaire l'entier des besoins en eau de la commune¹².

La commune de Miège

Les ressources disponibles La commune de Miège exploite plusieurs sources pour s'approvisionner en eau potable. Les deux sources avec le débit le plus important se trouvent sur le territoire de Mollens ; cependant, elles appartiennent à Miège. Elle peut également exploiter les eaux de la Raspille et du Bisse Neuf (alimenté par la Raspille entre mi-avril et mi-septembre) et un total de dix sources. Sept de ces sources peuvent être exploitées ; celles qui restent, par contre, sont beaucoup trop vulnérables à la pollution, ce qui en empêche l'exploitation.

11. D'après le questionnaire rempli par les responsables techniques de Veyras.

12. Entretien du 20 août 2010 avec Serge Amoos, conseiller communal de Veyras.

L'infrastructure L'eau est accumulée dans deux réservoirs, celui de Planige (1005 m, 500 m³) et celui de Miège (790 m, 400 m³). La capacité totale de stockage de la commune est de 900 m³.

Le fonctionnement Les sources qui sont proches du Bisse Neuf sont influencées par son débit. L'eau des sources situées plus à l'amont est stockée dans le réservoir de Planige, les autres dans le réservoir de Miège. Le réservoir de Planige est approvisionné pendant l'été par les sources alimentées par le Bisse Neuf et l'hiver par une prise sur la Raspille. En cas de nécessité, le réservoir de Planige compense la quantité d'eau manquante dans le réservoir de Miège.

La commune de St-Léonard

Les ressources disponibles La commune de St-Léonard exploite un pompage dans la nappe phréatique du Rhône (Les Vergers) et un raccordement avec le réseau d'eau potable de Sion.

L'infrastructure L'eau est accumulée dans un réservoir à double chambre d'une capacité totale de 2100 m³ situé dans le milieu du vignoble (annexe 3), à 580 m.

Le fonctionnement Après son prélèvement dans la nappe phréatique, l'eau peut être stockée par pompage dans le réservoir de St-Léonard. Le raccordement au réseau de Sion a été réalisé afin de remplacer un ancien puits de pompage de la nappe phréatique dont l'emplacement ne répondait plus aux normes actuelles. Il est utilisé conjointement avec le pompage de la nappe phréatique cité plus haut. La relative abondance en eau permet à la commune de compenser les pertes du lac souterrain avec l'eau de son réseau et ainsi de garantir la navigation sur le lac en toute sécurité. Cet apport sera remplacé à moyen terme par un apport en eau non potable.

La commune de Sierre

Les ressources disponibles Sierre est alimentée par pompage dans la nappe phréatique de la Raspille (env. 60%), les sources de Mollens et de Fontanettes (env. 10%). Le reste est acheté aux communes de Venthône, Mollens, Salquenen et Grône.

L'infrastructure Le double réservoir de Muraz (632 m, 4000 m³) représente le nœud central du réseau de Sierre pour ce qui concerne le stockage et la répartition de l'eau. Il est toujours raccordé aux prélèvements dans la Raspille et en cas de nécessité peut exploiter la conduite provenant de Salquenen. Trois autres réservoirs (Zerny 674 m,

450 m³; Pradec 591 m, 400 m³; Riondaz 591 m, 350 m³) sont également à disposition du réseau d'eau potable.

Le fonctionnement L'eau potable est distribuée par trois réseaux, qui desservent respectivement le quartier de Muraz, le centre urbain et la périphérie de la commune (Finges, Sous Géronde, Sous Réchy, Noës et la zone du motel de St-Léonard).

- Réseau 1 - Principal : il s'étend de Sierre à Granges et il comprend :
 - le réservoir de Muraz alimenté par le pompage de la Raspille.
 - le réservoir de Vaye-Planaz alimenté par les trop-pleins de la commune de Grône (sources du vallon de Réchy).
 - le trop-plein de la commune de Salquenen alimente également ce réseau par injection directe.
- Réseau 2 - Quartier de Muraz : l'eau des sources de Mollens arrive au réservoir de Zerny, ensuite elle peut être dirigée vers le quartier de Muraz ou être stockée dans le double réservoir homonyme (trop-plein). Ce réseau reçoit également le surplus de la commune de Venthône.
- Réseau 3 - Centre-ville : les réservoirs de Pradec et Riondaz sont alimentés par les réservoirs de Muraz et par la source des Fontanettes.

3.3.4 L'eau potable comme eau d'irrigation

Malgré sa qualité, l'eau potable est parfois utilisée comme eau d'irrigation, ce qui engendre une variation dans l'offre en eau potable. Cette variation fera l'objet d'un approfondissement dans le prochain chapitre, dédié à l'irrigation.

Pour éviter ce genre d'utilisation, les communes de Montana, Sierre, Venthône et Veyras se sont équipées de manière à minimiser ce type d'usage :

- la commune de Montana a construit un réseau d'irrigation pour les prairies.
- la ville de Sierre a fait la distinction entre les clients « irrigation » et « eau potable ».
- sur le territoire de Venthône, partout où il y a possibilité de se raccorder au réseau d'irrigation, il est strictement interdit d'irriguer avec de l'eau potable (Art. 21 du Règlement communal pour le service de l'eau potable).
- à Veyras, les citoyens peuvent se brancher sur un réseau d'irrigation communal.

La quantité d'eau potable que ce genre d'infrastructures permet d'économiser sera analysée en détail au chapitre 4.4.

3.3.5 L'informatisation des réseaux

Entre 2000 et 2010, la majorité des réseaux de la région ont été dotés d'un système informatique de gestion. Ces systèmes de gestion permettent de connaître la quan-

tivité d'eau présente dans les réservoirs et le débit de l'eau dans les diverses conduites sans devoir être sur place. L'informatisation de la gestion de l'eau permet d'intervenir immédiatement en cas de problèmes d'ordre quantitatif ou qualitatif. Grâce aux nouvelles technologies, les techniciens peuvent désormais accéder au logiciel de gestion de leur commune via leur ordinateur portable, fait qui ne rend plus nécessaire, du moins théoriquement, la présence physique du responsable pour des imprévus.

Bien que pour l'instant il n'y ait pas de projets en ce sens, l'utilisation d'un logiciel de gestion commun ne poserait pas de problèmes en cas d'une future gestion intercommunale des eaux. Les communes du coteau (Venthône, Veyras et Miège) collaborent déjà entre elles et partagent les informations de leur réseau par le logiciel de gestion, mais par contre les trois communes gardent toujours leurs responsables des eaux (politique et technique).

3.3.6 Projet de stockage des eaux de la Raspille et de l'Ertentse dans le barrage de Tseuzier

Dans un futur proche, les communes du Haut-Plateau réaliseront probablement un « arc d'alimentation » ; il s'agit d'une conduite sous pression enterrée qui permettra l'adduction de l'eau vers le barrage de Tseuzier à des fins de stockage (figure 3.7) (Commune de Montana, 2009). Élaboré par l'ingénieur Yves Rey dans le cadre de son travail de Maîtrise universitaire d'études avancées à l'EPFL, le « Nouveau concept de gestion des eaux dans la région de Crans-Montana » a pour but de sécuriser l'approvisionnement en eau et la production hydroélectrique sur le Haut-Plateau (Rey, 2009). Ce projet représente l'évolution naturelle des projets d'aménagement hydroélectriques et de stockage dans les vallons de l'Ertentse et de la Tièche qui ont été élaborés mais jamais réalisés à partir des années 1970, tout en utilisant en grande partie des installations existantes (Rey, 2009).

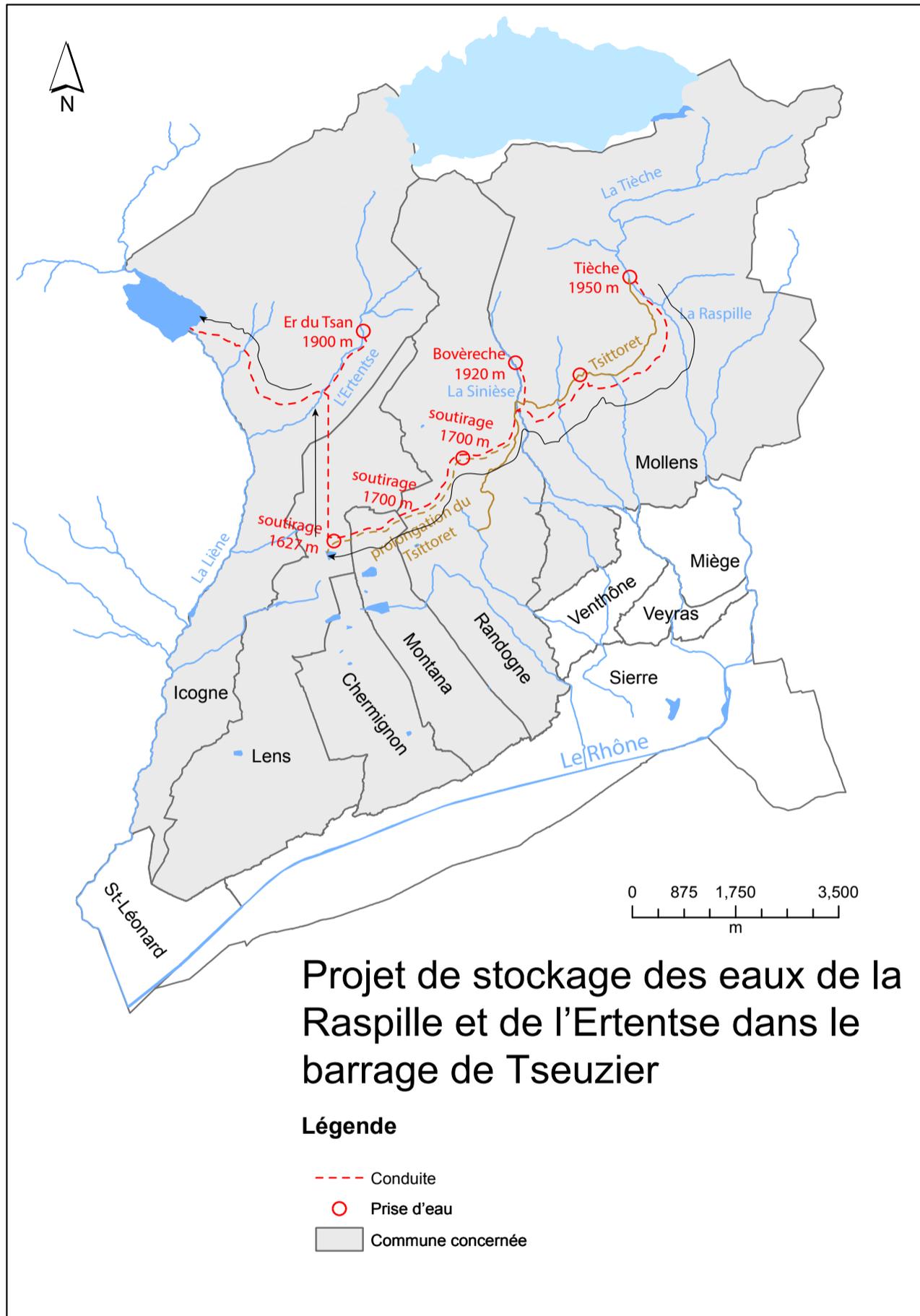


Fig. 3.7 – Schéma du projet de stockage des eaux de la Raspille et de l'Ertentse dans le barrage de Tseuzier.

Sources : Commune de Montana, 2009, Rey, 2009 et EPFL, 2010.

3.4 L'irrigation

La pratique de l'irrigation est directement liée aux nécessités des cultures et aux conditions climatiques. Il est bien évident qu'en termes quantitatifs, l'irrigation change selon les besoins liés au type de culture et aux conditions climatiques. Dans la région d'étude, l'irrigation est pratiquée en utilisant soit de l'eau d'irrigation, soit de l'eau potable. Le réseau d'eau potable et celui de l'irrigation ne sont donc pas complètement séparés, mais ils partagent une partie des infrastructures de distribution et, à l'occasion, une ressource compense l'autre. Dans ce chapitre, nous étudions tout d'abord la question de l'irrigation sous l'angle de l'utilisation du sol et des surfaces concernées, pour ensuite décrire les principales infrastructures, notamment les bisses. Dans un troisième temps, nous étudions les modalités de l'irrigation des cinq types de surfaces irriguées.

3.4.1 La typologie des superficies irriguées

Les superficies irriguées de la zone d'étude appartiennent à cinq catégories principales : les jardins et gazons à l'intérieur de la zone bâtie, les parcours de golf, les prairies, les vignes et les vergers (figure 3.8). Les besoins de ces cinq types de superficies diffèrent en termes de quantité et de répartition spatiale et temporelle de la ressource en eau. Pour ce qui concerne la distribution, la situation est mieux définie :

- les vignes sont arrosées principalement avec de l'eau d'irrigation ;
- les prairies et les vergers sont arrosés soit avec de l'eau d'irrigation, soit avec de l'eau potable ;
- les gazons qui se trouvent à l'intérieur de la zone bâtie sont arrosés principalement avec de l'eau potable, selon les communes ;
- les golfs utilisent de l'eau d'irrigation.

Le calcul des superficies potentielles d'irrigation a été réalisé à partir des différentes catégories d'utilisation du sol incluses dans la version numérique de la carte topographique au 1:25'000. Bien que la carte en question ait été mise à jour la dernière fois en 2006, une partie des couches a été actualisée précédemment (entre 1992 et 2003). Afin d'homogénéiser le plus possible les couches, celles-ci ont été comparées aux orthophotos les plus récentes (réalisées par Swissimage en 2009) et corrigées en conséquence (figure 3.8 et tableau 3.3).

Les valeurs du tableau 3.3 permettent de répartir les communes en quatre groupes :
A) Icogne et Mollens se trouvent respectivement à la marge ouest et est de la zone d'étude. Elles ne comptent pas de vignes à cause de l'altitude trop élevée. En effet, le point plus bas qui pourrait être destiné à la vigne se situe à environ 800 m pour Icogne et à 900 m pour Mollens. Une superficie modeste est dédiée aux vergers dans la commune d'Icogne.

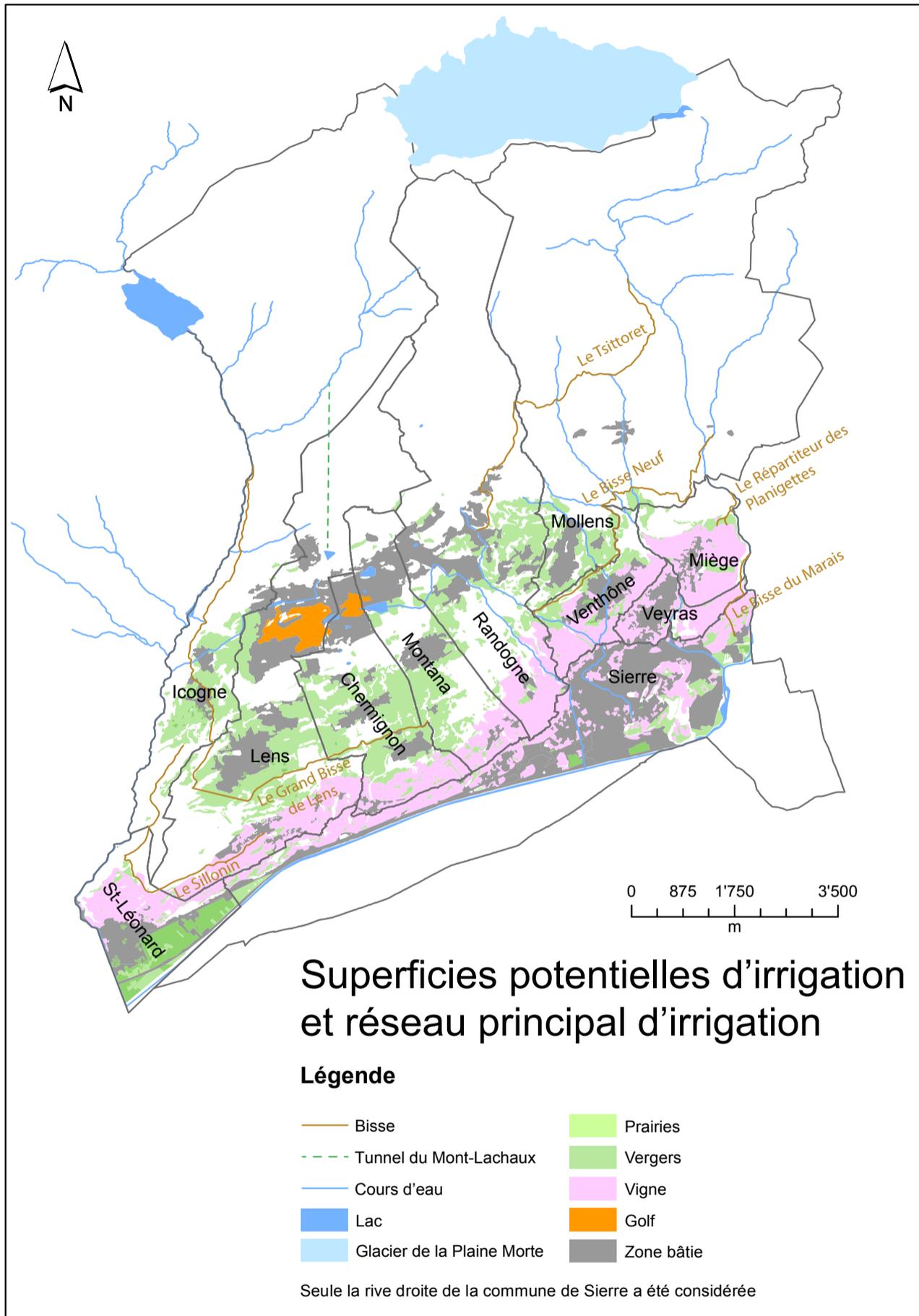


Fig. 3.8 – Superficies potentielles d'irrigation.

Source : Service des registres fonciers et de la géomatique du canton du Valais (modifié).

Communes	Golf	Vergers	Vignes	Zone bâtie	Prairies	Groupe
	[km ²]					
Veyras	0.00	0.00	0.83	0.47	0.05	<i>B</i>
Mollens	0.00	0.01	0.00	0.60	0.82	<i>A</i>
Icogne	0.00	0.05	0.00	0.41	1.18	<i>A</i>
Miège	0.00	0.00	1.17	0.19	0.28	<i>B</i>
Venthône	0.00	0.01	1.11	0.52	0.49	<i>B</i>
Montana	0.02	0.00	0.56	1.07	1.16	<i>C</i>
St-Léonard	0.00	0.79	1.02	0.84	0.17	<i>B</i>
Chermignon	0.12	0.00	0.78	1.16	1.94	<i>C</i>
Randogne	0.00	0.00	0.99	1.57	1.71	<i>C</i>
Lens	0.54	0.03	1.42	2.27	2.23	<i>C</i>
Sierre (rive droite)	0.00	0.10	2.62	4.48	0.73	<i>D</i>
Totale	0.68	1.00	10.50	13.59	10.78	-

Tab. 3.3 – Statistiques des superficies d'utilisation de l'eau.

A Communes sans vignoble

B Communes où le vignoble occupe une grande surface

C Communes où les prairies occupent une grande surface

D Communes urbaines

B) Miège, Venthône, Veyras et St-Léonard : dans ces communes le vignoble est la culture qui occupe le plus de surface. St-Léonard est la seule commune dans ce groupe qui présente aussi une superficie considérable dédiée aux vergers.

C) Chermignon, Montana, Lens et Randogne : l'utilisation du sol qui occupe le plus de km² est la prairie.

D) Sierre (rive droite) : la superficie de la zone bâtie est ici plus grande que la somme de toutes les autres utilisations du sol. La superficie du vignoble est également assez étendue (2,62 km²). La zone bâtie se concentre principalement en plaine, les vignes sur les terrains du coteau les plus ensoleillés.

3.4.2 Les besoins en eau des différentes surfaces irriguées

Les surfaces irriguées (chapitre 3.4.1) ont un besoin en eau très différent. A cette inégalité s'ajoute toute une série de facteurs qui influencent la demande en eau, comme par exemple l'exposition et le type de sol. En règle générale, les prairies et les vergers nécessitent moins d'eau que le vignoble et les golfs. La zone bâtie représente un cas particulier car elle comprend la totalité du milieu urbain et les surfaces calculées sont donc nettement surestimées par rapport aux autres catégories de surface. Enfin, il faut aussi remarquer que les pâturages de la région de Crans-Montana-Sierre ne sont pas irrigués et, par conséquent, ne seront pas traités dans ce chapitre.

3.4.3 Les bisses

Après avoir présenté les principales caractéristiques des zones irriguées, nous étudions le système infrastructurel. L'armature de ce dernier est constituée par le réseau des bisses, canaux d'irrigation creusés à flanc de coteau dès le Moyen Age pour dériver les eaux des rivières en direction des zones des prairies (SHVR, 1995; Nahrath et al., 2011). Les bisses, qui ont permis d'intensifier l'irrigation, sont devenus nécessaires à mesure que la population augmentait et que les cultures s'étendaient (Mariétan, 1948). Un bisse est donc rarement un ouvrage d'un seul jet, mais le résultat de diverses phases de construction (Dubuis, 1995) déterminées par plusieurs facteurs. En fait, les bisses sont en relation avec le climat, l'utilisation des sols, les peuplements, l'économie et l'organisation sociale, ce qui en fait un indice de l'évolution de notre société (Papilloud, 1995).

Le XVe siècle est marqué par le développement dans plusieurs vallées du bassin du Rhône d'un vaste réseau de canaux d'irrigation (Dubuis, 1995). Encore aujourd'hui, les bisses (tableau 3.4) jouent dans la région de Crans-Montana-Sierre un rôle fondamental pour ce qui concerne l'irrigation. Les bisses ont pour fonction primaire de transporter l'eau entre les bassins versants, en traversant les lignes de crête qui les divisent. Les bisses principaux sont complétés par une série d'ouvrages (Reynard, 2008) : le réseau secondaire (qui répartit l'eau dans les secteurs à irriguer), le réseau tertiaire (qui amène l'eau sur les parcelles), des ouvrages de stockage, des prises d'eau, des répartiteurs et des écluses, et finalement, des canaux de décharge qui ramènent l'eau non utilisée dans l'hydrosystème naturel. Certaines installations sont à ciel ouvert et permettent le déplacement gravitaire de l'eau, d'autres sont enterrées (conduites) et l'eau y circule parfois sous pression, permettant l'irrigation par aspersion. Les ouvrages sont gérés soit par les collectivités publiques, soit par des associations communautaires, appelées « consortages » (Reynard et Baud, 2001 et Nahrath et al., 2011). Dans certains cas, il existe une organisation complexe combinant acteurs publics, privés et communautaires (Schweizer et Reynard, 2011; Bréthaut et Nahrath, 2011). La complexité du réseau d'irrigation secondaire est telle que, dans les lignes qui suivent, nous ne décrivons que la partie principale du réseau. Pour chaque bisse, nous décrivons successivement la provenance de l'eau, les infrastructures (canaux principaux, prise d'eau, bassins de stockage principaux) et les principales modalités de gestion. Sur ce dernier point, nous ne donnons que des indications succinctes, dans la mesure où ces points sont au cœur de l'étude menée dans le WP3. Nous décrivons d'abord les infrastructures du bassin versant de la Liène, puis celles de la Raspille (tableau 3.4).

Bisse	Rivière d'origine	Altitude	Longueur	Tronçon à ciel ouvert	Communes traversées	Zones arrosées	Cultures arrosées
Grand bisse de Lens	Liène ^a	1170/960 m	13,8 km	72%	Icogne Lens Chermignon Montana	Icogne Lens Montana Chermignon Granges	Prairies Vergers Vignes
Sillonin	Liène ^b	950/550 m	7,5 km	66%	Icogne St-Léonard Lens	Chelin Flanthey St-Léonard	Vignes Prairies
Tsittoret	Raspille	1960/1720 m	8 km	env. 100%	Mollens Randogne	Mollens Randogne Venthône Veyras Sierre	Prairies Vignes
Bisse Neuf	Raspille	1100/920 m	7,5 km	100%	Mollens Venthône	Anchettes St-Ginier Muraz Veyras Planige	Vignes Prairies
Répartiteur des Planigettes	Raspille	950/875 m	0,4 km	100%	Miège	Miège	Vignes
Bisse du Marais	Raspille	620/540 m	2,2 km	32%	Miège Veyras Sierre	Veyras Sierre	Vignes

^a alimenté par la prise d'eau sous le Roc des Barmes et par le pompage du lac de compensation de Croix

^b alimenté par la conduite d'amenée de Lienne SA, qui prend l'eau au lac de compensation de Croix

Tab. 3.4 – Les bisses de la région de Crans-Montana-Sierre.

Source : Inventaire des bisses du Valais.

Le bisse du Rho et le Mont Lachaux

La date de construction du Bisse du Rho, actuellement abandonné, est inconnue; on peut la situer dans la première moitié du 15^e siècle (Quaglia, 1988). Ce bisse a été remplacé en 1946 par un tunnel sous le Mont-Lachaux, rendu nécessaire par les nouveaux besoins en eau d'irrigation et de boisson de la population du Haut-Plateau (Reynard, 2000a).

Provenance de l'eau L'eau qui coulait dans ce bisse provenait du vallon de l'Ertense, qui est maintenant amenée vers le Haut-Plateau par le tunnel du Mont-Lachaux.

Droit d'eau ou bénéficiaire Les eaux d'irrigation qui coulent sous le Mont-Lachaux sont divisées en quatre parties égales entre les communes d'Icogne, Lens, Chermignon et Montana (Mabillard, 1997).

Infrastructure

Le canal principal du bisse du Rho captait les eaux de l'Ertentse à 1733 m et, après un parcours de 5.3 km le long des parois de la rive gauche de l'Ertentse, débouchait à

l'ouest du Haut-Plateau au Grand-Partiteur, d'où il se sépare en deux branches, l'une en direction de Lens-Icogne et l'autre en direction de Chermignon-Montana (Reynard, 2000a). Le tunnel du Mont-Lachaux commence à 1640 m dans le vallon de l'Ertentse et il débouche au répartiteur de Plans-Mayens à 1627 m après un parcours souterrain de 2.5 km (Mabillard, 1997).

Le Grand Bisse de Lens

Provenance de l'eau L'eau de ce bisse (figure 3.9) provient de la Liène (Commune de Lens, 2012) et de la station de pompage de Croix (Knecht, 2010).

Droit d'eau ou bénéficiaire Les eaux d'irrigation qui coulent sous le Mont-Lachaux sont divisées en quatre parties égales entre les communes d'Icogne, Lens, Chermignon et Montana (Mabillard, 1997).

Infrastructure Le canal mesure 13,8 km de long et traverse les territoires d'Icogne et Lens pour se terminer à Flanthey. En 1983, à cause de l'infiltration dans le sol d'un tiers de l'eau transportée, le contournement de la colline du Châtelard a été remplacé par un tunnel (Reynard, 2000a). Cette portion du Grand Bisse de Lens a été restaurée en 2010 ; elle est entrée en service en mai 2011.

Le Sillonin

Provenance de l'eau Depuis le début de l'exploitation hydroélectrique de la Liène, le bisse du Sillonin (figure 3.9) prend ses eaux directement dans la conduite d'amenée de la Liène SA (figure 3.20).



Fig. 3.9 – Le Grand Bisse de Lens (en haut) et le Sillonin (en bas).

Droit d'eau ou bénéficiaire L'eau d'irrigation de ce bisse se répartit à raison de 10 jours pour Lens et 10 jours pour St-Léonard (Gisiger, 1997).

Infrastructure Après le raccordement à la conduite d'amenée de Lienne SA, le Sillo-nin coule sur 4,5 km sous tuyau avant de s'écouler en surface dès Planisse, sur la commune de St-Léonard. Sa longueur totale est de 7,5 km.

Le Tsittoret

Provenance de l'eau Le Tsittoret capte les eaux de la Tièche à 1960 m.

Droit d'eau ou bénéficiaire À partir de 1993, les droits d'eau, pour la commune de Mollens, sont fixés annuellement par son Conseil communal (Administration communale de Mollens, 1993).

Infrastructure D'une longueur d'environ 8 km, le bisse du Tsittoret (figure 3.10) traverse deux limites de bassin versant. Son parcours, essentiellement à ciel ouvert, est marqué par la présence de nombreux bisse secondaires et ouvrages de répartition (vannes, répartiteurs et ouvrages similaires).

Le Bisse Neuf

Provenance de l'eau L'eau qui coule dans le Bisse Neuf est captée dans la Raspille à environ 1080 m, sur le territoire de la commune de Mollens.

Droit d'eau ou bénéficiaire À cause d'un presque total abandon de l'irrigation gravitaire, substituée par plusieurs systèmes de stockage privés, il n'y a plus de droits fixes sur ce bisse (Crettaz, 2010). Ce sont principalement Venthône et Sierre qui sont



Fig. 3.10 – Le Tsittoret (en haut) et le Bisse Neuf (en bas).

à l'origine de la construction du canal et de sa gestion aujourd'hui encore, mais Miège et Veyras ont également la possibilité d'en profiter (Crettaz, 2010).

Infrastructure D'une longueur d'environ 7,5 km, le Bisse Neuf (figure 3.10) transporte l'eau vers l'ouest, sur la commune de Venthône. Une partie de ces eaux (env. 1'500 l/jour) est captée au lieu-dit Ziettes par la commune de Veyras et amenée vers le réservoir d'eau potable de Bédan.

Les bisses du répartiteur des Planigettes

Provenance de l'eau L'eau qui est répartie aux Planigettes provient de la Raspille (à env. 900 m); le surplus en eau est renvoyé vers la rivière (à env. 860 m).

Droit d'eau ou bénéficiaire Le répartiteur des Planigettes se trouve sur le territoire de Miège (figure 3.11) et n'est pas sujet à des droits d'eau particuliers. Les deux bisses secondaires qui partent du répartiteur ont environ le même diamètre et peuvent être utilisés selon les nécessités des vigneronns de la zone supérieure de la commune de Miège.

Infrastructure Le débit des deux bisses secondaires (figure 3.9 en haut à gauche) qui sont alimentés par le répartiteur des Planigettes est réglé manuellement par des vannes.

Le bisse du Marais

Provenance de l'eau Le bisse du Marais est alimenté par la Raspille à 600 m, sur la commune de Sierre.

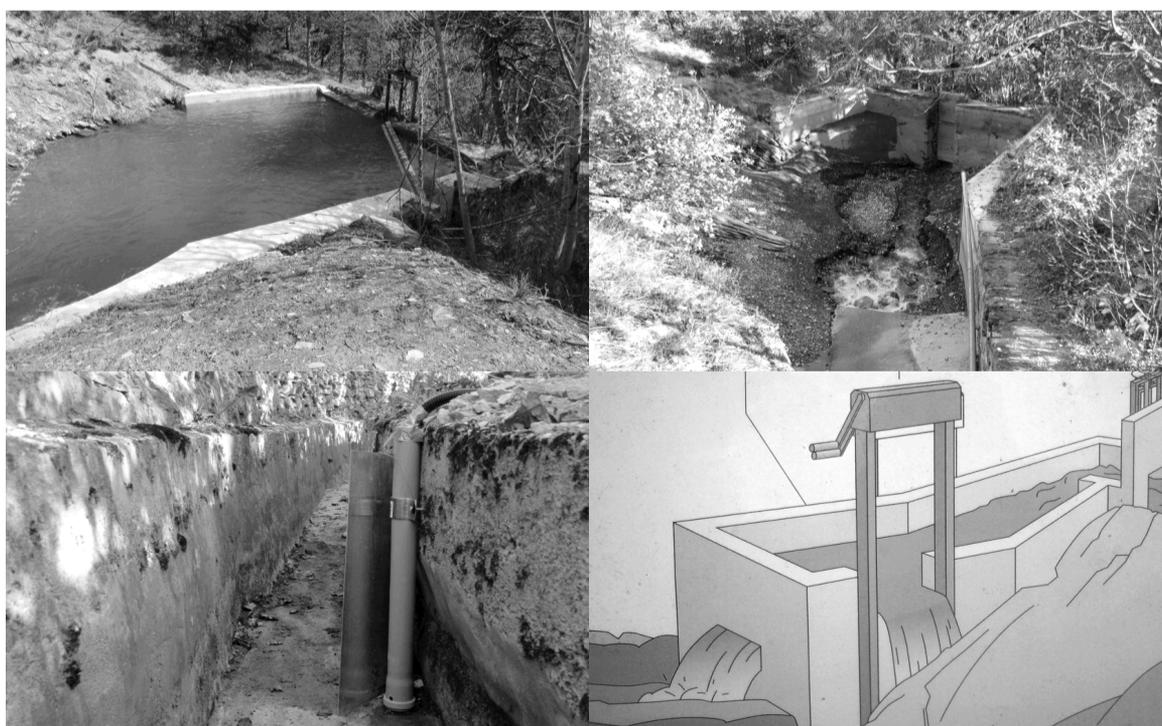


Fig. 3.11 – Le répartiteur des Planigettes (en haut) et le bisse du Marais (en bas).

Droit d'eau ou bénéficiaire Le bisse du Marais (figure 3.11) est utilisé par les vigneronns lorsqu'ils ont besoin d'eau d'irrigation ; il n'y a pas de droits d'eau préétablis.

Infrastructure Ce bisse est de loin celui avec le débit le plus faible de notre région d'étude. Le bisse du Marais est réglé par un répartiteur (figure 3.9 en bas à droite).

Le bisse du Marais est divisé en deux tronçons par un deuxième répartiteur qui permet soit d'amener l'eau vers les vignes qui se trouvent à l'aval, soit de la retourner vers la Raspille. Durant la majeure partie de la saison d'irrigation, le tronçon à l'aval n'est pas en eau ; il est utilisé seulement dans les périodes les plus sèches de l'année.

3.4.4 Les principaux ouvrages de stockage

Sur le Haut-Plateau, les lacs (tableau 3.5) constituent un élément particulier du système d'irrigation dans la mesure où ils sont souvent utilisés pour d'autres usages de l'eau. Dans ce chapitre, nous décrivons les principaux lacs, en mettant l'accent sur la provenance de l'eau les alimentant, sur la propriété de l'ouvrage et sur les usages qui en sont faits.

Ouvrage	Altitude	Volume	Localisation	But
Lac de Chermignon	1560 m	130'000 m ³	Lens	EP, EI, EA
Étang d'Icogne	1405 m	70'000 m ³	Lens	EP, EI
Étang Grenon	1497 m	117'800 m ³	Montana	EP, EI
Étang de la Moubra	1424 m	204'000 m ³	Montana	EI, LB, EA
Étang Long	1455 m	50'000 m ³	Chermignon	EI, LB
Étang Blanc	1440 m	30'000 m ³	Chermignon	EI
Lac de Combuissant	1440 m	30'000 m ³	Chermignon	EI
Étang d'Ycoor	1490 m	inconnu	Montana	LB
Lac de Miriougues	1333 m	70'000 m ³	Lens	EI
Lac Louché	1140 m	50'000 m ³	Lens	EI

EP : eau potable

EI : eau d'irrigation

EI : enneigement artificiel

LB : loisirs, biotopes

Tab. 3.5 – Les principaux ouvrages de stockage de la région de Crans-Montana-Sierre.

Le lac de Chermignon

L'eau du lac de Chermignon (situé sur la commune de Lens, 1560 m ; capacité: 130'000 m³) provient principalement de l'Ertense par le tunnel du Mont-Lachaux et est utilisée pour l'enneigement artificiel par CMA SA, l'eau potable par la commune de Chermignon et l'eau d'irrigation par la commune de Lens et par les golfs.

L'Étang d'Icogne

L'eau de l'Étang d'Icogne, situé sur la commune de Lens (1405 m ; capacité: 70'000 m³) provient principalement de l'Ertense par le Tunnel du Mont-Lachaux et est utilisée pour satisfaire les besoins en eau d'irrigation de la commune d'Icogne et de Lens.

L'Étang Grenon et l'Étang de la Moubra

L'eau de l'Étang Grenon (1497 m, capacité: 117'800 m³) et de l'Étang de la Moubra (1424 m, capacité: 204'000 m³), tous deux situés sur la commune de Montana, provient principalement de l'Ertense par le Tunnel du Mont-Lachaux; elle est utilisée pour satisfaire les besoins en eau d'irrigation de la commune de Montana et compenser le manque d'eau des communes de Montana (eau potable) ou Chermignon (eau potable et d'irrigation).

L'Étang Long, l'Étang Blanc et le Lac de Combuissant

Le consortium des Étangs de Chermignon est propriétaire de l'Étang Long (1455 m, capacité: 50'000 m³) et de l'Étang Blanc (1440 m, capacité: 30'000 m³) et dispose d'une réserve dans le lac Grenon (Savoy, 2010). L'eau de l'Étang Long provient de la région située au nord de la retenue et du lac Grenon. Une partie de l'eau est amenée à l'Étang Blanc et de là vers les zones d'irrigation de la commune de Chermignon et du Lac de Combuissant (960 m, capacité: 30'000 m³).

L'Étang d'Ycoor

L'eau de l'Étang d'Ycoor (env. 1490 m) est issue de sources (Rey, 2002) et utilisée, pendant la saison d'arrosage, pour satisfaire les besoins en eau d'irrigation de la commune de Montana (Reynard, 2000a). Pendant l'hiver, l'Étang d'Ycoor devient une patinoire et représente une des attractions principales et caractéristiques de la station touristique de Crans-Montana. Prochainement, un projet de renouvellement (figure 3.12) de la zone va complètement remodeler le visage de la station, en offrant des espaces multifonctions (Emery Mayor, 2010).

Le lac de Miriougues

L'eau du Lac de Miriougues (1333 m, capacité: 70'000 m³) provient de la région située au sud du lac d'Icogne et est utilisée pour satisfaire les besoins en eau d'irrigation du village de Lens.

Le Lac Louché

L'eau du Lac Louché (1140 m, capacité: 50'000 m³) provient essentiellement du trop-plein du lac de Miriougues et est utilisée pour satisfaire les besoins en eau d'irrigation du village de Lens.



Fig. 3.12 – Les étangs de la région.

Le lac Louché (en haut à gauche), l'Étang de la Moubra (en haut à droite),
l'Étang long (en bas à gauche) et l'Étang d'Ycoor (en bas à droite).

3.4.5 L'irrigation des vignes

Introduction

En moyenne, les vignes qui poussent sur les sols caillouteux et calcaires de la région jouissent de plus de 2000 heures d'ensoleillement annuel, mais par contre, seulement 700 mm de précipitations, conditions semblables à celles de Bordeaux en France (données Météosuisse et Météo-France). Selon nos calculs, entre St-Léonard et Miège, les cultures sont comprises entre la plaine du Rhône (env. 510 m) et 850 m d'altitude, en occupant une surface d'environ 11.38 km², dont la plupart indirectement irriguée par les bisses de la région. En fait, les bisses représentent la partie principale du réseau d'irrigation destinée au transport de l'eau. Ces canaux présentent un nombre remarquable de vannes sur leurs côtés, points de départ du réseau d'irrigation secondaire. L'eau destinée à l'irrigation des vignes (figure 3.13) est amenée vers le vignoble par un réseau très hétérogène de bisses et conduites secondaires (à ciel ouvert, bétonnés, sous tuyau, etc.).



Fig. 3.13 – Irrigation des vignes par aspersion et système de transport de l'eau.

Techniques d'irrigation du vignoble

La plupart du vignoble du Valais central, région de Sierre comprise, est arrosé en utilisant l'irrigation par aspersion. Cette technique d'irrigation prévoit que l'eau soit envoyée sous pression aux arroseurs et distribuée sur les vignes sous forme d'une fine pluie artificielle. L'aspersion présente plusieurs inconvénients (tableau 3.6) et gâche, à cause de l'évaporation, une partie de l'eau qui sort des arroseurs. Pratiqué pour l'instant que par une petite minorité de pionniers, le goutte-à-goutte (figure 3.14) permet de ne pas gaspiller d'eau, car les plantes sont irriguées directement aux racines. Une automatisation/informatisation du système permet de contrôler minutieusement la quantité d'eau que chaque plante reçoit. Ceci a une importance non négligeable, sachant qu'en viticulture, une alimentation en eau déficitaire¹³ est nécessaire pour une production de vins de qualité (Van Leeuwen et Seguin, 1994). Le goutte-à-goutte semble favoriser doublement la production du vin, en ne gaspillant pas d'eau et en

13. Le déficit hydrique de la plante apparaît lorsque la quantité d'eau transpirée par les feuilles dépasse la quantité d'eau absorbée par les racines (Bray, 1997).

Système d'arrosage	Aspersion	Goutte à goutte
Mise en garde	Demande une parfaite coordination avec les traitements phytosanitaires (toujours renouveler le traitement un à deux jours après un arrosage).	Nécessite des eaux de qualité, exemptes d'impureté (filtration indispensable ; système de filtration à choisir en fonction de la qualité de l'eau).
Avantages	Peu sensible à la qualité de l'eau. Surveillance facilitée de l'arrosage. Polyvalence : peut servir à lutter contre le gel de printemps. Nombre limité d'apports.	Faible évaporation. Économie d'eau (env. 30%). Pas de lessivage des fongicides. Indépendance vis-à-vis des autres travaux et de la forme de la parcelle. Précision de l'apport (temps et positionnement), limité au caillou. Fertigation possible.
Inconvénients	Refroidissement et durcissement du sol, croûtage du sol. Forte évaporation. Sensible au vent. Lessivage des engrais et des fongicides. Développement des maladies favorisé. Levée des adventices sur sol nu et le développement de l'enherbement dans l'interligne. Uniformisation difficile des apports d'eau (vent, forme de la parcelle). Interférence possible avec parcelles attenantes (problème de voisinage). Vidange automnale des conduites plus longue.	Utilisation et entretien des installations plus techniques. Apports plus nombreux. En cours d'utilisation, surveillance attentive de l'installation et de l'état de colmatage des filtres.
Risques	Brûlure des feuilles (eau chauffée dans les conduites). Effondrement des murs en cas de création de poches d'eau.	Risque d'obstruction des goutteurs (essentiellement par des particules solides en suspension).
Coût indicatif de l'installation (en CHF)	env. 0,85 / m ² (conduites en polyéthylène).	0,65 – 1,20 / m ² .
Durée de vie estimée	-	Au moins 15 ans.
Remarques	Implantation des asperseurs pour obtenir une pluviométrie aussi uniforme que possible : en carré ou en triangles équilatéraux. En présence de vent dominant, préférer une disposition des asperseurs en rectangle, la plus grande distance se situant dans le sens du vent dominant.	Pour les vignes en pente, il existe des goutteurs avec compensation de pression pour obtenir un débit homogène. Pour un même débit, l'utilisation du goutte à goutte permet d'irriguer simultanément 2 à 5 fois plus de surface que l'utilisation d'asperseurs.

Tab. 3.6 – Techniques d'irrigation du vignoble.

Source : Service de l'agriculture du canton du Valais, 2010.

améliorant, si possible, la qualité. Vu le risque de pénurie d'eau dans le Valais central, Stéphane Emery, collaborateur agro-scientifique à l'État du Valais, considère que le goutte-à-goutte représente le futur de l'irrigation dans cette région. En effet, des sécheresses pendant l'été peuvent stopper le développement et causer une chute pré-

maturée des feuilles (Prichard, 2000) et économiser de l'eau pourrait éviter ce genre de situation.



Fig. 3.14 – Irrigation au goutte-à-goutte : infrastructure et arrosage du vignoble.

Photos : Stéphane Emery, Service de l'agriculture du canton du Valais.

3.4.6 L'irrigation des prairies et des vergers

Les parcelles agricoles qui ne sont pas occupées par le vignoble sont utilisées principalement comme pâturages ou comme prairies. Les premières sont utilisées pour faire paître le bétail, les deuxièmes sont fauchées pour en faire du foin. L'irrigation se fait principalement par aspersion en utilisant des arroseurs rotatifs fixes et mobiles. La mobilité d'une partie du réseau d'irrigation témoigne de la flexibilité d'usage des parcelles, qui peut varier d'une année à l'autre. La figures 3.15 montre comment la plupart de l'irrigation des prairies et des vergers est pratiquée.



Fig. 3.15 – Irrigation des vergers et des prairies.

3.4.7 L'irrigation des zones résidentielles

L'intensité de l'irrigation des gazons (figure 3.16) est témoignée par la remarquable différence entre l'intensité de la couleur de ces derniers par rapport aux environs. Dans la région, on assiste également à une progressive automatisation des systèmes d'arrosage des gazons. Cette mise à jour technologique aide à rationaliser l'utilisation de l'eau et éviter le gaspillage (annexe 4a).



Fig. 3.16 – Irrigation des gazons.

Un gazon nécessite beaucoup d'arrosage, d'engrais synthétiques et de pesticides, plus particulièrement des herbicides sélectifs et des produits antimousse, combinés très souvent avec des engrais et vendus sous les noms d' « engrais sélectifs » ou « engrais antimousse »¹⁴. Chaque propriétaire aménage son gazon de manière indépendante et il n'y a donc pas de données qualitatives ou quantitatives par rapport :

- aux engrais employés
- à la quantité d'eau potable (en m³) utilisée uniquement pour arroser la pelouse
- à la fréquence/intensité des arrosages
- à l'automatisation du système d'arrosage
- à la biodiversité de la pelouse

La consommation annuelle d'eau utilisée pour arroser un jardin est de 0.24 m³ d'eau par m² de pelouse par année dans la région de Zurich (Tobler Haustechnik AG, 2009). En tenant compte des précipitations annuelles plus faibles qu'à Zurich, on peut conclure que l'arrosage des pelouses dans notre région d'étude est certainement supérieur à 0.24 m³/m²/an et se situe probablement entre 0.25 et 0.35 m³/m²/an.

14. <http://www.energie-environnement.ch> , consulté le 7 juin 2011.

3.4.8 L'irrigation des golfs

La région de Crans-Montana-Sierre compte quatre parcours dédiés à ce sport : deux parcours professionnels se trouvent sur le Haut-Plateau et sont de loin les plus connus et importants de la région ; les deux autres parcours sont ouverts à tous les joueurs avec ou sans handicap. Le golf de Noas (Chermignon) et le Super-Crans de Vermala nécessitent un entretien nettement inférieur par rapport aux parcours professionnels du Haut-Plateau (figure 3.17).

Les golfs du Haut-Plateau

Les golfs Ballesteros et Nicklaus (figure 3.18) sont arrosés avec de l'eau provenant du lac de Chermignon. En cas de pénurie, ils peuvent également exploiter l'eau du barrage de Tseuzier (qui transite par la conduite de Lens) achetée à la société Lienne SA. La conduite qui amène l'eau du lac de Chermignon vers les golfs se divise en deux avant la station de potabilisation. Cette astuce permet de ne pas utiliser de l'eau potable pour irriguer les terrains de jeu. Si les conditions météorologiques l'exigent, les parcours, entre le début mai et la fin octobre, sont arrosés le soir (Emery, 2010). L'arrosage vise premièrement à pallier l'irrégularité des précipitations de la région (Emery, 2010) et à imiter, dans les limites du possible, le climat écossais, là où ce sport d'élite est né.

Les additifs utilisés

Selon Hector Forcen¹⁵, responsable des parcours du Golf-Club Crans-sur-Sierre, des additifs sont utilisés lors de l'irrigation des parcours. Ils sont au nombre de trois et appartiennent à deux catégories d'additifs spécifiques : ceux qui aident à conserver l'humidité de la pelouse et ceux qui limitent l'infiltration de l'eau dans le sol¹⁶. Ils sont utilisés systématiquement sur les greens, la partie du parcours la plus demandeuse en entretien du parcours. Les fairways, partie normale du parcours où l'herbe est entretenue (Bernard, 1970), demandent par contre une application d'additifs ciblée aux endroits les plus sujets à se détériorer.

15. Correspondance électronique du 23 mars 2011.

16. Additifs :

AffinityTM - Multi-Function Nonionic Soil Wetting Agent

(<http://www.beckerunderwood.com>) : conserve l'humidité dans le terrain et en améliore la distribution. Il favorise également la croissance des racines en profondeur.

DispatchTM (<http://www.aquatrols.com>) et TriCureTM (<http://tricure.com>) : ces deux produits sont constitués de copolymères blocs (polymère dont les macromolécules sont constituées de blocs enchaînés linéairement) et exploitent les propriétés de leurs nanostructures pour augmenter la rétention hydrique du sol (<http://www.cmse.ed.ac.uk>, consulté le 21 décembre 2011).



Fig. 3.17 – Le golf de Noas.



Fig. 3.18 – Les parcours de golf du Haut-Plateau.

3.5 L'hydroélectricité

L'hydroélectricité concerne principalement le bassin versant de la Liène et la société exploitante Lienne SA. Dans la région sont également présentes quelques microcentrales hydroélectriques, ces installations permettant de produire de l'électricité en exploitant la chute gravitaire de l'eau dans les conduites du réseau de distribution de l'eau potable et d'irrigation. Nous introduisons en premier l'infrastructure de Lienne SA, car elle mobilise une quantité d'eau beaucoup plus grande que celle exploitée par les microcentrales.

3.5.1 La concession de la Liène et le barrage de Tseuzier

En Suisse, les collectivités publiques peuvent concéder l'exploitation d'un réseau d'aménagement hydroélectrique à une société privée. En acquérant le droit d'assurer un service public, la société privée s'engage à exploiter le service à ses frais. Ce genre de contrat de longue durée (pour permettre l'amortissement des investissements réalisés par le concessionnaire) est plus connu en Suisse dans le domaine de l'hydroélectricité que dans l'approvisionnement en eau potable (OFEN, 2008).

Le 24 février 1948, Lienne SA a obtenu l'homologation par le Conseil d'État des concessions supérieures de la Liène¹⁷. Après cette première concession, le barrage-voûte de Tseuzier (figure 3.19) a été construit (1952 - 1956) par la société Electricité de la Lienne SA, née de l'actionnariat de Suisse Electra, des Services Industriels de Sion, des Forces Motrices Bernoises SA, de Lonza SA et du canton de Bâle-Ville, qui se partagent à parts égales le capital-actions de la nouvelle société (Reynard, 2000a). La concession a été attribuée en 1958 par les communes d'Ayent, d'Icogne, de St-Léonard et de Sion¹⁸.

En 2023, 15 ans avant la fin de la concession du barrage de Tzeusier, qui échoit officiellement le 1er janvier 2038, Lienne SA devra officiellement reprendre contact avec les communes pour discuter du futur de ses installations. Lors du retour de concession de l'aménagement, la collectivité concédante peut¹⁹ :

- Reprendre l'aménagement et rétribuer le concessionnaire pour la partie dite sèche
- Constituer une société de partenaires propre à l'aménagement
- Octroyer une nouvelle concession à un concessionnaire de son choix

17. <http://www.phegos.ch>, consulté le 28 mars 2011.

18. <http://www.bkw-fmb.ch>, consulté le 28 mars 2011.

19. <http://www.fmv.ch>, consulté le 3 mars 2011.



Fig. 3.19 – Le lac d'accumulation de Tseuzier

3.5.2 L'infrastructure et le fonctionnement du système

Les ouvrages principaux destinés à l'hydroélectricité dans la région sont au nombre de sept (figure 3.20) et seule la centrale de Beulet, propriété d'Énergie de Sion-Région SA, n'appartient pas directement à Lienne SA.

Le barrage de rétention de Tseuzier Situé à l'ouest du Haut-Plateau, le barrage-voûte de Tseuzier a un volume utile de 50 millions de m³. Il draine son bassin topographique naturel ainsi que le haut bassin versant de l'Ertentse²⁰.

Le réservoir du Six du Chamarin Cet ouvrage se trouve à env. 1700 m. En plus de l'alimentation de la centrale de Chamarin, il permet d'alimenter la conduite d'eau potable de la commune d'Ayent avec l'eau qui arrive de la galerie amenée du barrage de Tseuzier. Il fournit également l'eau au bisse de Sion.

La centrale hydroélectrique de Chamarin Cette centrale se trouve à environ 1380 m et elle a deux fonctions : produire de l'électricité et alimenter en eau le Grand bisse d'Ayent. Depuis la construction de l'aménagement de Lienne SA, ce dernier ne capte en effet plus les eaux dans la Liène (Loretan, 1999). Entre le Six du Chamarin et la centrale, la conduite est sous pression, ce qui permet le turbinage.

La centrale hydroélectrique de Croix Cette centrale se trouve à env. 1100 m. Elle est alimentée par l'eau provenant de la centrale de Chamarin. La conduite reliant

20. Cf. Atlas hydrologique de la Suisse (1992).

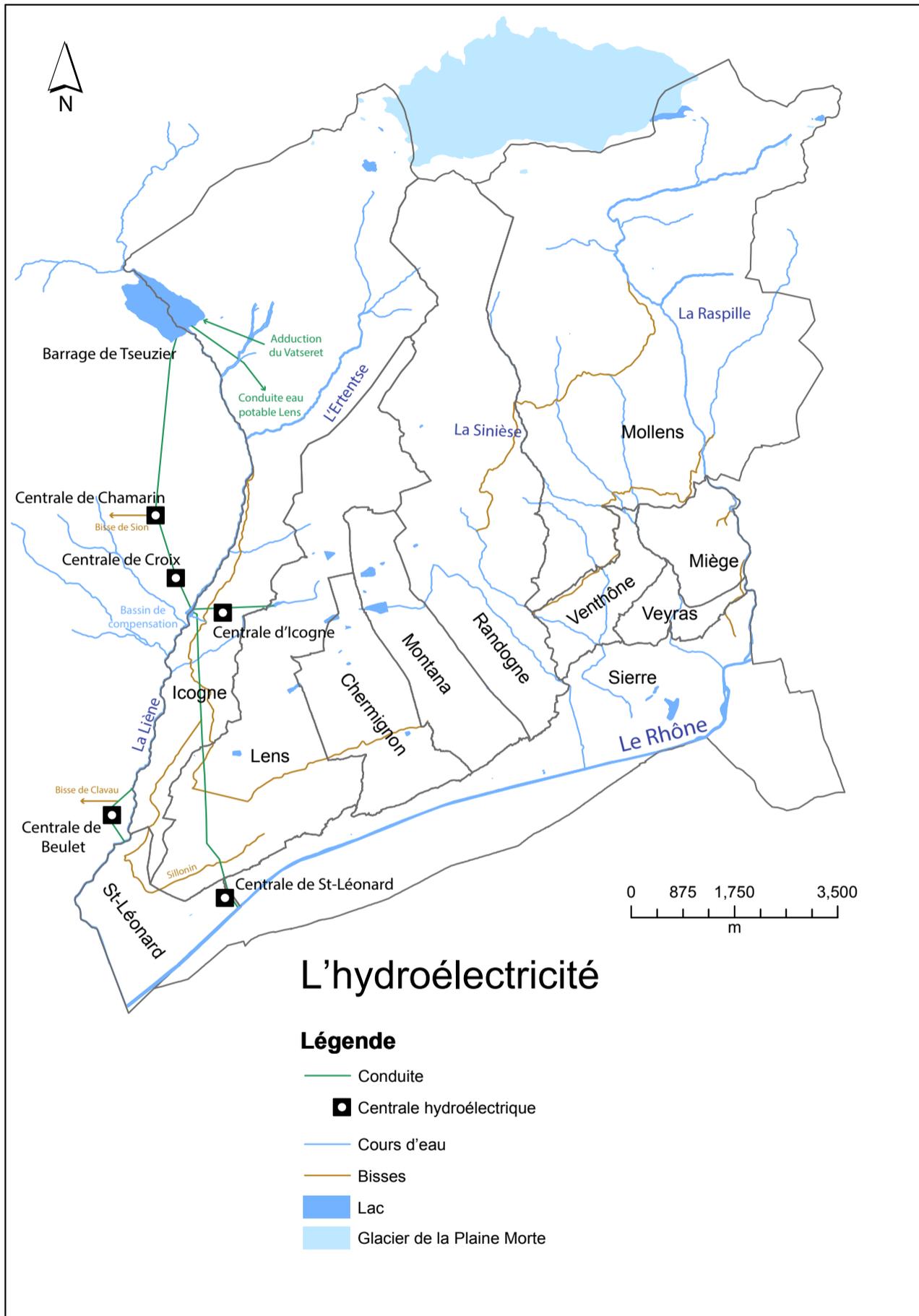


Fig. 3.20 – Hydroélectricité dans le bassin versant de la Lièze.

Source : Service des registres fonciers et de la géomatique du canton du Valais et Lièze SA (modifié).

les deux centrales est sous pression, ce qui permet le turbinage.

Le bassin de compensation de Croix L'eau turbinée par la centrale de Croix est déversée dans ce bassin de compensation situé à 919 m. Le bassin est également muni d'une station de pompage permettant d'alimenter en eau le Grand Bisse de Lens qui, depuis la construction de l'aménagement de Liègne SA, ne prélève plus son eau directement dans la Liègne (Reynard, 2000a).

La centrale hydroélectrique de Beulet Cette centrale exploite l'eau qui est prélevée dans la Liègne par une prise d'eau qui se trouve à 700 m d'altitude. La conduite d'amenée entre la prise d'eau et la centrale fournit aussi l'eau au bisse de Clavau.

La centrale hydroélectrique de St-Léonard La centrale de St-Léonard, située à env. 500 m, est alimentée en eau par la galerie d'amenée qui part du bassin de compensation de Croix (et qui fournit aussi l'eau au bisse du Sillonin). Cette galerie est transformée en une conduite forcée qui permet le turbinage.

3.5.3 La production électrique

La production d'électricité est fortement influencée par la demande et par la disponibilité de la ressource en eau ; elle varie donc pendant l'année. Dans les rapports de gestion de la Liègne SA, on distingue seulement deux saisons au sein de l'année hydrologique, l'hiver (où environ 60% de l'énergie est produite) et l'été. Il faut aussi remarquer que les quatre centrales hydroélectriques n'ont pas la même capacité de production hydroélectrique (tableau 3.7). La centrale de Chamarin n'est normalement pas active en hiver.

	Chamarin [GWh]	Croix [GWh]	St-Léonard [GWh]	Beulet [GWh]
Moyenne annuelle	0.9	72.8	46.9	2.5

Tab. 3.7 – Production hydroélectrique du bassin versant de la Liègne.

Sources : Rapports de gestion de Liègne SA (2002-2011) et ESR SA (2010).

3.5.4 Le bassin versant de la Raspille

Ce bassin versant ne présente pas d'installations hydroélectriques à cause de la répartition en parties égales des eaux de la Raspille entre la rive gauche et droite (Ammann, 2011), établie par la sentence de Josse de Silenen, datant de 1490 (Giovanola et Karlen, 1999) :

« En outre, tout le reste de l'eau de la Raspille, qui descend par la Raspille jusqu'aux grands bisses de Salquenen et de Varone, y compris Miesoz [Miège], doit être partagé en deux parts égales, dont l'une appartient désormais, à perpétuité sans obstacle ou opposition d'une partie quelconque aux communes de Salquenen et Varone, et l'autre partie à ceux de la contrée de Sierre et de Miesoz de telle sorte que ceux de Sierre peuvent prendre leur part de dite eau où cela leur paraît convenir, plus haut ou plus bas²¹ ».

Ce document, rédigé à la fin du Moyen Âge, reste valable et a limité jusqu'ici l'exploitation hydroélectrique de la rivière en question.

3.5.5 Mini-hydroélectricité

En mai 2012, Icogne Energie SA a terminé de construire une centrale hydroélectrique d'une puissance de 4'500'000 KWh/an (figure 3.21). Cette centrale turbine le surplus des eaux du lac d'Icogne, situé sur le territoire de la commune de Lens, mais propriété de la commune d'Icogne²². Les difficultés de construction, notamment la construction de la conduite forcée jusqu'à la Liène, ont été surmontées avec succès et l'usine est désormais opérationnelle, a pu annoncer Eric Kamerzin, président de la société, aux actionnaires lors de la première assemblée tenue le 21 mai 2012 (Sixième Dimension, 2012).

3.5.6 Micro-hydroélectricité

Les centrales microélectriques exploitent la chute de l'eau dans les conduites de transport et ont une puissance limitée (comprise entre 20 et 500 KWh/an²³). Actuellement, seule la commune de Lens a mis en place ce type d'installation.

21. Traduction du latin par M. G. Ghika, ancien archiviste cantonal, in Reynard (2000a).

22. D'après l'entretien du 30 mars 2011 avec Eric Kamerzin, Président de la commune d'Icogne.

23. <http://www.ademe.fr>, consulté le 10 juin 2011.



Fig. 3.21 – Le lac d'Icogne et la nouvelle infrastructure d'Icogne Energie SA

Source de l'image à droite en bas : Sixième Dimension, 2012.

La salle de turbines avec le président Eric Kamerzin.

3.6 L'eau industrielle

« L'eau industrielle désigne l'eau résiduaire qui provient des différents usages industriels. Les caractéristiques de ces eaux sont extrêmement variables et directement liées au type d'industrie, en fonction de leurs caractéristiques, elles peuvent être envoyées au réseau des eaux pluviales ou des eaux usées²⁴ ».

Dans ce chapitre, nous utilisons une définition différente c'est-à-dire l'eau qui entre dans un établissement industriel et non celle qui en sort. Nous considérons également comme eau industrielle l'eau utilisée par tous les secteurs économiques. Nous étendons donc la définition d'industrie à la plupart des activités humaines qui produisent des biens matériels et/ou immatériels.

3.6.1 Localisation des établissements par secteur et commune

Selon le Recensement fédéral des entreprises (OFS, 2008), la région d'étude est clairement orientée vers le secteur tertiaire, qui représente près de 68% des établissements industriels. La figure 3.22 met en évidence le déséquilibre existant entre les communes en termes de nombre absolu d'établissements industriels. La ville de Sierre est de loin celle ayant le poids économique le plus élevé, avec un total de 936 établissements industriels, c'est-à-dire 46.6% du total. Les communes de Chermignon, Lens, Montana et Randogne, toutes situées sur le Haut-Plateau, présentent aussi un nombre considérable

24. <http://www.dictionnaire-environnement.com>, consulté le 10 janvier 2011.

(>100) d'établissements économiques. Les communes restantes présentent un nombre d'établissements industriels inférieur à 100 et la proportion entre les secteurs est ici (ex. Miège et Venthône) beaucoup plus hétérogène par rapport aux communes précédentes.

3.6.2 Établissements et emplois du secteur secondaire et tertiaire

Dans ce sous-chapitre, nous mettons l'accent sur les secteurs secondaire et tertiaire, en traitant seulement marginalement le secteur primaire. Le tableau 3.8 montre que le nombre d'employés par établissements change sensiblement entre les communes et les secteurs économiques, en raison de l'hétérogénéité des activités humaines sur le territoire (localisation, typologie, taille, employés). Le rapport entre nombre d'employés et nombre d'établissements permet de mieux comprendre la taille des entreprises présentes dans la zone d'étude et par conséquent leur possible demande en eau. Il faut remarquer que la quantité d'eau utilisée par une entreprise dépend d'une multitude de facteurs qui sont difficilement prévisibles ou quantifiables (par exemple le taux d'activité), ce qui rend utopique une quantification précise du phénomène.

Communes	Secteur secondaire			Secteur tertiaire		
	Établissements	Employés	Emp. par ét.	Établissements	Employés	Emp. par ét.
Chermignon	31	286	9.23	125	611	4.89
Icogne	9	36	4	10	44	4.4
Lens	29	184	6.34	153	1026	6.71
Miège	9	56	6.22	17	72	4.24
Mollens	7	38	5.43	17	58	3.41
Montana	24	207	8.63	135	1005	7.44
Randogne	18	123	6.83	87	1116	12.83
St-Léonard	15	94	6.27	47	289	6.15
Sierre	146	2664	18.25	727	6602	9.08
Venthône	11	35	3.18	21	92	4.38
Veyras	11	59	5.36	23	79	3.43
Total	310	3782	12.2	1362	10994	8.07

Tab. 3.8 – Établissements et emplois du secteur secondaire et tertiaire.

Office de statistique du canton du Valais, 2010.

3.6.3 Concentrations temporelles des usages de l'eau

La consommation d'eau par l'industrie est aussi très variable du point de vue temporel. Les caves, par exemple, utilisent de grandes quantités d'eau pendant les vendanges ; l'hôtellerie utilise plus d'eau pendant la haute saison touristique. Par contre, les établissements économiques qui ne dépendent pas directement ni du système naturel ni de

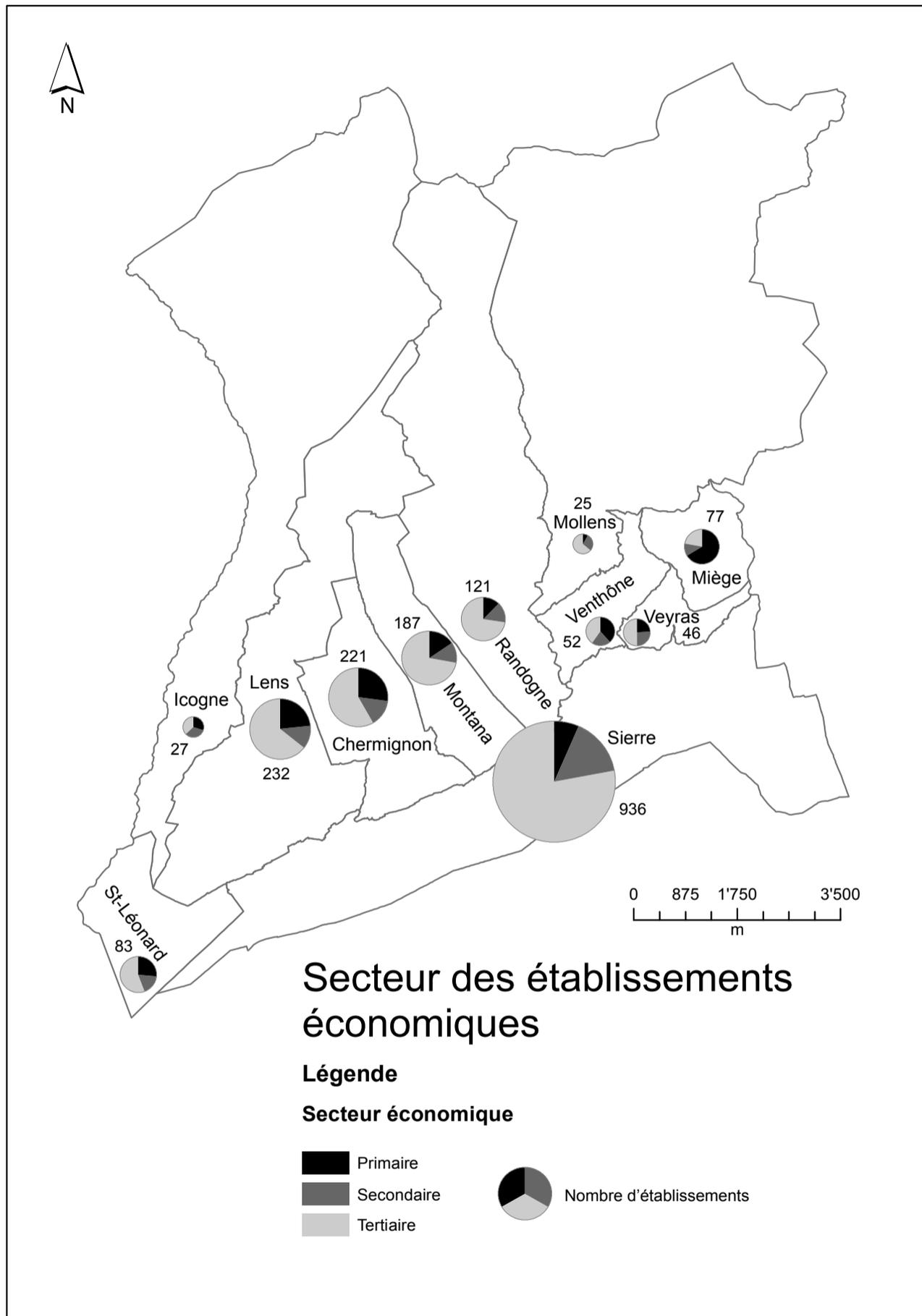


Fig. 3.22 – Répartition par secteur des établissements économiques.

Source : Service des registres fonciers et de la géomatique du canton du Valais et OFS, 2008.

la fréquentation touristique ont une consommation en eau plutôt homogène pendant l'année. C'est le cas de nombreux établissements secondaires et tertiaires. Par contre, la demande varie fortement en fonction des jours de la semaine, comme cela a été démontré dans la vallée de Joux (Bissig, 2004).

3.6.4 L'agropastoralisme

Les alpages du Haut-Plateau sont généralement exploités entre la mi-juin et la mi-septembre, selon les conditions météorologiques (figures 3.23 et 3.24). On est donc face à un usage de l'eau qui a une concentration temporelle bien définie, avec une durée idéale d'une centaine de jours. La concentration spatiale est également bien définie, les alpages étant situées dans la partie haute de la région d'étude, entre 1800 et 2500 m d'altitude. La distribution des alpages ne respecte pas la distribution politique des communes car elle dépend de la morphologie du territoire et des anciennes limites communales. L'eau pour l'abreuvement du bétail et pour la production de fromage ne provient pas du réseau d'eau potable, mais de sources présentes sur place.

Pollution liée à la production du fromage

La production de fromage nécessite de grandes quantités d'eau en produisant ensuite de grandes quantités d'eaux usées. En moyenne, un litre d'eau blanche est produit pour chaque litre de lait traité. Le processus de fabrication fromagère est également affecté par une autre charge polluante : le lactosérum. « Pour 100 litres de lait produits et transformés en fromage, 90 litres de lactosérum sont produits, soit une charge polluante journalière équivalente à celle de 80 habitants. Le lactosérum est un polluant de premier ordre. Un litre de lactosérum rejeté dans la nature est équivalent à la pollution journalière de 0,6 à 1 habitant » (Charnay, 2010). « A cette pollution [...] s'ajoutent [...] les pollutions liées aux eaux blanches et eaux vertes : elles comprennent l'eau de lavage et rinçage, des détergents et résidus perdus lors de la fabrication » (Charnay, 2010). « Pour un litre de lait transformé, en moyenne les effluents produits correspondent à une pollution brute de 0,04 EH sans lactosérum, et d'environ 1 EH avec lactosérum » (Charnay, 2010).

Pollution d'origine fécale

Les rejets fécaux des troupeaux inalpés représentent la première source de pollution sur les alpages (Charnay, 2010). La présence d'alpages combinée avec la présence de sources karstiques, comme cela est le cas sur le Haut-Plateau, provoque à chaque orage une pollution de certaines sources. Ces sources sont très vulnérables à la pollution car

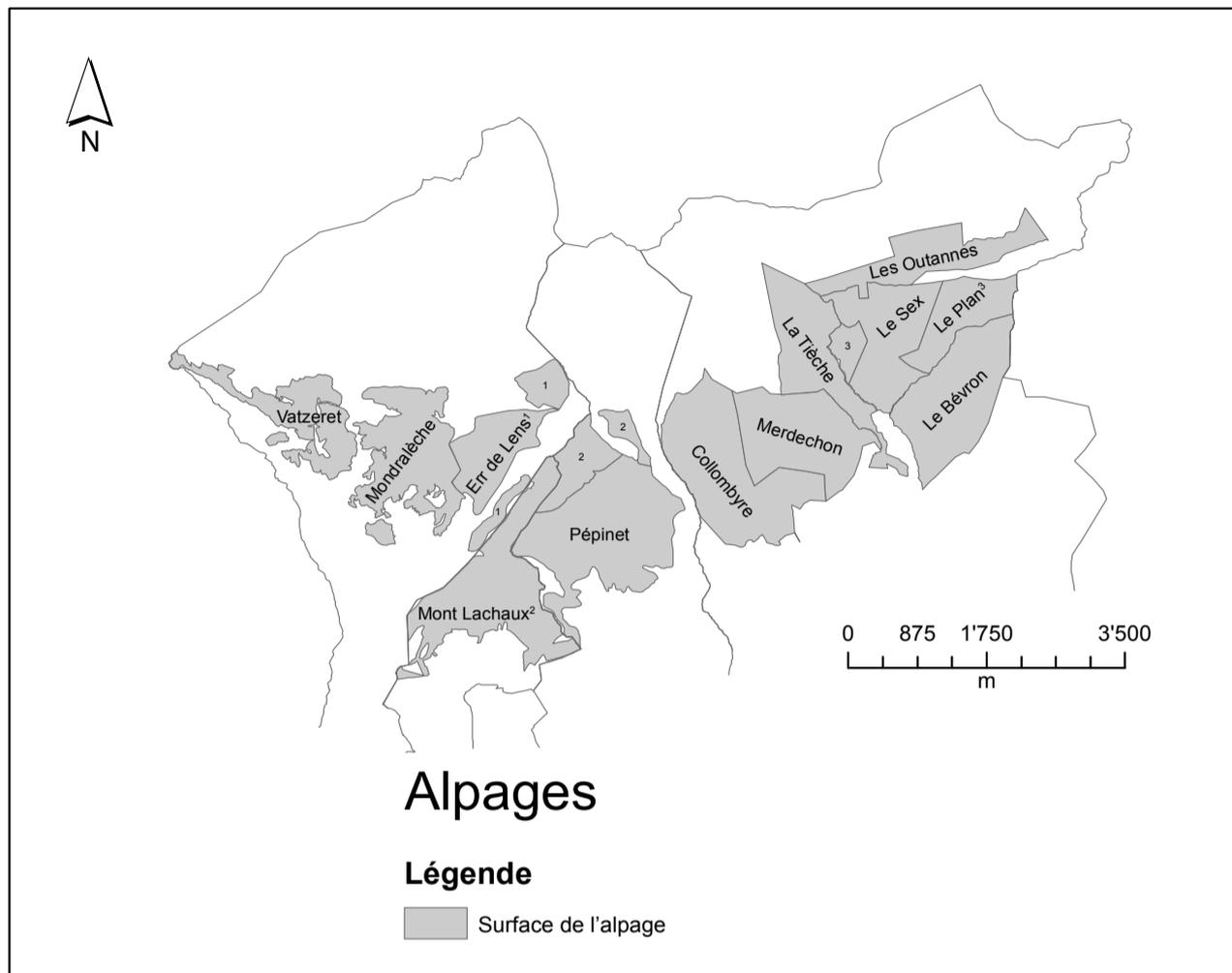


Fig. 3.23 – Les alpages de la région de Crans-Montana-Sierre.

Source : Service des registres fonciers et de la géomatique du canton du Valais et Commune de Montana, 2005.

elles se trouvent dans un contexte géologique et géomorphologique qui présente une infiltration rapide d'eau dans le terrain. D'après les entretiens effectués dans le cadre de ce projet, le vallon de l'Ertentse est le seul cas de pollution qui semble se reproduire avec une certaine fréquence (chronique)²⁵.



Fig. 3.24 – Vaches au pâturage et veau à la ferme.

Sur la photo à droite, Hanspeter Liniger.

25. D'après l'entretien du 16 août 2010 avec Sarah Derendinger, collaboratrice du bureau Arcalpin.

3.7 La production de neige artificielle

3.7.1 Développement dans la région d'étude

En opposition à l'irrigation, l'enneigement artificiel (figure 3.25) a une histoire plus récente, surtout sous nos latitudes. Nous avons donc consacré plus d'espace à cet usage par rapport à ceux plus traditionnels. En effet, cette pratique ne s'est développée en Suisse qu'à partir des années 1990, à la suite de plusieurs hivers sans enneigement suffisant (1987/88 - 1989/90), afin de combler le manque de neige, réapprovisionner le manteau neigeux et assurer la sécurité des skieurs. Les objectifs de l'enneigement artificiel consistent essentiellement à prolonger la saison de ski le plus possible et étendre spatialement le domaine skiable vers les altitudes les plus basses, où la pratique des sports de glisse ne serait désormais plus possible simplement en exploitant la neige naturelle.



Fig. 3.25 – Dernier canon à neige au fond de la piste du Signal.

Conduite de l'air comprimé à gauche ; conduite d'eau à droite.

L'enneigement artificiel vise également à garantir un enneigement suffisant tout au long de la saison. Pour garantir des pistes impeccables, une préparation d'une vingtaine de jours est indispensable ; les mois de novembre et de décembre sont donc fondamentaux pour la réussite de la saison hivernale. L'enneigement artificiel en Suisse a été la réponse des stations touristiques hivernales à la pénurie de neige des hivers 1987-1988, 1988-

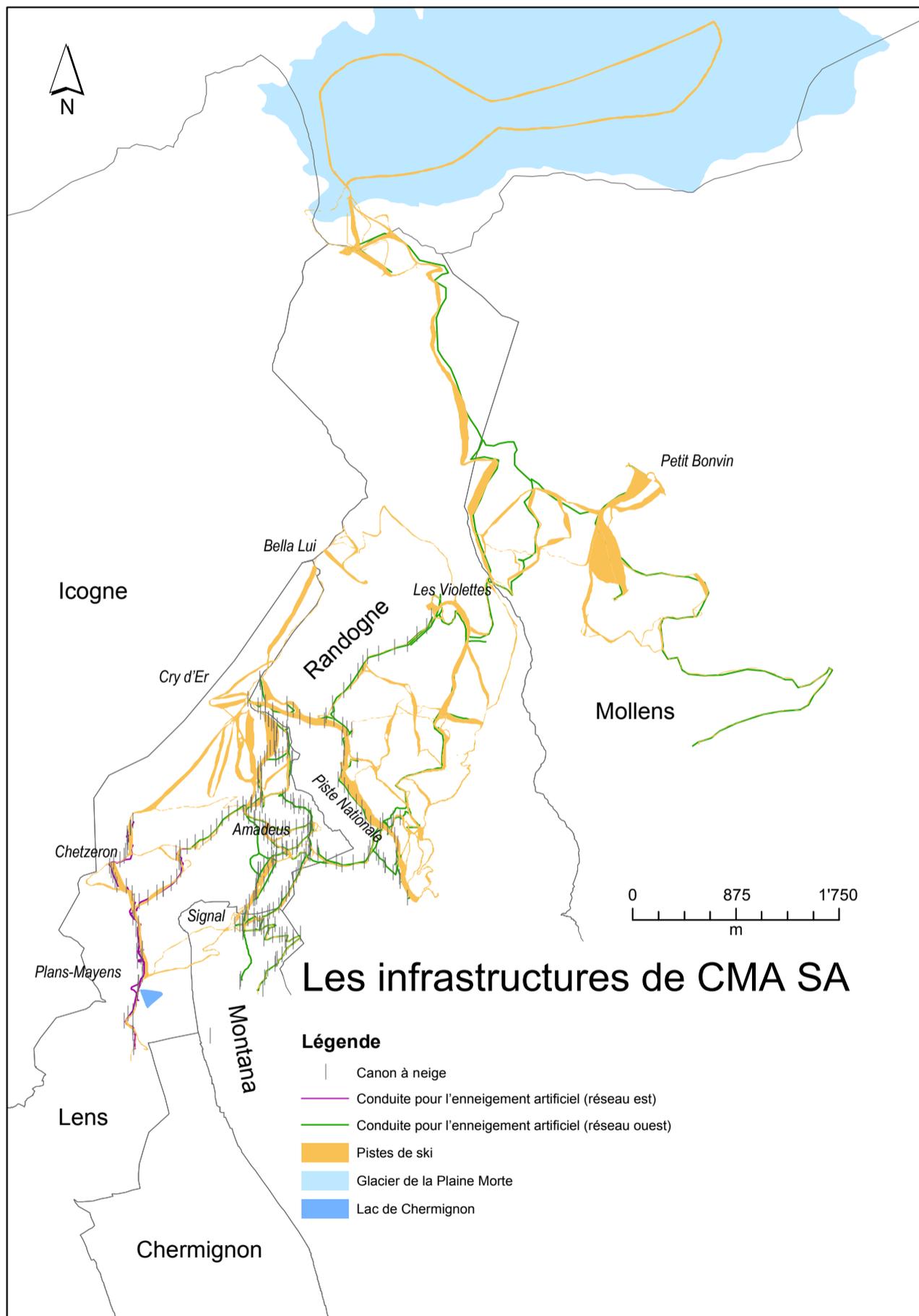


Fig. 3.26 – Les infrastructures de CMA SA.

Source : Service des registres fonciers et de la géomatique du canton du Valais et CMA SA.

1989 et 1989-1990. La quantité de neige naturelle qui tombe pendant l'hiver est en train de diminuer un peu partout dans les Alpes et notre région d'étude ne fait pas exception à cette règle. En effet, malgré une forte variabilité interannuelle et le manque de données (1994-1997 et 2004-2010), le graphique de la figure 3.27 démontre que la couche de neige se fait moins épaisse chaque année. L'enneigement artificiel est donc devenu de plus en plus nécessaire pour garantir les sports de glisse sur le domaine de Crans-Montana-Aminona.

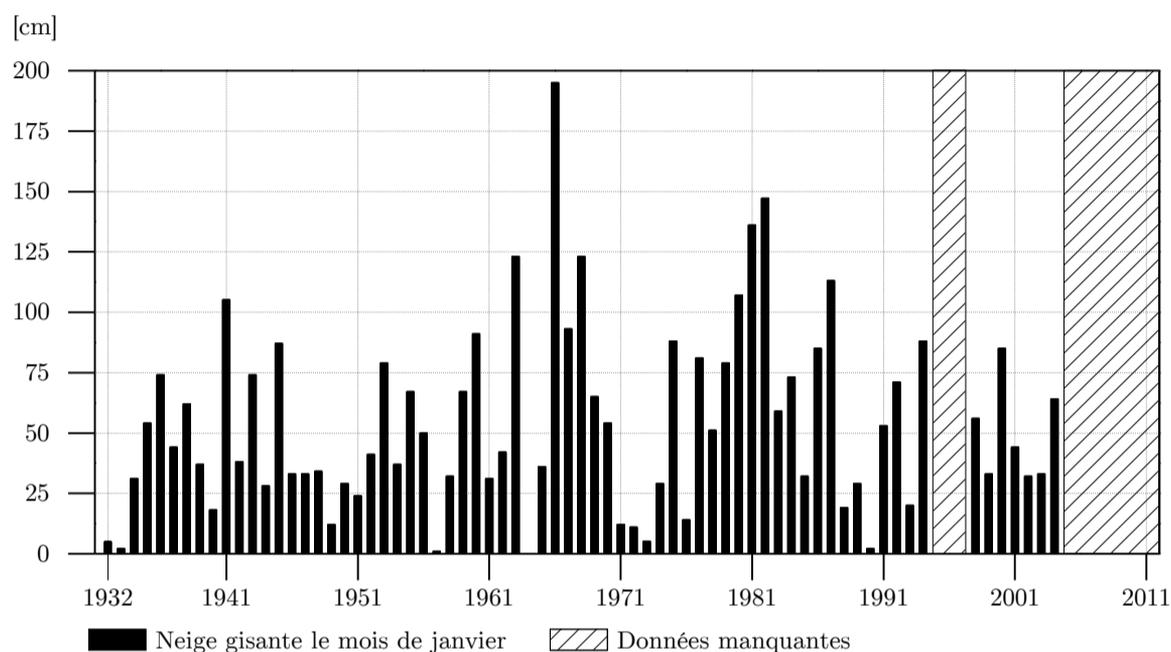


Fig. 3.27 – Neige au sol au mois de janvier 1932-1994 et 1997-2004 [cm]

Source : MétéoSuisse, station de Montana (1427 m).

Les investissements dans le domaine de l'enneigement artificiel n'ont cessé de croître au cours des années (Emery Mayor, 2007). En 2009, Crans-Montana-Aminona SA a ainsi renforcé et mis à jour ses canons à neige, en passant d'une production de $480 \text{ m}^3/h$ à $1185 \text{ m}^3/h$ et à partir de l'hiver de la même année, le domaine skiable de Crans-Montana peut être enneigé mécaniquement en moins d'une semaine de froid (Emery Mayor, 2007). Les enneigeurs remplacés le sont par des modèles plus efficaces qui permettent de démarrer la production de neige artificielle à des températures plus élevées de 1 à 2 °C (températures marginales), ce qui permet de gagner en période de production (Emery Mayor, 2007).

3.7.2 Les infrastructures

L'histoire de la station de ski commence en 1911 avec l'inauguration du funiculaire qui relie Sierre au Haut-Plateau. Au cours des années successives, plusieurs sociétés de

remontées mécaniques naissent et il faudra attendre 1971 pour assister à la première fusion, suivie en 1972 par une deuxième et en 1999 par la troisième, qui regroupe les quatre sociétés restantes (Robyr, 2001). L'enneigement artificiel a débuté sur le Haut-Plateau en 1994 avec la construction de l'installation d'enneigement technique de Cry-d'Err à Arnouvaz (Robyr, 2001). Les infrastructures ont d'abord été développées de manière séparée par les différentes sociétés de remontées mécaniques (Reynard, 2000a). Avec la fusion des quatre sociétés de remontées mécaniques en 1999 et la création de la société exploitante actuelle (CMA SA) en 2004, le réseau d'approvisionnement a été unifié entre 2007 et 2009. Pour l'instant, les modèles de canon à neige présents sur le domaine skiable proviennent de différents constructeurs. Le prochain objectif est de se concentrer sur un seul constructeur, afin de faire des économies d'échelle. Tous les canons à neige présents dans le domaine sont de type bifluide, avec une consommation (en 2009) de 4,74 Kw/h par m³ d'eau et de 2,15 Kw/h par m³ de neige produite²⁶. Selon les données SIG fournies par CMA SA, la surface totale des pistes est actuellement de 1,62 km², dont 0,5 km² (31%) sont enneigés artificiellement. L'enneigement artificiel entre 1500 et 1700 m, à savoir les altitudes les plus basses de la station, qui contiennent un bon tiers des pistes, est en train d'être renforcé afin d'offrir aux touristes des pistes qui les ramènent jusqu'à la station. La piste Amadeus, le fond de la piste du Signal et les Barzettes restent les pistes les plus problématiques, surtout à cause de leur forte fréquentation, déterminée par leur position stratégique dans le domaine skiable. La neige est donc transportée à l'aval par frottement mécanique et il faut la remonter à l'aide des chasses-neige chaque soirée/nuit. Le réseau d'enneigement technique (figure 3.28) de CMA SA est organisé en deux parties.

A l'ouest, il utilise le lac de Chermignon (1560 m) comme principale ressource en eau. Ce réservoir est couplé avec une station de pompage qui peut pomper actuellement dans la conduite principale du réseau environ 1200 m³/h. Le compresseur principal (250 Kw) et le compresseur de Merbé fournissent l'air comprimé nécessaire au fonctionnement des canons à neige. La conduite principale traverse le domaine skiable d'ouest à est pour finir au fond de la piste Nationale. Le réseau hydraulique de l'enneigement artificiel (figure 3.28) est raccordé au répartiteur de Plans-Mayens, où l'eau qui provient du barrage de Tseuzier peut être amenée par deux pompes dans la partie la plus à l'ouest du domaine skiable avec une puissance de 140 et 1630 m³/h. Deux autres pompes sont situées à l'aval de la piste Nationale et au fond de la piste du Signal. Le pompage PW1-Nationale exploite l'eau qui arrive de la Raspille par la conduite de Randogne. Il a une puissance de 180 m³/h, qui est exploitée pour amener dans le réseau environ 50'000 m³ d'eau chaque hiver. Le pompage situé au fond de la piste

26. D'après l'entretien du 26 août 2010 avec Bertrand Cassignol, responsable de l'entretien des pistes de CMA SA.

du Signal, qui exploite les mêmes ressources que les pompages de Plans Mayens et de Chermignon, a une puissance totale de 260 m³/h, dont 100 peuvent être utilisés pour approvisionner le pompage PW1-Nationale.

L'accumulation de l'eau durant les périodes à forte disponibilité permet de satisfaire les besoins de l'enneigement artificiel pendant la saison touristique hivernale. Le lac de Chermignon est le principal réservoir exploité par CMA SA. Ce lac est équipé avec un système de « bullage » qui permet à l'eau de ne pas congeler en surface. Ce système a une double fonction : premièrement, permettre de refroidir l'eau avec de l'air qui provient de l'extérieur, et deuxièmement, empêcher à la glace de se former en surface. Le fonctionnement est assez simple : une maille de canalisation située à quelques mètres du fond du lac est alimentée avec de l'air sous pression pris à l'extérieur. L'air, en montant en surface, refroidit l'eau et brise mécaniquement la tension superficielle de l'eau en empêchant la formation de glace²⁷. Le lac de Chermignon a un volume de 130'000 m³, dont environ 40'000 m³ sont réservés à la production d'eau potable de la commune de Chermignon. Les 90'000 m³ restants peuvent être utilisés pour l'enneigement artificiel. Si le niveau du lac passe au-dessous de 40'000 m³, CMA SA doit acheter de l'eau du barrage de Tseuzier, dont le transport est possible grâce à la conduite de la commune de Lens.

3.7.3 Projets futurs

Le secteur d'Aminona est le seul à ne pas pouvoir être enneigé artificiellement mais il le sera certainement dans un futur proche. Un projet, encore en phase préliminaire, vise à combler cette lacune en étendant le réseau de conduites et en agrandissant le volume d'eau stockable. La concrétisation de ce projet semble être dépendante de la construction du « Village Royal » à Aminona (Cerutti, 2011)²⁸. Dans cette optique, il est prévu d'augmenter la capacité du lac de Chermignon pour la porter à environ 230'000 m³, soit 100'000 m³ de plus qu'actuellement (figure 3.28). Dans le cadre du même projet, la construction d'un lac de 100'000 m³ dans la zone des « Caves de Pépinet » (2000 m) est aussi prévue. Ce lac servira à garantir l'eau au secteur d'Aminona et à la zone située entre Les Violettes et la piste Nationale. Il y aura donc un transport de l'eau entre bassins versants. Ce bassin de stockage supplémentaire a été conçu pour être exploité comme réserve d'eau pendant l'hiver et comme attraction touristique pendant l'été. Une nouvelle piste de ski, qui remplacera celle déjà existante, qui exploite le tracé de la route estivale, sera également construite entre La Tza et Aminona. Le projet prévoit également d'exploiter la chute de l'eau pour alimenter, au moins en partie, les canons

27. D'après l'entretien du 26 août 2010 avec Bertrand Cassignol, responsable de l'entretien des pistes de CMA SA.

28. Plus d'informations à l'adresse <http://www.alrv.ch> (consulté le 5 avril 2013).

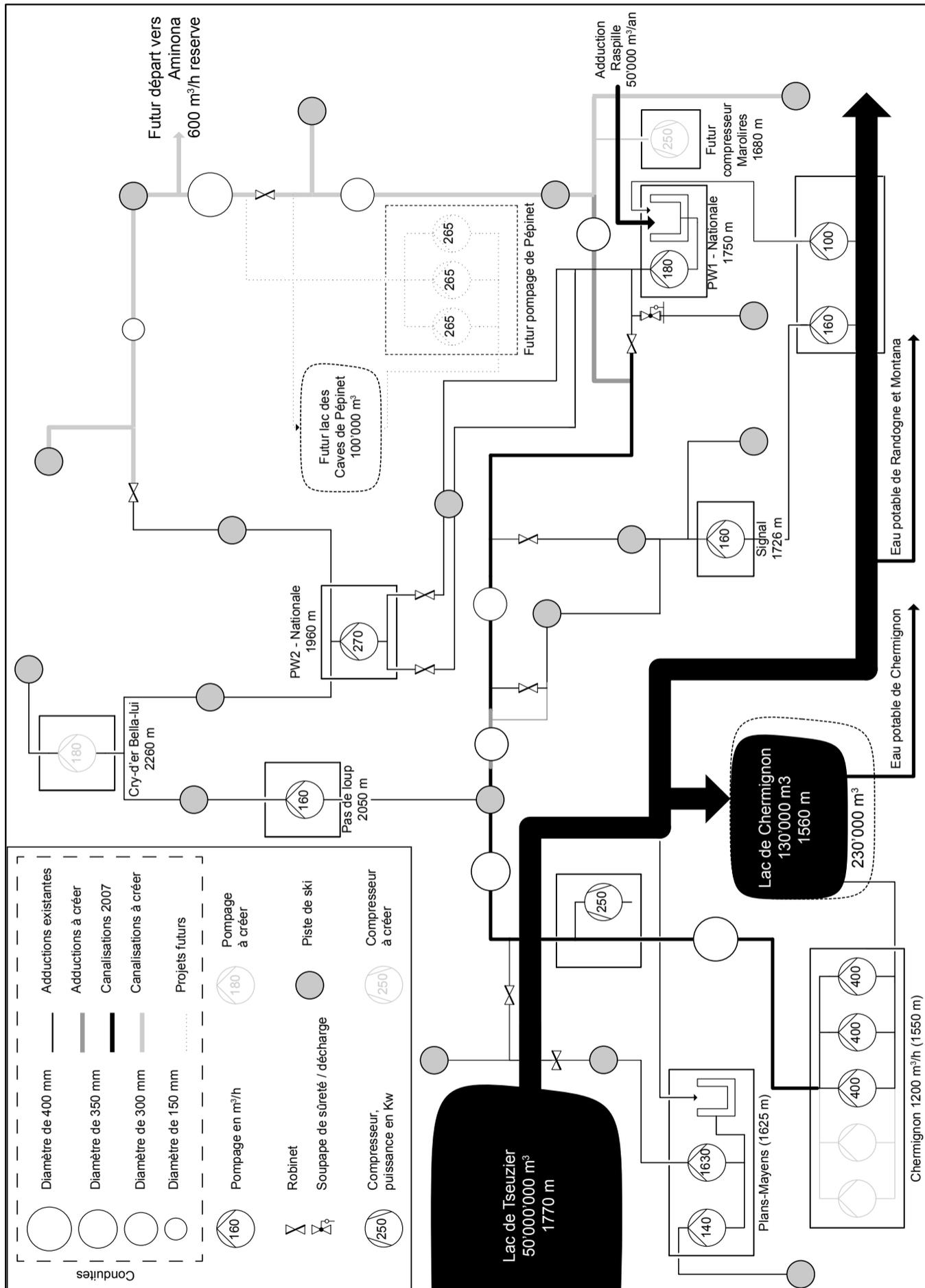


Fig. 3.28 – Schéma d'adduction projeté de CMA SA.

Source : CMA SA.

à neige. Ces mini-centrales hydroélectriques auront une puissance inférieure à 100 KW (adaptée pour fournir l'électricité à de petits villages ou à de petites entreprises).

3.7.4 Manifestations internationales

Après l'organisation des Championnats du monde de ski alpin en 1987 et les finales de la Coupe du monde en 1998, Crans-Montana s'est récemment relancée comme organisatrice de compétitions internationales de ski alpin (Emery Mayor, 2011a), avec les Championnats du monde juniors de ski alpin en février 2011 et deux courses de Coupe du monde hommes en 2012, les 25 et 26 février (figures 3.29 et 3.30).

Pour ce genre d'événements, les pistes sont préparées par une société externe liée à la Fédération internationale de ski (FIS), qui engage des moyens spécifiques pour la préparation de ce type de pistes (injection d'eau dans la neige, SnomaxTM, etc.). Actuellement, ces techniques sont utilisées exclusivement pendant ce genre d'événements afin de garantir la sécurité des athlètes. Dans les quinze mois qui ont précédé les championnats du monde de 1987, plus de 2'000 personnes ont travaillé sur nombreux chantiers sur l'ensemble du Haut-Plateau afin d'améliorer la station sous plusieurs aspects (Kappeyne van de Coppello, 1987). Les pistes destinées aux compétitions ont été améliorées (figure 3.31), du point de vue de la sécurité des skieurs, en défrichant cinq hectares de forêt, en faisant disparaître des rochers à certains endroits et en ensemençant une surface d'environ 200'000 m² (Kappeyne van de Coppello, 1987).

3.7.5 Impacts sur l'hydrosystème

L'impact de l'enneigement sur le cycle de l'eau concerne notamment la quantité d'eau utilisée dans une période défavorable comme l'hiver (étiage), l'immobilisation de l'eau (par exemple dans le lac de stockage de Chermignon), l'évaporation et la densité de la neige - la neige de culture a une densité comprise entre 330 à 450 kg par m³, contre 40 à 180 kg par m³ pour la neige naturelle (Magnier, 2010) - qui détermine une prolongation de la période de fonte (Demers, 2006 et Paccard, 2010), comme témoigné par la figure 3.32.



Fig. 3.29 – Super Géant du 24 février 2012 - Arrivée aux Violettes.

Photo : Lea Masserey.



Fig. 3.30 – Super Géant du 24 février 2012 - Piste Nationale.

Photo : Lea Masserey.



Fig. 3.31 – Epannage de la paille après ensemencement de la piste Combe des Dames.
(Kappeyne van de Coppello, 1987).



Fig. 3.32 – Neige artificielle persistant plus longtemps que la neige naturelle.
Photo prise le 23 mars 2011.

3.8 L'épuration des eaux usées et la qualité des eaux

3.8.1 Les stations d'épuration des eaux usées

L'épuration est nécessaire afin de pouvoir réintroduire les eaux usées dans l'environnement sans l'endommager. Grâce à l'épuration, l'impact anthropique sur l'environnement est donc sensiblement réduit. Entre la plaine du Rhône et la Plaine Morte, on compte trois STEP (stations d'épuration des eaux usées), situées à Noës, Granges et Icogne. La localisation, les communes desservies par chaque STEP et leur capacité en EH (Équivalent-Habitant) sont résumées dans le tableau 3.9 et la figure 3.33. Les STEP de la région d'étude ont une activité moyenne comprise entre 73.8% (Noës) et 80.0% (Icogne), mais la quantité d'eau traitée par ces installations varie beaucoup pendant l'année (tableau 3.9) surtout à cause de la présence touristique et des eaux d'écoulement de surfaces imperméables. Les STEP de Granges et Icogne sont sous-dimensionnées pour les épisodes de pointe (tableau 3.9).

STEP	EH	Capacité nominale [m ³ /j]	Moyenne [m ³ /j]	Maximum [m ³ /j]
Icogne	1067	350	280 (80.0%)	418 (119.4%)
Granges	27500	9800	7828 (79.9%)	11238 (114.7%)
Noës	97500	30000	22136 (73.8%)	29996 (99.99%)
Total	126067	40150	30244 (77.9%)	-

Tab. 3.9 – STEP : capacité de traitement.

Source : Canton du Valais, 2010.

3.8.2 L'efficacité des STEP

Les infrastructures pour le traitement des eaux usées se différencient aussi selon leur efficacité. Le tableau 3.9 montre le rendement du traitement de différentes substances dans les trois STEP.

STEP	DBO ₅ [%]	COD [%]	P _{tot} [%]	NH ₄ [%]	Évaluation
Icogne	2.9	nc	0.14	1.0	Bon
Granges	80.9	65.6	79.50	27.0	Mauvais
Noës	90.4	89.4	94.10	47.2	Moyen

Tab. 3.10 – STEP : rendement relatif à plusieurs substances.

Source : Canton du Valais, 2010.

L'efficacité de chaque station est évaluée chaque année par le canton du Valais, et les STEP sont classées en quatre catégories : mauvaise, moyenne, bonne et excellente. En 2009, seule la STEP d'Icogne, de loin la plus petite de notre région, a obtenu une évaluation « bonne ».

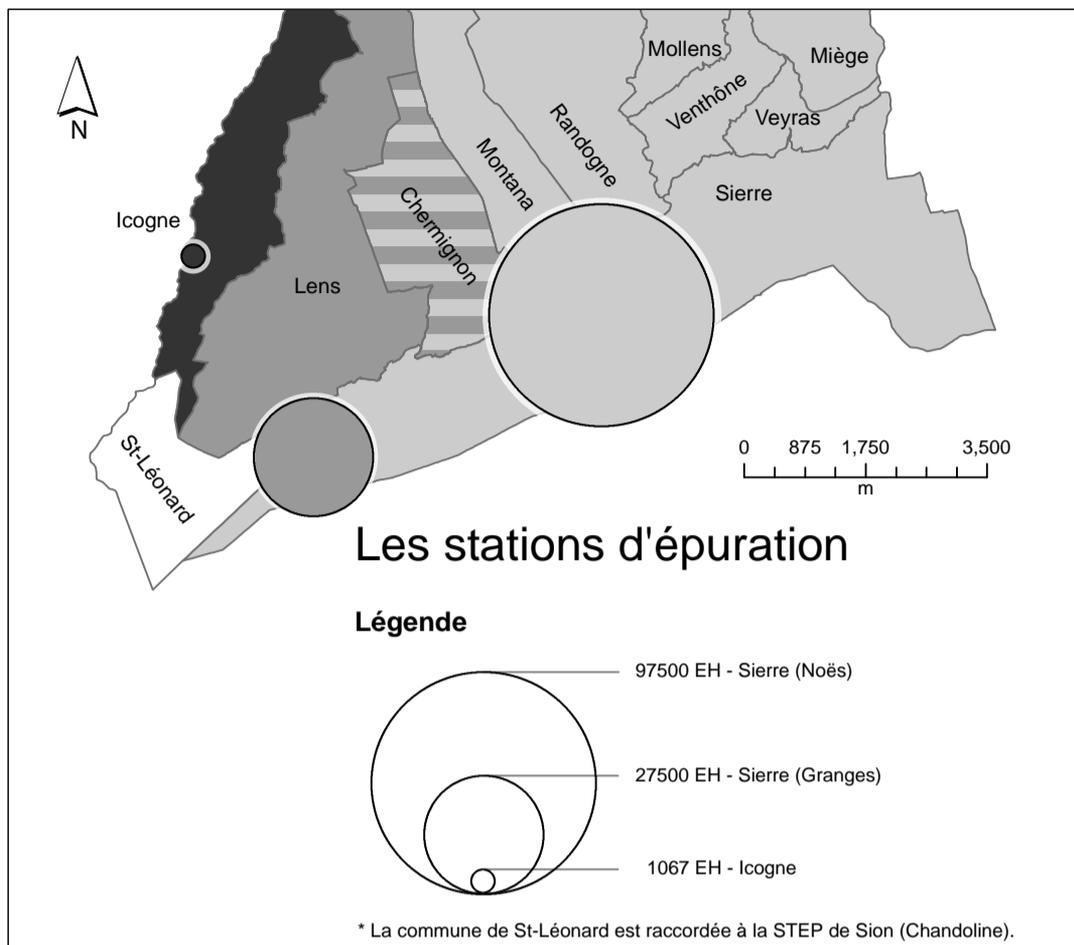


Fig. 3.33 – Les station d'épuration : taille, localisation et communes desservies.

Source : Service des registres fonciers et de la géomatique du canton du Valais et Canton du Valais, 2010.

3.8.3 La qualité des eaux

La qualité des eaux de la région de Crans-Montana-Sierre est évaluée (Canton du Valais, 2007b) par rapport à la quantité des principales classes de polluants qui peuvent se trouver dans les rivières, c'est-à-dire le carbone organique dissous (COD), l'ammonium (NH_4^+), les nitrates (NO_3^-) et les orthophosphates (PO_4). L'évaluation de la qualité des eaux de la région d'étude est résumée dans le tableau 3.11. Le seul polluant problématique est l'ammonium, présent dans des concentrations ≥ 0.4 mg N/l, ce qui est 10 fois plus que la concentration requise pour obtenir la note « excellent » (tableau 3.11 et figure 3.34).

Polluant	Évaluation de la qualité de l'eau
COD	entre bonne et excellente
NH_4^+	entre mauvaise et excellente
NO_3^-	entre bonne et excellente
PO_4	excellente

Tab. 3.11 – Évaluation de la qualité des eaux

Source : Canton du Valais, 2007b.

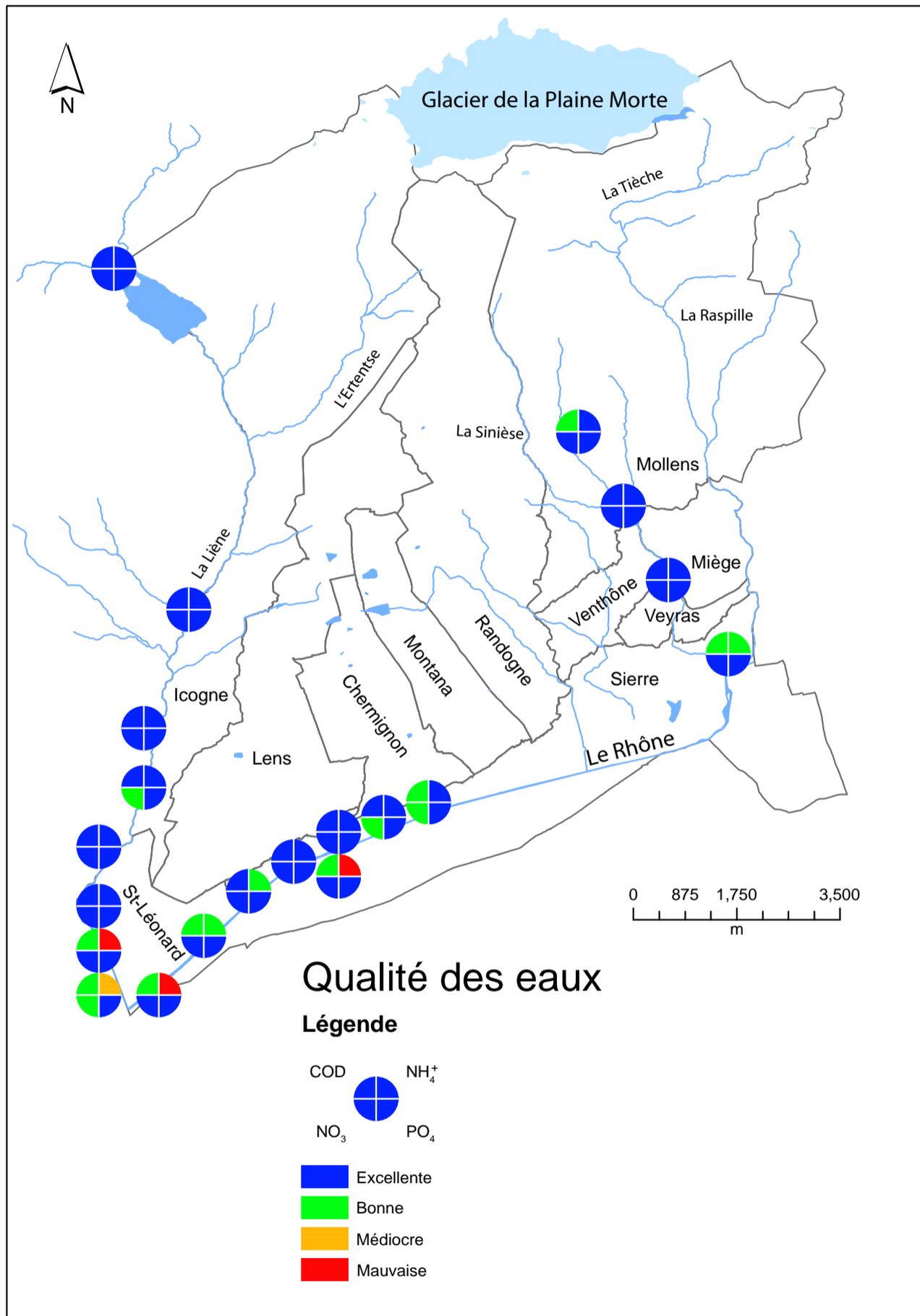


Fig. 3.34 – La qualité de l'eau.

Source : Service des registres fonciers et de la géomatique du canton du Valais et Canton du Valais (2007b).

3.9 Les usages récréatifs

L'offre touristique de Crans-Montana ne se limite pas au domaine skiable ou aux golfs. Toute une série d'activités récréatives qui prévoient l'utilisation de l'eau sont également à disposition du visiteur. Les attractions touristiques liées à la ressource en eau se divisent en deux catégories principales : celles qui se limitent à exploiter la présence de l'eau sans l'affecter et celles qui impliquent la mobilisation d'une certaine quantité d'eau.

3.9.1 Activités exploitant la présence de l'eau

Chaque touriste qui se promène dans la région d'étude rencontre, tôt ou tard, les bisses. Ces canaux d'irrigation traditionnels sont aujourd'hui également exploités pour leur valeur touristique-paysagère (Reynard, 2001 et PAES, 2006). Les itinéraires varient en difficulté et en longueur et sont donc adaptés à chaque catégorie de randonneurs. La plupart des bisses de la région offrent un parcours aménagé à leur côté, décrit dans le moindre détail par des brochures exhaustives librement téléchargeables sur Internet²⁹. La valeur touristique des bisses dépend de plusieurs facteurs, comme la beauté du panorama offert, la possibilité d'y accéder facilement, la proximité de services de restauration et l'état du bisse. Dans la région de Crans-Montana-Sierre, les bisses les plus fréquentés sont ceux qui ont ce genre d'atout ; c'est le cas du Tsittoret, du bisse du Rho et du Grand Bisse de Lens. Entre 2001 et 2006, les six communes du Haut-Plateau ont joué le rôle de région pilote dans le plan d'action environnement et santé (PAES, 2006), qui visait à promouvoir des conditions permettant à la population d'adopter un comportement respectueux tant de la santé que de l'environnement et de contribuer ainsi à un développement durable³⁰. Une partie du projet visait à faire de la randonnée un produit à la mode pour les habitants et les hôtes (PAES, 2006). Dans le cadre du projet, le premier festival de la randonnée a été organisé en 2006, événement permettant la découverte et la promotion de la randonnée en général tout en faisant connaître la région comme destination de tourisme pédestre (PAES, 2006). De cette manière, le PAES a également contribué à faire connaître les bisses de Crans-Montana-Sierre aux touristes et aux habitants de la région. Dans le cadre d'un projet de plus grande envergure, la candidature des bisses du Valais sera certainement soumise à l'UNESCO, pour une possible inscription sur la liste du patrimoine mondial (Reynard et al., 2011). La reconnaissance de l'importance des bisses par l'UNESCO aiderait à les garder en état et à donner une visibilité internationale au Valais entier. Ce désir de reconnaissance contraste, par exemple, avec l'habitude de certains agriculteurs d'utiliser les bisses

29. <http://www.crans-montana.ch> , consulté le 15 juin 2011.

30. <http://www.bag.admin.ch>, consulté le 7 mars 2011.

comme dépôt plus ou moins temporaire des tuyaux utilisés pour l'irrigation (annexe 4b).

Récemment, de nouvelles pratiques sportives ont fait leur apparition dans la région : les sports d'aventure. Il est désormais possible de pratiquer ces sports en toute sécurité en compagnie de professionnels : des activités comme le canyoning ou le rafting s'ouvrent donc de plus en plus au grand public. La société Adrenatur³¹ offre par exemple la possibilité de pratiquer ces trois disciplines sportives « extrêmes » : le canyoning et le kayak sur la Raspille, le rafting sur le Rhône et le « parcours aventure » aux cascades de la Tièche. Ces pratiques mettent le touriste en contact direct avec la nature en lui permettant d'en profiter pleinement sans courir trop de risques. Une bonne forme physique est tout de même requise. Des activités plus accessibles, selon l'âge et la forme physique, sont également offertes par les lacs de la région, comme par exemple le pédalo, la planche à voile et la pêche (tableau 3.12).

Lac	Pêche	Patinage	Pédalo	Planche à voile	Ski nautique
Lac de Chermignon	x				
Étang Grenon	x				
Étang de la Moubra	x		x	x	x
Étang Long	x		x	x	x
Étang d'Ycoor	x	x			
Lac de Miriougues	x				
Lac Louché	x				
Lac de Tseuzier	x				

Tab. 3.12 – Les activités praticables sur les lacs de la région.

3.9.2 Activités nécessitant la mobilisation de la ressource

Les piscines représentent une des utilisations de l'eau les plus classiques dans les stations touristiques de montagne. Ces infrastructures sont présentes dans les hôtels et les appartements privés. Afin d'éviter le gaspillage d'eau, la plupart des piscines sont équipées d'un système de recyclage de l'eau. Un autre attraction typique de ces régions est constituée par les patinoires (la patinoire d'Ycoor à Montana et celle de Graben à Sierre). Dans un futur proche, le projet Aqualoisirs prendra forme près de l'Étang de la Moubra, en ajoutant un parc aquatique à la déjà très riche offre de Crans-Montana. Le centre Aqualoisirs de la Moubra sera une structure polyvalente, avec des piscines à l'intérieur et à l'extérieur, une partie fitness et une partie wellness (ACCM, 2010).

31. <http://www.adrenatur.ch>, consulté le 24 février 2011.

3.10 Conclusions

Ce chapitre a mis en évidence les propriétés de l'infrastructure dédiée aux usages de l'eau dans la zone d'étude, qui se caractérise par un grand nombre d'ouvrages et par la présence de plusieurs groupes d'acteurs dont les intérêts et l'influence politique se superposent. Cette complexité politico-structurale se distingue par une grande flexibilité, qui permet de satisfaire la demande en eau de la région sans problèmes particuliers pour la plupart du temps, mais qui peut être mise en difficulté par un manque prolongé de précipitations.

En théorie, le dense réseau d'accords, d'alliances et de conventions entre les acteurs n'est ni la solution la plus rationnelle, ni la plus efficiente, pour gérer l'eau. Mais dans la pratique, grâce surtout à la souplesse du système, ce système de gestion, si on peut l'appeler comme ça, se révèle adéquat pour répondre aux besoins de la région. Tout en présentant une grande marge d'amélioration, ce système n'a pas de faiblesses majeures qui peuvent affecter l'ensemble de son fonctionnement.

La complexité et la du système actuel est déterminée par toute une série de facteurs historiques, politiques et socio-économiques qui trouvent leurs racines dans l'évolution de la région au cours du dernier siècle, voir plus loin. Le système actuel de gestion des usages de l'eau est fortement influencé par les caractéristiques socio-économiques de la région de Crans-Montana-Sierre, qui concilie territoire urbain, industriel, agricole et touristique. En fait, la gestion des ressources naturelles dépend et est conditionnée par le contexte économique et social (Schmithüsen, 2000), ce qui implique une forte probabilité de rencontrer un système de gestion ayant des caractéristiques similaires à celles de son contexte socio-économique.

Quatrième chapitre

Quantification du système actuel

4.1 Introduction

Le rôle de la quantification des différents usages de la ressource en eau est de faire la lumière sur les volumes d'eau nécessaires pour la satisfaction des besoins actuels en eau de la région de Crans-Montana-Sierre. Cette partie du travail vise également à expliquer, à travers des hypothèses, les variations annuelles et interannuelles des quantités d'eau utilisées par chaque usage. La quantification permettra de mieux comprendre la concentration spatio-temporelle de l'usage de la ressource en eau à l'échelle mensuelle, ce qui mettra en évidence les périodes et les zones où les usages se superposent. Les informations récoltées dans ce chapitre représentent la base sur laquelle la partie de ce travail concernant les usages futurs de l'eau s'appuie. La quantification représente donc le cœur de la recherche du WP2, en quantifiant le système actuel et en donnant en même temps la possibilité de tourner le regard vers l'avenir. Aux données récoltées seront ensuite appliquées les variations caractérisant les scénarios climatiques (CH2011, 2011) et les scénarios socio-économiques élaborés en collaboration avec les acteurs de la région de Crans-Montana-Sierre (Groupe RégiEau). Cette partie ayant été conçue avant la création des scénarios socio-économiques, certains aspects traités dans cette partie du travail ne seront pas exploités dans la partie sur les usages futurs et par contre, une partie des données récoltées ne suffira pas à obtenir des prévisions fiables pour certains usages (base de données trop réduite et influence importante de facteurs externes). La collaboration des communes et des entreprises présentes sur le territoire étudié constitue donc un élément fondamental de cette partie du travail du WP2. Les données nécessaires à l'élaboration de ce chapitre ont été obtenues de différentes manières : reçues de la part des communes ou des entreprises (CMA SA, Lienne SA et Sierre Energie SA) suite à une demande officielle ou un entretien avec les responsables, enregistrées par les réseaux de mesure installés par les membres du projet MontanAqua ou calculées à l'aide de moyens informatiques.

4.2 Démographie

L'étude de la démographie, et en particulier de ses variations mensuelles, représente une étape fondamentale pour comprendre les besoins liés aux usages principaux de la ressource en eau. Dans les stations touristiques de montagne, la plupart des usages de l'eau sont par ailleurs directement ou indirectement affectés par les fluctuations de la fréquentation de la station (Reynard, 2000a, 2001 et Charnay, 2010). Il s'agit donc d'analyser autant la population résidente que la fréquentation touristique actuelle. L'évolution de ces deux variables sera traitée dans la partie suivante de ce travail, car même si des projections à l'échelle cantonale existent, il faudra tenir compte de l'influence des politiques adoptées à l'échelle régionale et communale (chapitre 5.3.1).

4.2.1 La population résidente

La population des communes est soumise à une double variation démographique : à l'échelle annuelle (évolution de la population) et à l'échelle mensuelle (distribution spatiale et temporelle des touristes). En janvier 2010, dans la région vivaient environ 36'500 personnes, distribuées de manière hétérogène entre les onze communes faisant partie de la zone d'étude (tableau 4.1).

Communes	1910	1920	1930	1941	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010
Chermignon	848	950	1055	1214	1330	1520	1925	2170	2553	2711	2962
Icogne	243	251	250	265	218	219	254	288	374	404	495
Lens	1111	1252	1382	1634	1660	1743	1052	2412	3059	3357	3765
Miège	462	436	499	569	591	560	614	653	828	913	1198
Mollens	312	311	285	322	303	286	270	334	542	770	884
Montana	547	791	1485	1279	1715	1543	1725	1908	2189	2305	2269
Randogne	695	896	1360	1136	1616	1508	1937	1791	2838	2963	4145
St-Léonard	732	791	858	989	1070	1093	1457	1498	1783	1872	2094
Venthône	477	470	476	507	499	469	479	634	821	935	1154
Veyras	155	136	212	302	347	434	730	1004	1347	1422	1730
Sierre	3076	3763	4956	6306	7161	8690	11017	13050	14143	14317	15787
Totale	8658	10047	12818	14523	16510	18065	21460	25742	30477	31969	36483

Tab. 4.1 – Population résidente entre 1910 et 2010.

Source : Office de statistique du canton du Valais 2010.

La population de la région n'a cessé d'augmenter pendant toute la période comprise entre 1910 et 2010, avec une croissance encore plus accentuée pendant les années 1960, 1970 et 1980 (environ 5'000 habitants de plus chaque décennie). À l'échelle communale, par contre, on assiste aussi à des décroissances de la population qui restent normalement inférieures à 10%.

4.2.2 La fréquentation touristique hôtelière et parahôtelière

Bien que les statistiques de l'OFS (2012) ne prennent en considération qu'une partie des communes de la région de Crans-Montana-Sierre (Chermignon, Lens, Montana, Randogne et Sierre), le fait que le nombre de touristes change sensiblement pendant l'année est évident (figure 4.1). Les villages d'Icogne et de Mollens sont quelque peu décentrés par rapport à la station de Crans-Montana, et seuls quelques chalets et hôtels sont situés sur le territoire communal (Reynard, 2000a), ce qui est la probable cause de leur exclusion de la statistique de l'OFS. Les autres communes (Venthône, Veyras, Miège et St-Léonard) ne sont par contre touchées par le tourisme que de manière marginale. Les mois de décembre à mars sont les plus importants pour l'économie de la station, regroupant la plupart des touristes qui visitent la région pendant l'année. Il faut remarquer que les statistiques de l'OFS (2012) concernent seulement les hôtels et les établissements de cure et que l'industrie parahôtelière n'y est donc pas considérée. La quantification de la fréquentation d'une station touristique de montagne est une tâche complexe, car la récolte de données à l'échelle mensuelle n'est possible de manière précise que dans les hôtels. Pour estimer le nombre de touristes présents dans la région, il faut également tenir compte des propriétaires de chalets et appartements qui n'occupent leur résidence secondaire que quelques semaines par an et les « touristes pendulaires », c'est-à-dire les personnes se rendant dans la station durant la journée (promeneurs, skieurs), mais ne dormant pas sur place (Reynard, 2000a). La fréquentation touristique de la région d'étude change également entre le Haut-Plateau et la région de Sierre (tableau 4.2). Les deux zones ont des caractéristiques différentes sous les points de vue quantitatif et qualitatif, c'est-à-dire le nombre absolu de nuitées et la distribution des nuitées par catégorie. Même la distribution temporelle des nuitées pendant l'année est différente, ceci à cause du grand nombre de nuitées dans les campings de la région de Sierre (qui se situent surtout entre juin et septembre). Les données sur les nuitées touristiques hôtelières pour chaque commune suisse sont mises à disposition par l'OFS ³².

32. Ces informations, à l'échelle mensuelle, sont fournies dans des fichiers librement téléchargeables sur <http://www.bfs.admin.ch>

Stations	Hôtellerie	Maisons et appartements de vacances	Campings	Hébergements collectifs	Auberges de jeunesse	Total para-hôtellerie	Total général
Crans-Montana	349'006	261'744	6'586	57'033	0	325'363	674'369
Sierre	29'406	676	56'498	0	0	57'174	86'580
Total	378'412	262'420	63'084	57'033	0	382'537	760'949

Tab. 4.2 – Nuitées touristiques par catégorie de logement en 2003.

Source : OFS, 2003.

Les données sur les nuitées touristiques parahôtelières ne sont par contre pas sujet de monitoring de la part de l'OFS ; il faut donc se baser sur les rapports de gestion des offices du tourisme de Crans-Montana et de Sierre Salgesch et environs.

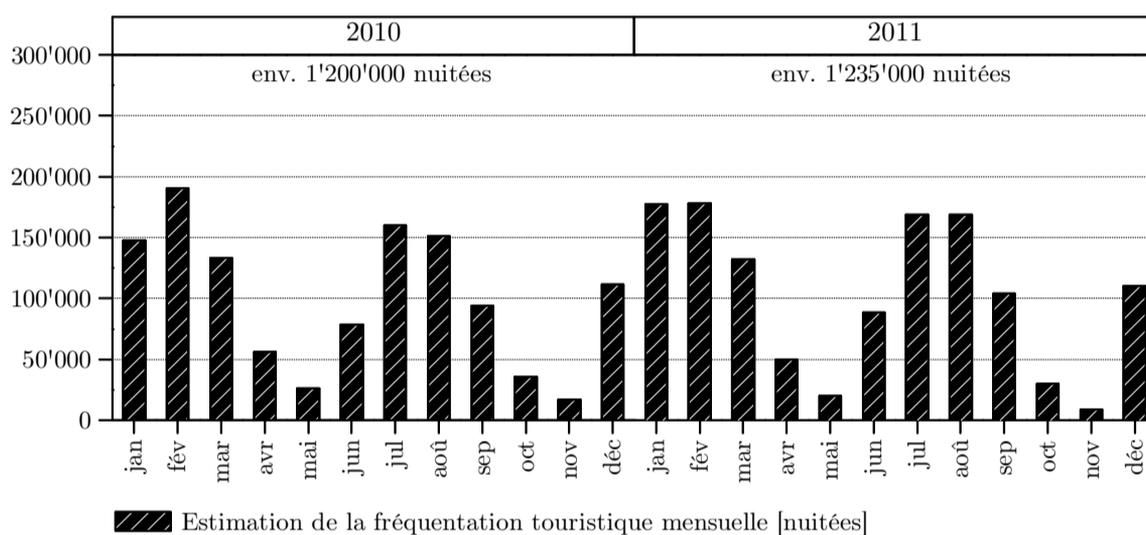


Fig. 4.1 – Nuitées touristiques à Crans-Montana-Sierre en 2010 et 2011.

Source des données : Crans-Montana Tourisme, Office du tourisme de Sierre Salgesch et OFS, 2012.

Le rapport de gestion 2011 de l'office du tourisme de Crans-Montana, contient des informations sur les nuitées touristiques parahôtelières à l'échelle annuelle (CMT, 2012). Il n'a par contre pas été possible de consulter les données à l'échelle mensuelle car les fichiers contiennent des informations de personnes physiques³³. Le manque de cette information impose ainsi l'utilisation de la répartition mensuelle des nuitées touristiques hôtelières également pour les nuitées touristiques parahôtelières. Le rapport de gestion 2011 de l'Office du tourisme de Sierre Salgesch, mis à disposition par Madame Mélanie Bonvin, contient le même genre informations que celui de Crans-Montana et, comme pour ce dernier, il n'est pas possible d'obtenir les données à l'échelle mensuelle. Étant donné que la plupart des nuitées touristiques parahôtelières de la ville de Sierre sont

33. Entretien du 24 juillet 2012 avec Laurence Paluzzano, responsable des ressources humaines et de la qualité de Crans-Montana Tourisme.

à attribuer aux campings situés sur le territoire de la commune, le manque de répartition mensuelle a été compensé en appliquant la répartition mensuelle des campings à l'échelle suisse aux valeurs annuelles de Sierre (OFS, 2012).

4.2.3 Les facteurs de variation de la fréquentation touristique

La fréquentation touristique d'une station touristique varie d'une année à l'autre et Crans-Montana-Sierre ne représente pas une exception à cette règle. Les facteurs qui influencent le nombre de nuitées touristiques sont au nombre de trois : l'attractivité régionale et internationale de la station, son rapport qualité-prix et le taux de change du franc suisse avec les principales devises mondiales. L'attractivité de la station, comme déjà mentionné dans le chapitre 2.1, est en train de baisser et la station cherche à sortir d'une phase critique de stagnation de laquelle elle pourra s'en sortir seulement en actualisant son offre (Butler, 2011). Le rapport qualité-prix de Crans-Montana peut être même considéré comme favorable, mais il est manifestement orienté vers une clientèle aisée. À ce propos, visiter la rue du Prado, appelée également « les Champs-Élysées » par certains (Massy, 2011), permet de se faire une idée précise du genre de clientèle qui fréquente la station. Le taux de change entre franc suisse et euro est déterminé par une multitude de facteurs comme la croissance et l'inflation d'un pays ou sa stabilité politique, et varie en permanence en alternant des moments favorables à l'économie locale avec des moments de crise. La force du franc, conjuguée au fléchissement de la conjoncture mondiale, pose des problèmes à l'industrie touristique suisse (DFE, 2011), et Crans-Montana ne fait pas exception. La faiblesse de l'euro, a porté la Banque Nationale Suisse³⁴ à fixer un taux plancher de 1 fr. 20 pour 1 euro (DFE, 2011). Malgré les conditions économiques défavorables, les nuitées touristiques (hôtelières et parahôtelières) de la station de Crans-Montana restent plutôt constantes. Le nombre de nuitées touristiques ne constitue par contre pas un indicateur fiable pour l'estimation du volume d'affaire de la station.

4.3 Les conditions climatiques de 2010 et 2011

L'évolution des conditions climatiques influence significativement les usages de l'eau ; il est donc utile de l'examiner attentivement, vu qu'elle sera souvent évoquée dans la suite de ce travail. Dans un premier temps, ce sujet sera abordé à l'échelle suisse, le cas particulier de la région de Crans-Montana-Sierre sera ensuite traité dans les détails. L'hiver 2009/2010 a été particulièrement froid et avec des précipitations largement déficitaires sur les versants nord des Alpes, sur le Haut-Valais et sur le Nord des Gri-

34. Décision du 6 septembre 2011.

sons (MétéoSuisse, 2010a). Le printemps suivant se caractérise par des températures légèrement plus hautes par rapport à la norme 1961-1990 et par des précipitations excédentaires sur la plupart des régions alpines et au Sud (MétéoSuisse, 2010b). Durant l'été 2010, les températures continuent à s'élever jusqu'à dépasser la moyenne, avec un taux d'ensoleillement plus ou moins dans les normes (MétéoSuisse, 2010c). Les précipitations durant l'automne 2010 ont été déficitaires en Valais et en Suisse romande (figure 4.4) (MétéoSuisse, 2010d). En fin de saison, d'abondantes chutes de neige sont tombées jusqu'en plaine (MétéoSuisse, 2010d). L'hiver 2010/2011 a été plutôt doux, avec un déficit marqué de précipitations dans les Alpes (MétéoSuisse, 2011a). La sécheresse printanière d'avril/mai 2011 (figure 4.4) a été déterminée par une quantité de précipitations parfois nettement au-dessous de la norme 1961-1990, accompagnées par un ensoleillement et des températures supérieures aux valeurs habituelles (MétéoSuisse, 2011b). L'été et l'automne 2011 ont été plus chauds (il s'agissait du deuxième automne le plus chaud depuis le début des mesures, il y a 150 ans) que la normale (MétéoSuisse, 2011c, 2011d). La saison hivernale 2011/2012 a par contre été très rigoureuse, notamment dans les régions de montagne, avec des quantités de neiges abondantes correspondant aux normales saisonnières (MétéoSuisse, 2012).

La plupart des observations faites plus haut sont parfaitement compatibles avec les données enregistrées par les stations météorologiques de Montana, Sierre et Sion (figures 4.2 et 4.3). De petites différences existent pourtant, notamment l'ensoleillement du mois d'août 2010 (figure 4.4), qui a été plutôt déficitaire dans toute la région de Crans-Montana-Sierre.

La figure 4.2 présente les températures enregistrées à Sion et à Montana durant les années 2010 et 2011, en mettant en évidence les températures plus élevées enregistrées lors de la sécheresse printanière de 2011. La figure 4.3 montre la quantité de précipitations tombées dans la région et, encore une fois, la sécheresse printanière de 2011 est bien visible. Profondément influencées par les facteurs découlant du complexe système météorologique qui caractérise les Alpes, les précipitations ont une variabilité mensuelle et annuelle nettement plus importante par rapport à celle des températures (qui dépendent surtout de l'inclinaison de l'axe terrestre et de la révolution de la Planète autour du soleil). La différence d'altitude entre les deux stations, qui se situe autour de 1000 mètres, est bien évidente dans les deux figures (figures 4.2 et 4.3).

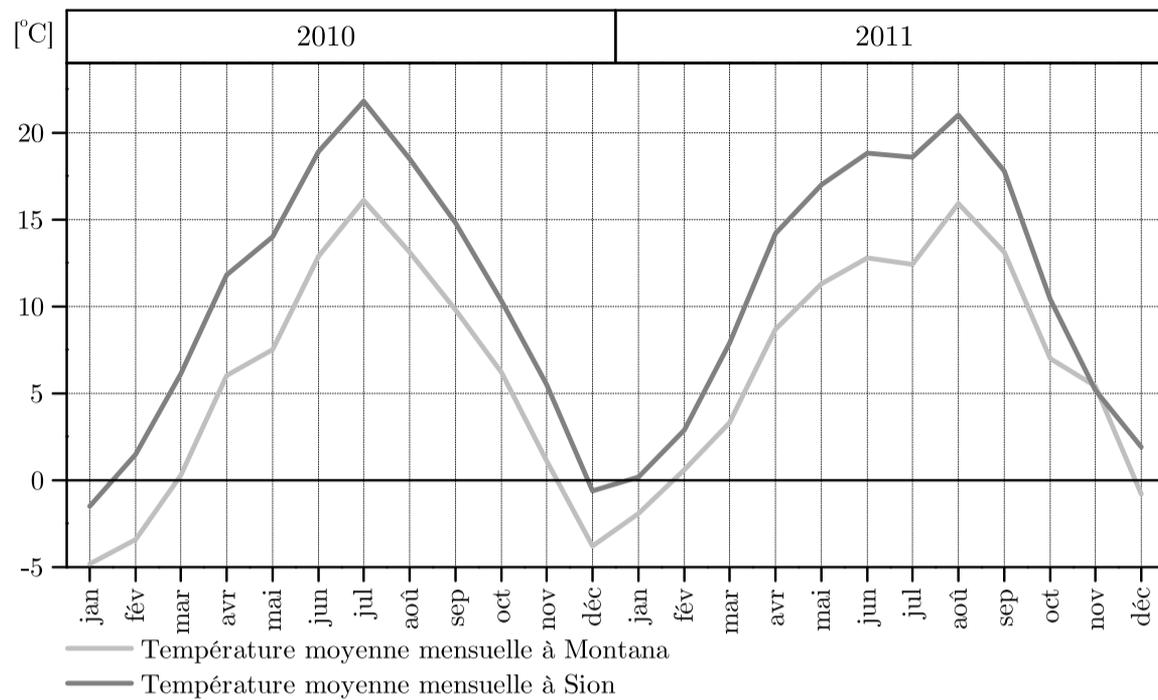


Fig. 4.2 – Températures mensuelles à Sion (482 m) et à Montana (1507 m).

Source des données météorologiques : MétéoSuisse.

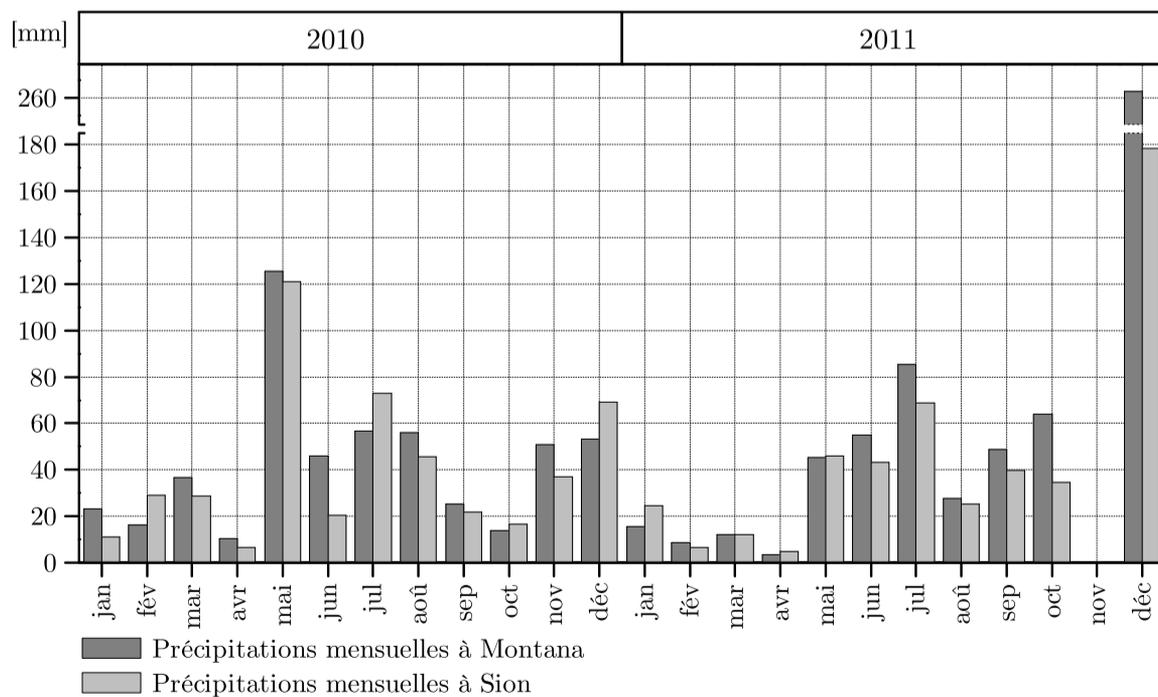
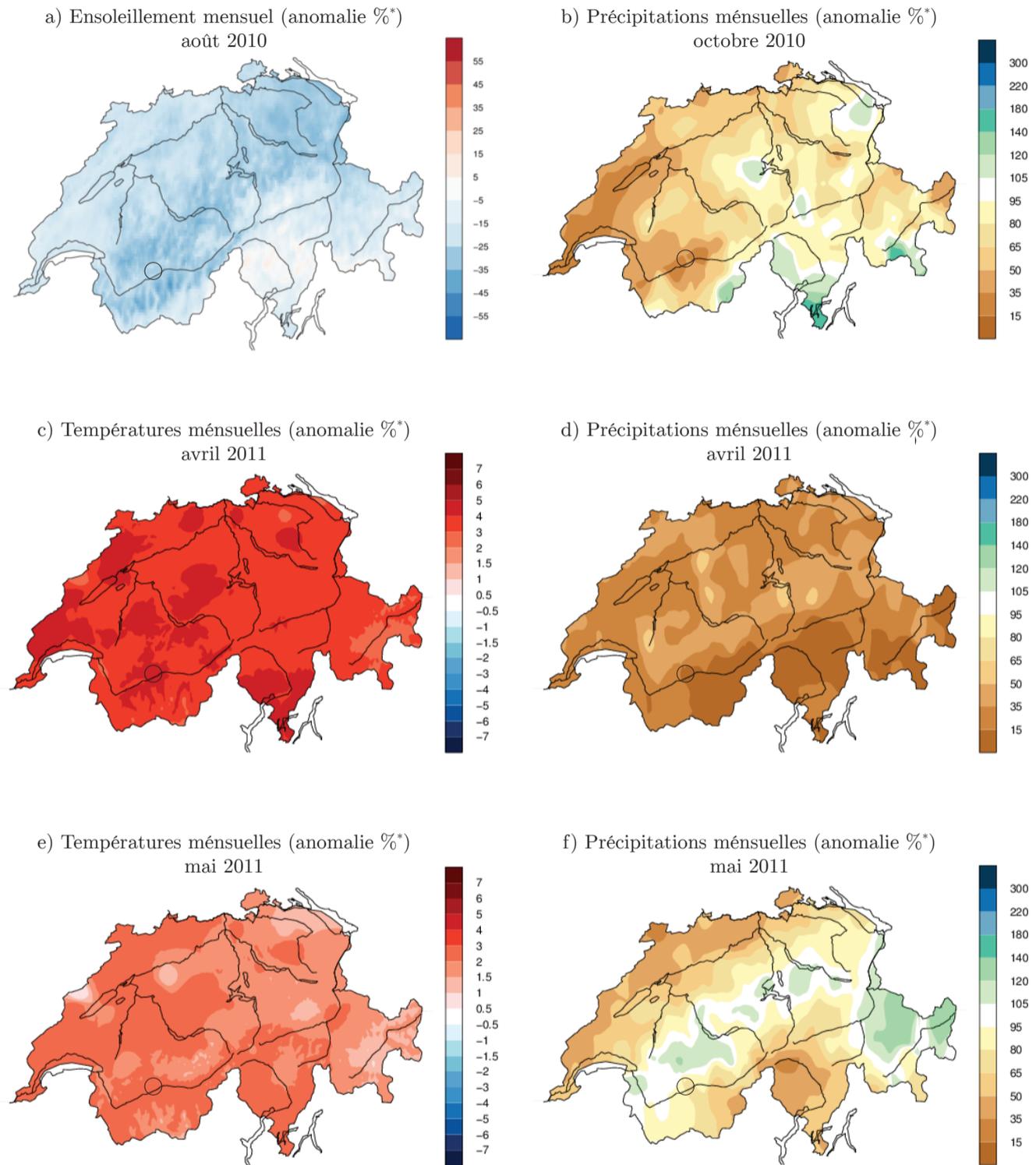


Fig. 4.3 – Précipitations mensuelles à Sion (482 m) et à Montana (1507 m).

Source des données météorologiques : MétéoSuisse.



*Par rapport à la période de référence 1981-2010

Fig. 4.4 – Cartes des anomalies climatiques.
Source des données météorologiques : MétéoSuisse.

4.4 L'eau potable

Le but de ce chapitre est de quantifier la consommation en eau potable des communes afin de poser des hypothèses à propos de leur variation annuelle et mensuelle. La compréhension des variations saisonnières actuelles de la consommation en eau potable, en ce qui concerne la région de Crans-Montana-Sierre et ses communes, représente une étape fondamentale pour le calcul des scénarios de consommation futurs. Ces derniers visent à estimer la consommation en eau potable à l'horizon 2050. Il est donc nécessaire et prioritaire de récolter un grand nombre de données afin de poser des hypothèses les plus fiables et précises possible.

La quantification de l'utilisation de l'eau potable se base principalement sur les données enregistrées par les stations de mesure des communes, récemment informatisées. Trois communes sur onze, Chermignon, Icoigne et Mollens, n'ont pas collaboré à la quantification de la ressource en eau. Elles ont en effet refusé l'autorisation de consulter leur données de consommation d'eau potable. Ces informations seront donc reconstruites à partir des données annuelles analysées des communes limitrophes et des caractéristiques connues et observables des communes concernées. Bien que les données soient publiques, les communes ne les diffusent généralement pas. À notre connaissance, c'est la première fois que ces éléments sont analysés et comparés à l'échelle régionale.

4.4.1 L'équivalent en population résidente et la consommation d'eau potable des communes

D'après les données de l'OFS (2012), la station touristique de Crans-Montana est fréquentée surtout pendant la saison de ski et la saison estivale, c'est-à-dire entre Noël et mars et entre juin et septembre. Une quantité plus grande de personnes engendre évidemment une demande en eau accrue. Toutefois, la plupart des communes ne présente pas de pics de consommation pendant la période hivernale, et si c'est le cas, ces pics sont beaucoup plus faibles que ce que l'on pouvait penser. Nous pouvons faire deux hypothèses pour expliquer ce phénomène : la première serait que le tourisme n'influence pas la quantité d'eau potable utilisée pendant la haute saison, tandis que la deuxième considère que le tourisme consomme de l'eau potable pendant toute la haute saison mais que ce pic est masqué par l'augmentation de la demande d'eau potable par les résidents, notamment l'irrigation avec l'eau potable durant la saison estivale. Bien que ces deux hypothèses soient théoriquement valables, la deuxième, sur la base des observations faites sur le terrain, est largement la plus probable.

Quel est donc l'impact de la fréquentation touristique de la région sur la consommation en eau potable? Répondre à cette question a été un véritable défi et à plusieurs reprises, à chaque nouvelle intuition le manque de données nous a fait revenir au point de départ. L'équivalent habitant (EH) est une unité de mesure permettant d'évaluer la capacité d'une station d'épuration, mais qui sera utilisée ici comme une mesure permettant d'estimer la consommation d'eau potable de la population touristique et résidente. Elle se base principalement sur le nombre de nuitées touristiques (hôtelières et para-hôtelières) et a pourtant la faiblesse de ne pas tenir compte du tourisme de journée. L'EH est calculé de la manière suivante (équation 4.1) :

$$EH = \frac{\frac{n}{p} * f + r * j}{j} \quad (4.1)$$

Où n représente les nuitées hôtelières, p est le pourcentage de nuitées hôtelières par rapport aux nuitées totales, r est la population résidente et j le nombre de jours du mois considéré. La valeur f est un facteur de correction introduit dans l'équation 4.1 afin de différencier la quantité d'eau potable utilisée par les touristes par rapport aux résidents. Malheureusement, à cause du manque de données, le facteur de correction a été maintenu à 1, même s'il est probablement compris entre 1 et 1,5.

Cette démarche a été appliquée à toutes les communes de la région de Crans-Montana-Sierre ayant une fréquentation touristique et, à titre comparatif, à la station touristique de Zermatt. Les résultats de cette approche ont enfin été comparés avec les données récoltées à l'aide d'une étude sur la consommation en eau potable des ménages, qui a été menée en demandant à des bénévoles de remplir un formulaire en ligne intégré dans le site web du projet MontanAqua (<http://www.montanaqua.ch>, le site n'est plus accessible).

L'analyse de la consommation d'eau potable des communes a été réalisée en divisant les communes de la région en deux groupes :

- les communes avec une fréquentation touristique importante;
- les communes avec une fréquentation touristique négligeable.

Le premier groupe est constitué par la ville de Sierre et les communes du Haut-Plateau qui ont mis à disposition leurs données (Lens et Icogne³⁵, Montana et Randogne). Du

35. La commune d'Icogne est desservie par le réseau d'eau potable de Lens, ce qui permet de connaître la consommation des deux communes, même en n'ayant pas accès aux données d'Icogne.

deuxième groupe font partie les communes de la plaine et du coteau de Sierre (St-Léonard, Miège, Venthône et Veyras). Les communes du Haut-Plateau pour lesquelles nous ne disposons pas de données (Chermignon et Mollens) seront traitées séparément.

Cette démarche envisage une meilleure compréhension des analogies et des différences entre les communes de la région d'étude. L'analyse de la consommation en eau potable des communes est particulièrement importante, car elle constitue le seul usage de l'eau présent constamment tout au long de l'année. Suite à cette première étape, l'accent sera mis sur les pics de consommation détectés par les statistiques.

4.4.2 Les communes avec une fréquentation touristique importante

Ce sous-chapitre est dédié aux municipalités de Sierre, Montana, Lens, Icogne et Rاندogne, où la consommation d'eau potable est influencée par la fréquentation touristique et où les cultures présentes sur le territoire des communes sont principalement les prairies et le vignoble. Icogne est traitée conjointement à Lens, les deux réseaux étant connectés.

Sierre

La consommation en eau potable de la ville de Sierre (figure 4.5 et annexe 5) connaît une importante augmentation pendant la saison estivale. Le tableau 4.3 montre que la consommation mensuelle maximale varie sensiblement d'une année à l'autre, et que, par contre, la consommation annuelle minimale et la moyenne annuelle restent plutôt stables. La fréquentation touristique est responsable d'environ 3.5% de la consommation d'eau potable de la commune, avec un pic en février (9%) et juillet (3.5%). L'estimation de la consommation d'eau potable par EH est de 480 l par jour en 2010 et de 517 l par jour en 2011. La sécheresse printanière d'avril et mai 2011 n'a pas pris au dépourvu les responsables de la gestion de l'eau de Sierre Energie SA qui ont un plan pour ce genre d'occasions; en fait il peuvent agir en diminuant l'irrigation des vignes (eau d'irrigation non potabilisée) sur de longues périodes et en interdisant d'arroser les pelouses dans le cas où la sécheresse aurait duré plus longtemps³⁶.

36. Entretien du 8 juin 2011 avec Pierre-Alain Pouget, Chef de Division Eau&Gaz de Sierre Energie SA.

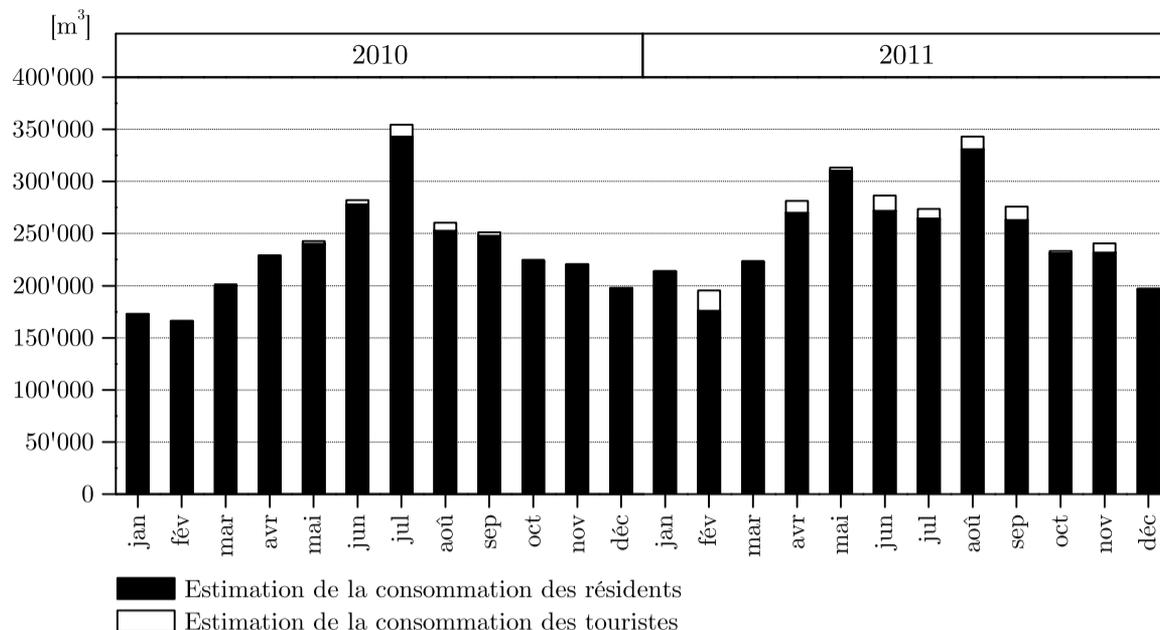


Fig. 4.5 – Consommation d’eau potable de la ville de Sierre.

Source des données de consommation : Sierre Energie SA.

Source des données sur la fréquentation touristique : Office du tourisme de Sierre Salgesch (2012) et OFS (2012).

Année	MM [m ³]	Max [m ³ /mois]	Min [m ³ /mois]	Total [m ³ /année]
2006	237'850	359'834 (jul)	154'062 (déc)	2'854'199
2007	214'253	280'029 (mai)	151'176 (fév)	2'571'032
2008	222'922	299'680 (jun)	167'524 (fév)	2'675'063
2009	228'365	314'649 (jun)	161'762 (fév)	2'740'374
2010	233'762	354'629 (jul)	166'460 (fév)	2'805'146
2011	256'513	342'933 (août)	195'460 (fév)	3'078'157

Tab. 4.3 – Consommation d’eau potable de la ville de Sierre.

Source des données : Sierre Energie SA (annexe 5).

Montana

Le pic de consommation maximale de la commune de Montana se situe pendant la période estivale (figure 4.6 et tableau 4.4). Par rapport à Sierre, la présence des touristes a une empreinte beaucoup plus marquée sur la consommation d’eau potable, qui se monte à 31% de moyenne pour la période 2006–2011 (les données pour l’années 2008 n’ont pas été communiquées). Pendant le mois de février, les touristes présents dans la communes représentent plus de 50% de la consommation totale de la commune. Pendant la haute saison, ce pourcentage ne descend jamais en dessous de 40%. Les pics engendrés par la population résidente se situent pendant le mois de mai, octobre et novembre, soit en basse saison (figure 4.6).

En 2011, la sécheresse printanière a engendré un pic de consommation qui s’est superposé à celui que la population résidente produit normalement pendant cette période, ce qui a porté à un pic de portée exceptionnelle. L’estimation de la consommation d’eau potable par EH est de 458 l par jour en 2010 et de 521 l par jour en 2011.

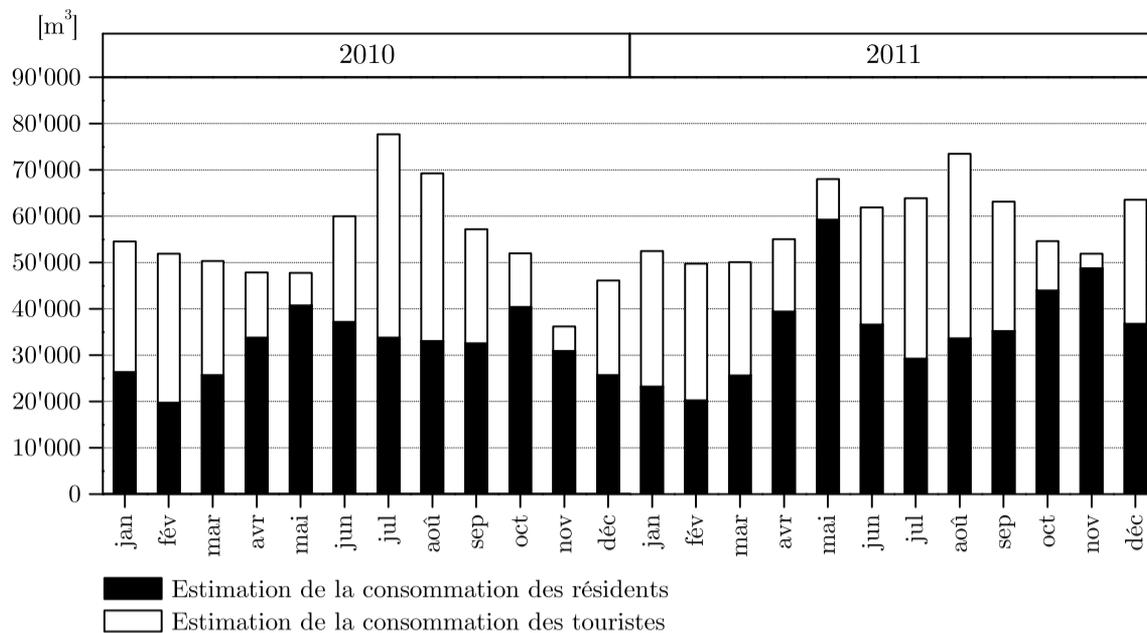


Fig. 4.6 – Consommation d'eau potable de la commune de Montana.

Source des données de consommation : Commune de Montana

Source des données sur la fréquentation touristique : Crans-Montana tourisme (2012) et OFS (2012).

Année	MM [m³]	Max [m³/mois]	Min [m³/mois]	Total [m³/année]
2006	59'186	84'023 (jul)	45'042 (nov)	710'235
2007	56'671	67'660 (déc)	51'162 (nov)	680'050
2008	données non communiquées			
2009	65'827	81'235 (sep)	46'066 (nov)	789'929
2010	54'241	77'686 (jul)	36'164 (nov)	650'890
2011	58'985	73'497 (août)	49'766 (fév)	707'828

Tab. 4.4 – Consommation d'eau potable de la commune de Montana.

Source des données : commune de Montana (annexe 6).

MM : moyenne mensuelle.

Lens et Icogne

L'infrastructure de la commune de Lens permet de connaître dans le détail la quantité d'eau amenée dans son réseau de distribution par les sources de Lens, d'Icogne et du vallon de l'Ertentse, ainsi que l'eau prélevée dans le barrage de Tseuzier. Par contre, à cause du fait que le réseau d'approvisionnement en eau potable de Lens dessert également la commune d'Icogne, il n'est pas possible de quantifier précisément combien d'eau est consommée par Lens et par Icogne³⁷. Pour cette raison, les deux communes sont traitées conjointement. Cette situation est également déterminée par l'impossibilité de consulter les données de consommation de la commune d'Icogne. Pendant l'été, la consommation de ces deux communes augmente considérablement (figure 4.7 et 4.5) et la présence conjointe des touristes pendant cette saison fait augmenter ultérieurement le pic de consommation. Les touristes représentent ici 17% de la consommation annuelle d'eau potable avec un maximum de 34% pendant le mois de février et un pourcentage toujours proche de 20% pendant la haute saison. L'esti-

37. Correspondance électronique du 7 février 2012 avec Yvan Epiney, collaborateur de DPE SA

mation de la consommation d'eau potable par EH reste stable à environ 700 l par jour pour 2010 et 2011.

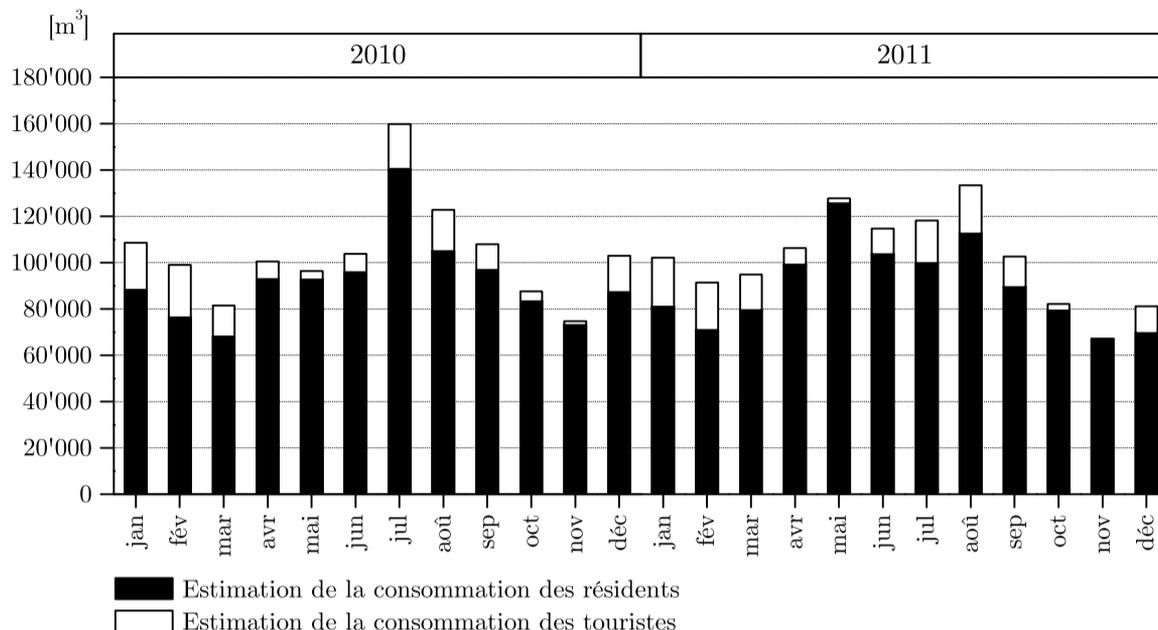


Fig. 4.7 – Consommation d'eau potable de la commune de Lens et Icogne.

Source des données de consommation : Commune de Lens et DPE SA

Source des données sur la fréquentation touristique : Crans-Montana tourisme (2012) et OFS, 2012.

Année	MM [m³]	Max [m³/mois]	Min [m³/mois]	Total [m³/année]
2009	114'153	155'235 (août)	68'135 (nov)	1'369'839
2010	103'782	159'800 (jul)	74'671 (nov)	1'237'525
2011	101'838	133'347 (août)	67'165 (nov)	1'222'059

Tab. 4.5 – Consommation d'eau potable de la commune de Lens et d'Icogne.

Source des données : communes de Lens et Icogne (annexe 7).

MM : moyenne mensuelle.

Randogne

D'après les statistiques (figure 4.8 et tableau 4.6), la consommation en eau potable de la commune de Randogne (annexe 8) a connu une véritable explosion pendant les années 2007 et 2008, principalement à cause de défaillances techniques. Le tableau 4.6 montre qu'à l'exception de ces deux années, la consommation en eau potable de la commune de Randogne subit peu de variations d'une année à l'autre. Il faut également signaler le pic de consommation maximale de juillet 2010 (114'674 m³), 33'000 m³ de plus par rapport au même mois de l'année précédente. Les données pour la période entre décembre 2010 et décembre 2011 n'ayant pas été mises à ma disposition, il a fallu en faire une estimation en exploitant le rapport existant (qui n'est pas fixe, mais varie d'un mois à l'autre) entre les données de Randogne et celles d'Icogne, Lens et Montana. L'estimation de la consommation d'eau potable par EH est de 590 l par jour en 2010 et de 660 l par jour en 2011.

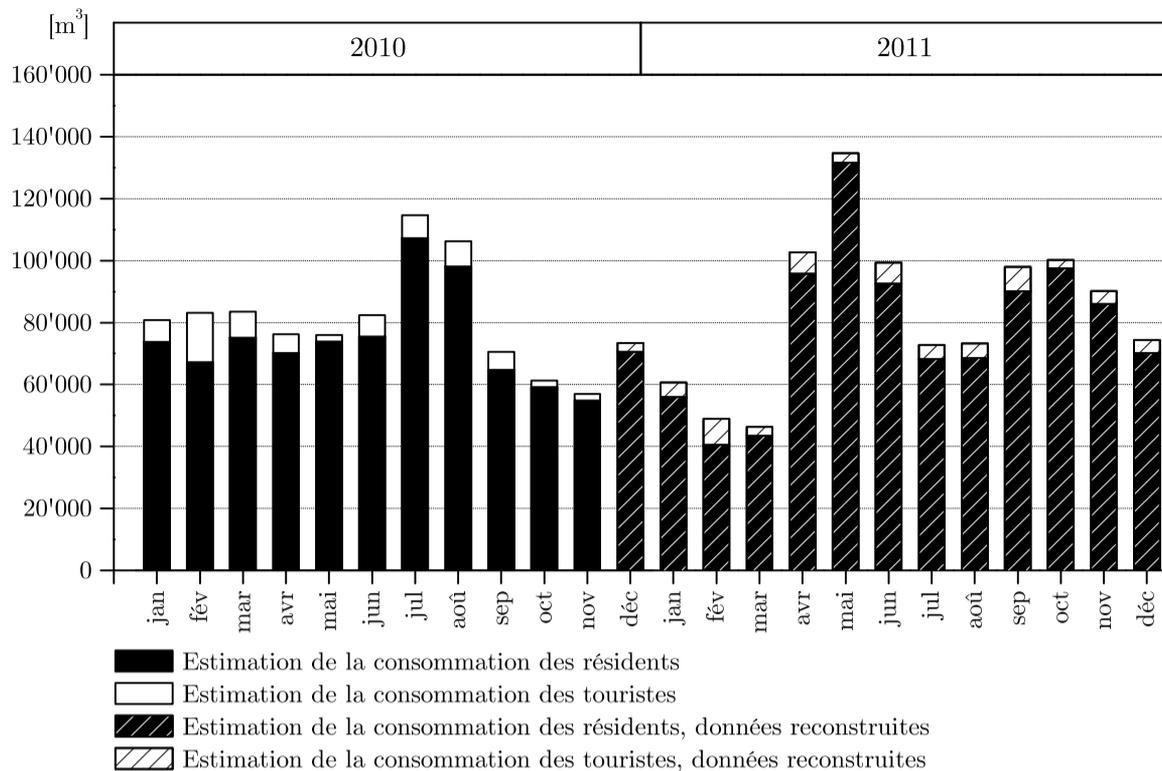


Fig. 4.8 – Consommation d'eau potable de la commune de Randogne.

Source des données de consommation : Commune de Randogne

Source des données sur la fréquentation touristique : Crans-Montana Tourisme, 2012 et OFS, 2012.

Année	MM [m ³]	Max [m ³ /mois]	Min [m ³ /mois]	Total [m ³ /année]
2006	78'515	95'029 (jan)	61'248 (jul)	963'668
2007	106'402	134'036 (août)	71'933 (déc)	1'227'826
2008	107'187	138'847 (sep)	69'290 (jan)	1'286'239
2009	78'258	97'887 (sep)	64'579 (nov)	960'841
2010 ^a	81'087	114'674 (jul)	56'996 (nov)	968'310
2011 ^b	83'451	134'699 (mai)	46'369 (mar)	1'001'409

Tab. 4.6 – Consommation d'eau potable de la commune de Randogne.

Source des données : commune de Randogne (annexe 8).

MM : moyenne mensuelle

^a estimation du mois de décembre ; ^b estimation de la consommation 2011.

4.4.3 Les communes avec une fréquentation touristique négligeable

Ce sous-chapitre est dédié à des municipalités de St-Léonard et de celles qui se trouvent sur le coteau de Sierre, où le vignoble occupe une importante surface du territoire des communes.

St-Léonard

La demande en eau potable de la commune de St-Léonard (figure 4.9) est caractérisée par plusieurs pics de consommation. L'année 2010 se caractérise par deux pics de consommation principaux, en juillet et en octobre. Ce dernier pic, plutôt inhabituel, pourrait être expliqué par la présence de nombreuses caves sur le territoire commu-

nal. En 2011, durant les mois de mars et avril, la quantité d'eau utilisée a augmenté sensiblement pour ensuite diminuer jusqu'au mois de juillet. Août et septembre sont caractérisés par une nouvelle augmentation de la consommation, alors qu'à partir du mois d'octobre la quantité utilisée diminue de manière très importante. Une diminution très semblable par importance a eu lieu pendant les mois de novembre et décembre 2009 et ne semble donc pas être un événement isolé (annexe 9). La consommation d'eau potable par habitant par jour a été de 543 l en 2010 et de 652 l en 2011. La localisation de l'habitat - qui se situe essentiellement sur la plaine du Rhône - et la typologie de logements - qui se compose essentiellement de maisons individuelles - peuvent expliquer l'importante consommation en eau potable par habitant.

Année	MM [m ³]	Max [m ³ /mois]	Min [m ³ /mois]	Total [m ³ /année]
2010	34'509	45'547 (jul)	24'308 (jan)	414'155
2011	40'844	52'731 (avr)	18'160 (déc)	497'061

Tab. 4.7 – Consommation d'eau potable de la commune de St-Léonard.

Source des données : commune de St-Léonard (annexe 9).
MM : moyenne mensuelle.

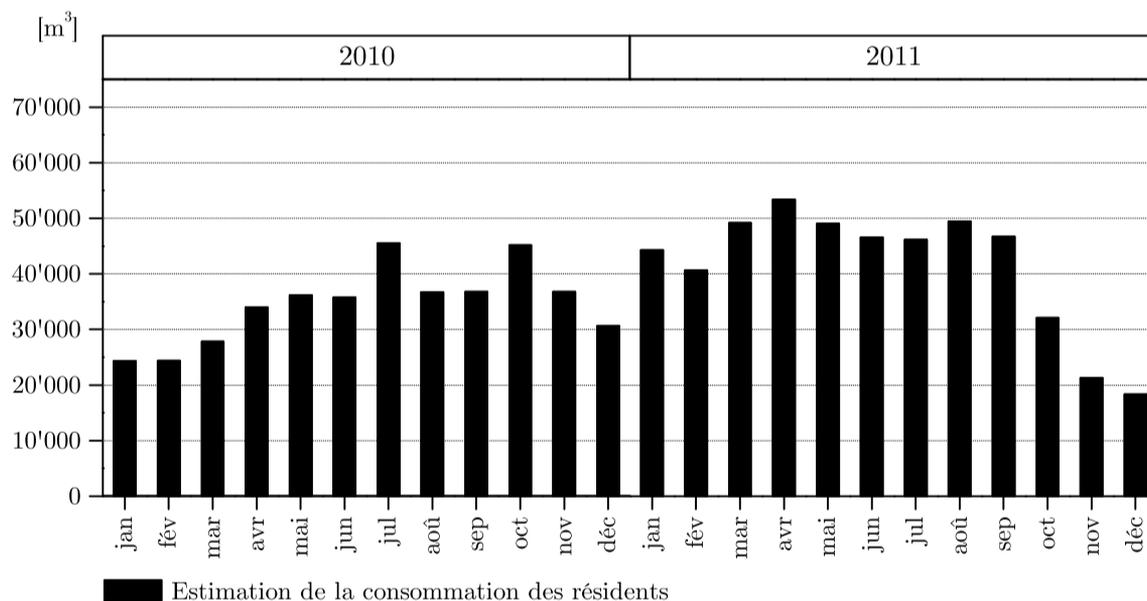


Fig. 4.9 – Consommation d'eau potable de la commune de St-Léonard.

Source des données de consommation : Commune de St-Léonard.

Miège

La consommation en eau potable de la commune de Miège (tableau 4.10 et figure 4.10) a été calculée en utilisant les données mises à disposition par DPE SA avec l'autorisation de la commune concernée. La démarche pour obtenir l'ensemble de l'eau distribuée et utilisée dans la commune a dû tenir compte de l'eau amenée vers la commune voisine de Veyras, qui a donc été soustraite de la quantité d'eau rentrant dans le réseau d'approvisionnement miégeois. La consommation en eau de la commune de Miège (tableau 4.8) se caractérise par un pic printanier qui peut s'étendre jusqu'au

début de l'été et un pic pendant les mois de septembre et octobre. La quantité d'eau utilisée varie entre les 14'353 m³ de décembre 2011 et les 34'386 m³ du mois de mai de la même année. La quantité annuelle d'eau potable utilisée reste constante autour de 316'500 m³. La consommation d'eau potable par habitant et par jour a été de 769 l en 2010 et de 804 l en 2011, ce qui fait de la commune de Miège la commune avec la plus grande consommation par habitant de la région de Crans-Montana-Sierre. L'origine de ce phénomène est probablement à rechercher dans la localisation de la commune et dans la quantité de maisons individuelles qui y sont situées (sur l'exemple de la commune de St-Léonard).

Année	MM [m ³]	Max [m ³ /mois]	Min [m ³ /mois]	Total [m ³ /année]
2008	26'247	32'347 (jul)	19'228 (nov)	314'964
2009	26'949	32'088 (jun)	23'173 (fév)	296'436
2010	26'901	29'943 (mai)	22'493 (fév)	322'811
2011	25'495	34'386 (mai)	14'353 (fév)	305'936

Tab. 4.8 – Consommation d'eau potable de la commune de Miège.

Source des données : commune de Miège (annexe 10).
MM : moyenne mensuelle.

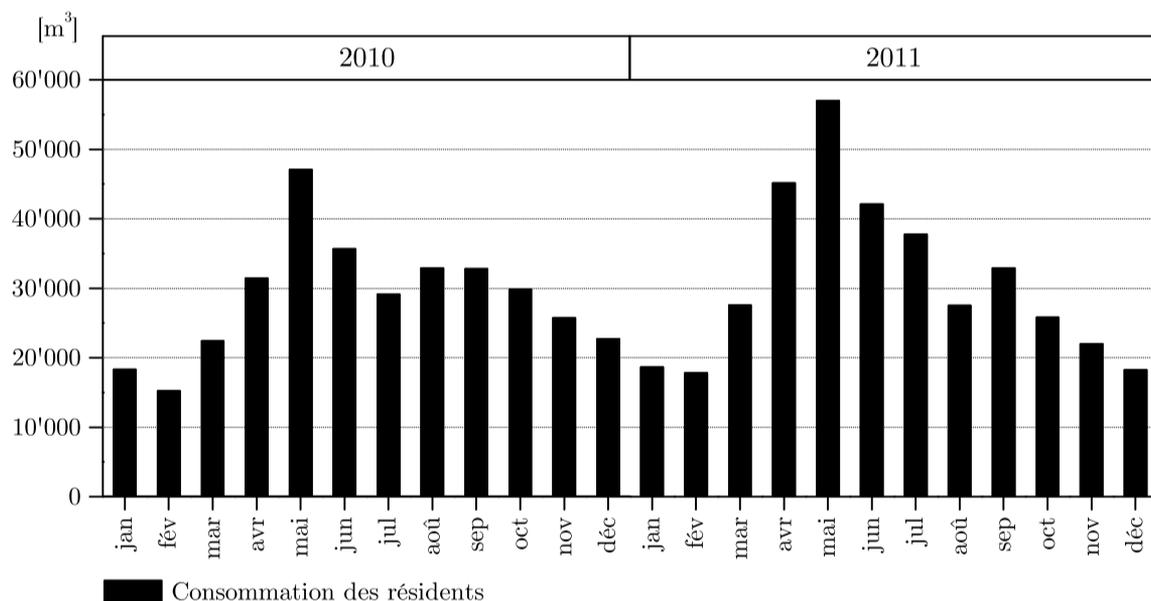


Fig. 4.10 – Consommation d'eau potable de la commune de Miège.

Source des données de consommation : DPE SA sous l'autorisation de la commune de Miège.

Venthône

Les statistiques (figure 4.11) montrent que la consommation en eau potable connaît trois pics de consommation pendant l'année : au printemps (entre avril et mai), en été (entre juillet et août) et en octobre (lors des vendanges). L'anomalie la plus grande dans les données mises à disposition est représentée par le pic de consommation qui a eu lieu entre août et octobre 2009 (annexe 11). Ce grand pic de consommation correspond en même temps à une période de faibles précipitations et à la période des vendanges, facteurs qui en sont donc très probablement la cause. L'analyse de la consommation en

eau (tableau 4.9) amplifie l'importance de l'anomalie survenue en 2009, sans laquelle les trois années considérées se ressembleraient beaucoup plus. La consommation d'eau potable par habitant par jour a été de 269 l en 2010 et de 307 l en 2011. Cette commune a la consommation par habitant la plus contenue de la zone d'étude, résultat dû à la séparation du réseau d'eau potable et de celui de d'irrigation.

Année	MM [m ³]	Max [m ³ /mois]	Min [m ³ /mois]	Total [m ³ /année]
2008	9'708	12'173 (fév)	8'019 (déc)	116'497
2009	9'162	11'826 (nov)	7'135 (mar)	1190942
2010	9'385	12'002 (jul)	7'371 (mai)	112'624
2011	10'912	14'367 (mai)	8'180 (fév)	130'948

Tab. 4.9 – Consommation d'eau potable de la commune de Venthône.

Source des données : commune de Venthône (annexe 11).
MM : moyenne mensuelle

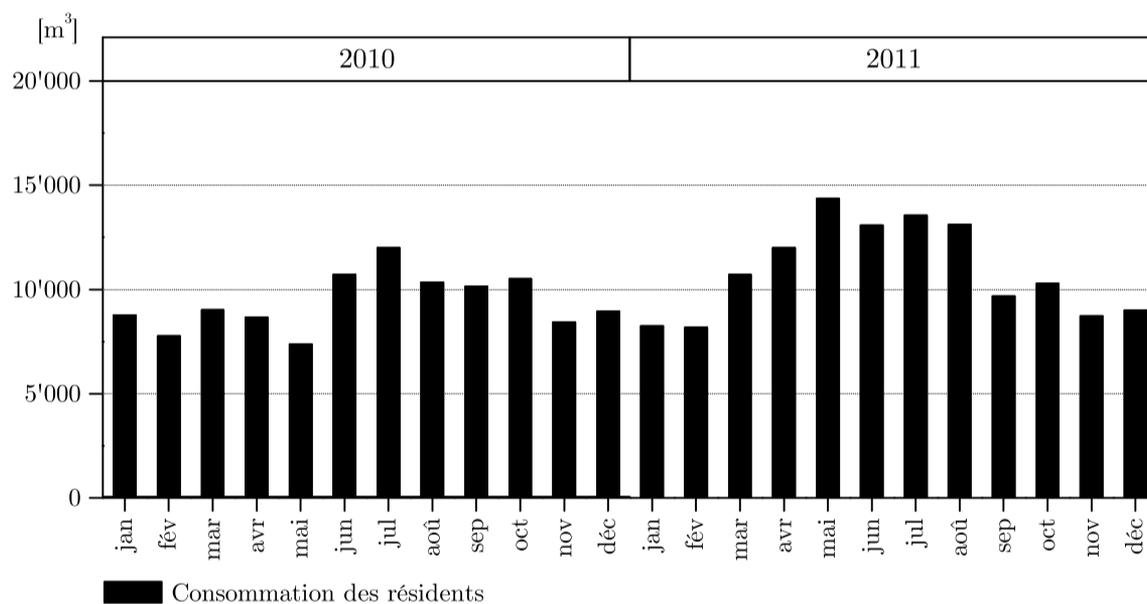


Fig. 4.11 – Consommation d'eau potable de la commune de Venthône.

Source des données de consommation : commune de Venthône.

Veyras

La quantité d'eau potable utilisée dans la commune varie considérablement d'une année à l'autre (tableau 4.10). Pendant l'été, la demande en eau augmente et reste relativement importante jusqu'à la fin de septembre ou octobre. Pendant les années analysées, la quantité d'eau consommée mensuellement varie entre 2'543 m³ (janvier 2009) et 15'252 m³ (juillet 2010). Il ne faut pas oublier que Veyras est la seule commune qui ne dispose pas de ressources propres et qui doit aller chercher l'eau dans les communes limitrophes (Miège, Sierre et Venthône). La consommation en eau a été calculée en utilisant les données mises à disposition par DPE SA avec l'autorisation de la commune.

D'après les entretiens avec le responsable de la gestion de l'eau de la commune³⁸, à ce jour Veyras est la municipalité concernée par le projet MontanAqua la plus touchée par les problèmes d'approvisionnement en eau potable. La consommation d'eau potable par habitant par jour a été de 382 l en 2010 et de 331 l en 2011. La commune de Veyras représente donc le seul cas dans la région où la consommation par habitant a été plus importante en 2010 par rapport au 2011, très probablement à cause de la dépendance à l'égard des communes limitrophes.

Année	MM [m ³]	Max [m ³ /mois]	Min [m ³ /mois]	Total [m ³ /année]
2008	10'594	14'243 (août)	2'867 (déc)	127'131
2009	11'026	14'595 (août)	5'588 (jan)	132'311
2010	11'407	15'621 (août)	4'735 (déc)	136'881
2011	9'005	13'006 (mai)	4'758 (nov)	108'063

Tab. 4.10 – Consommation d'eau potable de la commune de Veyras.

Source des données : DPE SA sous l'autorisation de la commune de Veyras (annexe 12).

MM : moyenne mensuelle

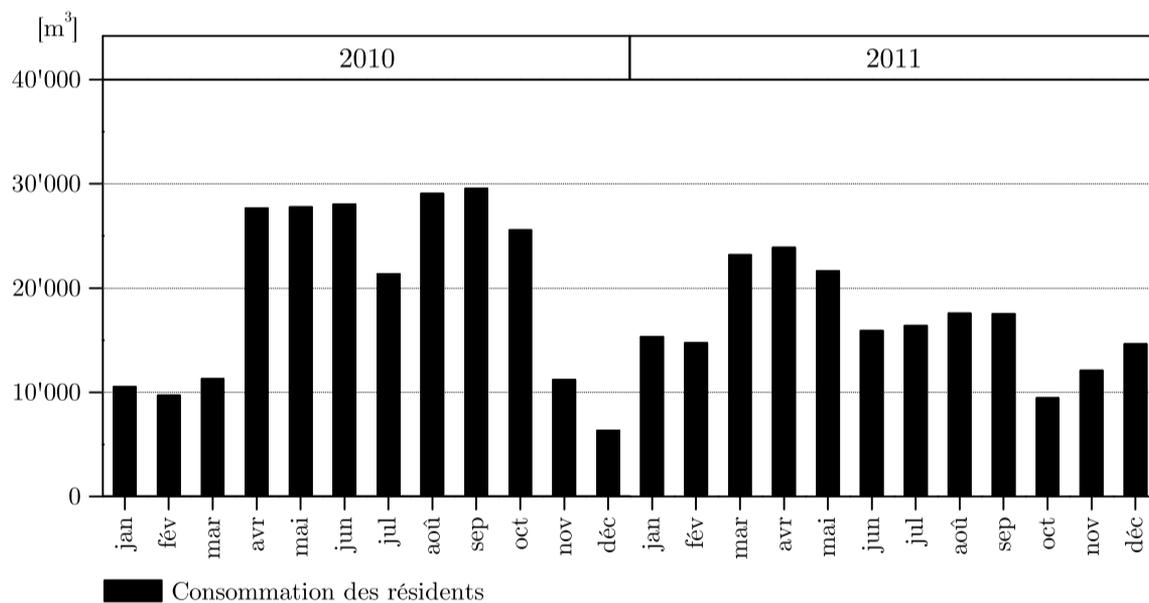


Fig. 4.12 – Consommation d'eau potable de la commune de Veyras.

Source des données de consommation : commune de Veyras.

4.4.4 Estimation des la consommation en eau potable des communes de Chermignon et Mollens

Comme indiqué dans l'introduction de ce chapitre, les communes de Chermignon, Icogne et Mollens n'ont pas accordé l'accès aux données de consommation en eau potable. Vu que les données concernant la commune d'Icogne sont comprises dans les statistiques de la commune de Lens, il reste à estimer la consommation en eau

38. Entretien du 20 août 2010 avec Serge Amoos, alors conseiller communal de Veyras.

potable des communes de Chermignon et Mollens. N'ayant pas d'indications détaillées, la consommation en eau potable de ces deux communes a été calculée en multipliant la consommation d'eau potable journalière par EH des communes du Haut-Plateau (Icogne, Lens et Montana) par l'EH des communes de Chermignon et Mollens.

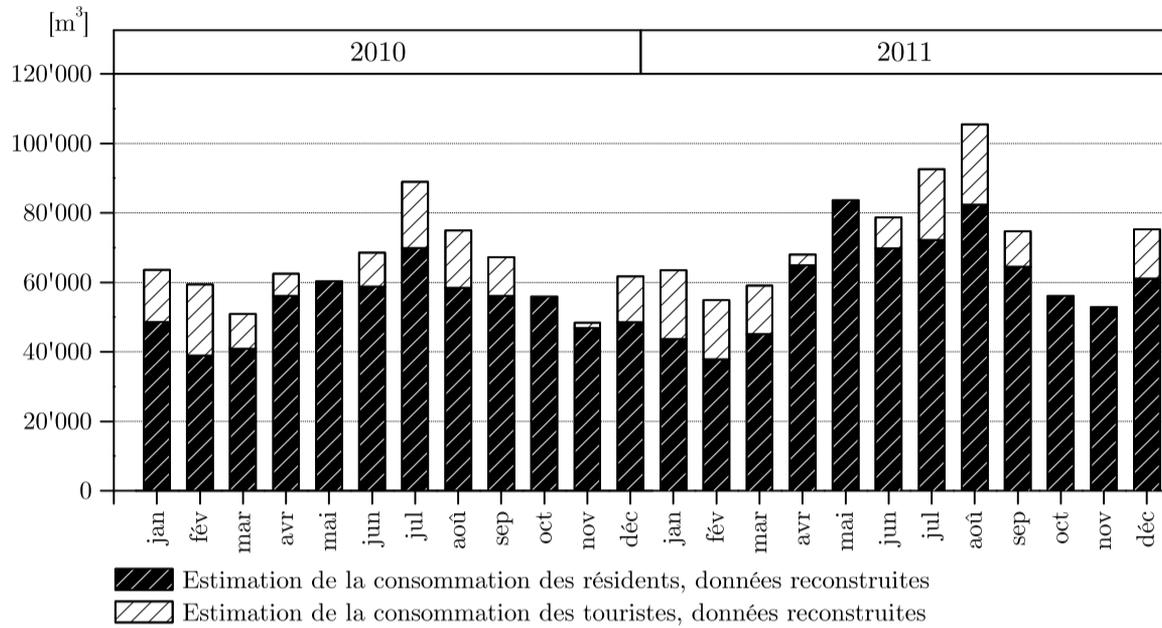


Fig. 4.13 – Estimation de la consommation d'eau potable de Chermignon.

Source des données sur la fréquentation touristique : Crans-Montana tourisme (2012) et OFS, 2012.

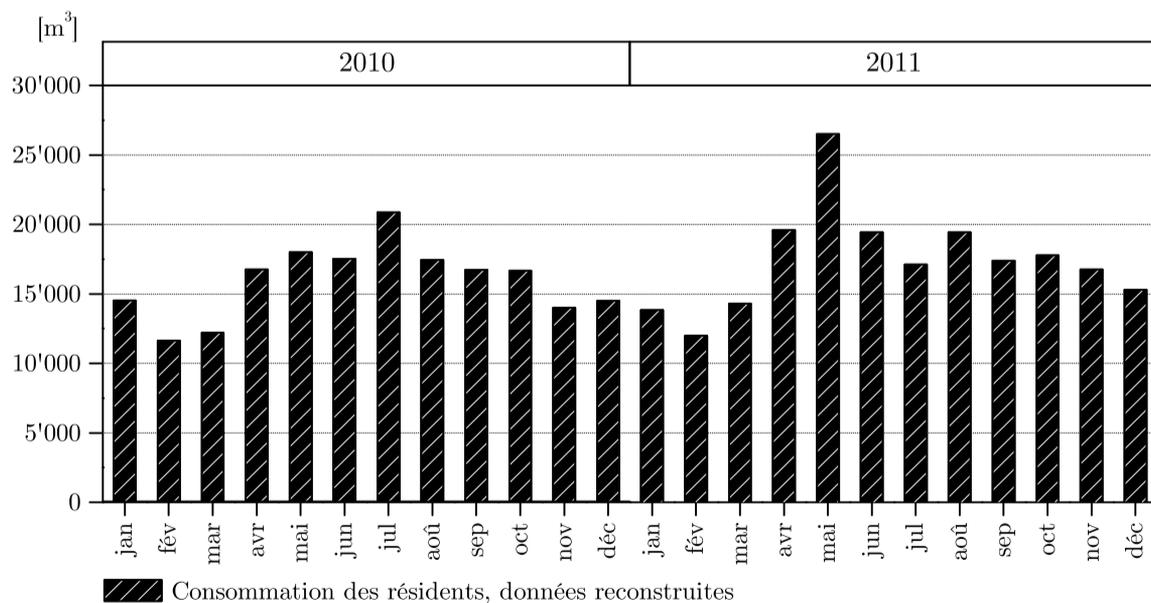


Fig. 4.14 – Estimation de la consommation d'eau potable de Mollens.

En suivant cette démarche, il semble que la fréquentation touristique de la commune de Chermignon soit responsable de 20-35% de la consommation d'eau potable pendant la haute saison (figure 4.13). La statistique de l'hébergement touristique de l'OFS (2012) n'inclut aucune donnée sur la fréquentation touristique de Mollens (qui est, à notre connaissance, exclusivement para-hôtelière). Cela ne signifie pas qu'il n'y a pas de touristes qui séjournent dans la commune, mais plutôt que leur nombre est très réduit (surtout par rapport à la fréquentation touristique du reste de la station). Par conséquent, l'impact du tourisme sur la consommation en eau potable de la commune de Mollens (figure 4.14) est à considérer comme négligeable.

4.4.5 Comparaison avec la consommation d'eau potable de la commune de Zermatt

Le village de Zermatt, situé à une altitude de 1'608 m au pied du Cervin, a été choisi pour une comparaison pour ses caractéristiques radicalement différentes par rapport à celles de la région de Crans-Montana-Sierre. La station touristique de Zermatt, au fond du Mattertal, est l'une des destinations touristiques les plus fréquentées de Suisse, avec presque 2 millions de nuitées touristiques chaque année. Comme dans le cas de Crans-Montana-Sierre, une estimation de la consommation en eau du tourisme journalier n'est pas possible. La taille moyenne des parcelles est plutôt réduite, par conséquent le village est très dense et les gazons privés, s'ils sont présents, ont une surface limitée. En se promenant dans le village (où les voitures conventionnelles sont bannies), l'attention aux détails est évidente sinon ostentatoire : tout est en ordre et les nombreux vases de fleurs ne sont que le glaçage sur le gâteau. Cependant, la plupart des gazons privés ressemblent, tant en termes de biodiversité que par leur hauteur, à des gazons naturels. La gestion de l'eau, facilitée par la densité du village, est faite en utilisant les moyens techniques les plus avancés : réseau informatisé actualisé en temps réel, données SIG détaillées de l'ensemble des conduites et personnel qualifié. Il n'est donc pas étonnant de constater que la commune n'a pas connu de problèmes d'eau, qualitatifs ou quantitatifs, depuis très longtemps. En raison des précautions prises et de la localisation des sources, l'activité agropastorale, réduite à 100-200 moutons, ne représente pas un risque de pollution des eaux. Sur le territoire de la commune, il n'y a pas de grands consommateurs d'eau tels que les patinoires ou les piscines publiques. Les piscines privées, pour la plupart propriété d'hôtels, sont une douzaine. L'eau potable est utilisée pour alimenter les canons à neige seulement en cas de nécessité, et uniquement avant le début des vacances de Noël. La tarification de la consommation en eau potable est calculée sur la base de la taille de l'immeuble, de la surface de la parcelle et du volume

consommé³⁹. Ces caractéristiques font de la consommation en eau de Zermatt l'une des clés principales pour mieux comprendre celle de Crans-Montana-Sierre. En particulier, le rôle très limité que l'irrigation des cultures et des gazons joue à Zermatt permettra une meilleure estimation de ces phénomènes dans la région de Crans-Montana-Sierre.

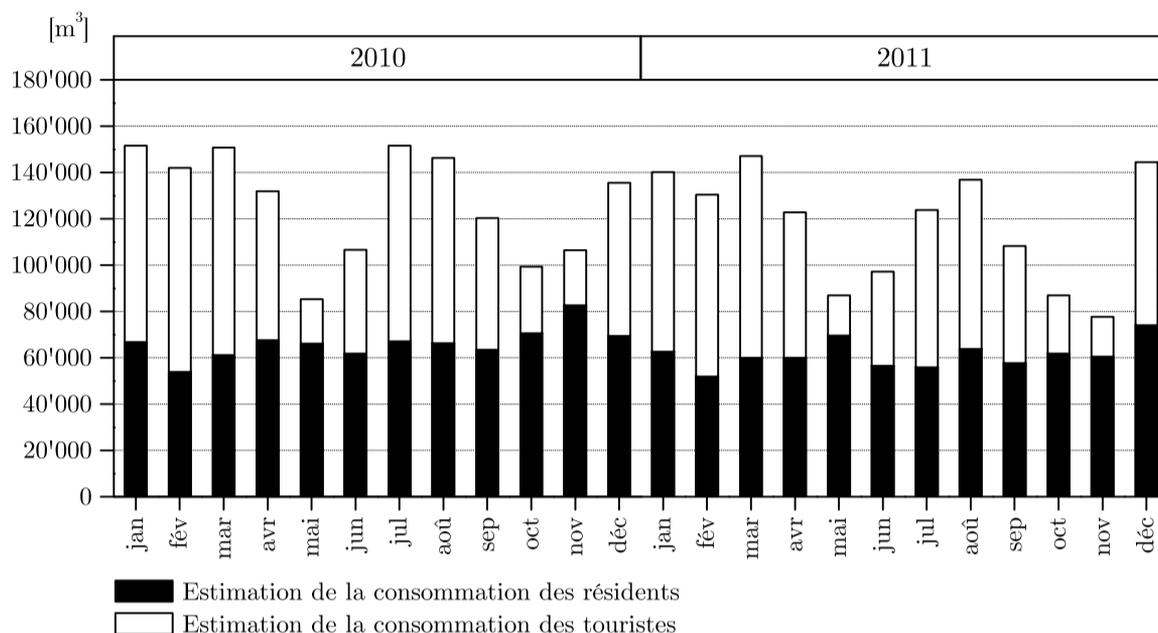


Fig. 4.15 – Consommation d’eau potable de Zermatt.

Source des données de consommation : commune de Zermatt.

Source des données sur la fréquentation touristique OFS, 2012.

La consommation d’eau potable de la population résidente de Zermatt (figure 4.15) reflète, comme attendu, les caractéristiques morphologiques du village. Pendant tout l’été la consommation d’eau potable reste plutôt stable autour de 400 l/j/EH, ce qui permet de conclure que le pic estival connu à Montana et alentours est dû à l’irrigation. L’utilisation de l’eau potable pour l’enneigement artificiel semble être la cause du pic de consommation du mois de novembre 2010.

39. Entretien du 6 août 2012 avec Paul Schwery, responsable de l’approvisionnement en eau de Zermatt.

4.4.6 Comparaison entre la consommation journalière d'eau potable par EH des communes de la région

Les pics de consommation sont engendrés par la variation du besoin en eau potable des consommateurs, déterminée à son tour par des causes externes, qui imposent un approfondissement de la thématique. L'analyse statistique faite dans les chapitres précédents met en évidence les analogies entre les communes du Haut-Plateau, celles du coteau de Sierre et la ville homonyme. En règle générale, la demande en eau potable des communes du Haut-Plateau est la plus élevée entre juin et septembre et la plus faible entre novembre et janvier. Les communes du coteau de Sierre se caractérisent par une variation mensuelle de leur consommation relativement faible. Par rapport aux communes du Haut-Plateau, leur pic de consommation s'étend sur une période plus longue (comprise entre avril et août selon les années). D'après les statistiques, la concentration temporelle de la consommation de la ville de Sierre ressemble beaucoup plus aux communes de son coteau qu'aux communes du Haut-Plateau. La figure 4.16 montre la variation mensuelle de la consommation d'eau potable journalière par EH des onze communes de la région de Crans-Montana-Sierre et de la commune de Zermatt, à partir de laquelle il est possible de conclure que :

- L'arrosage des gazons et des jardins fait augmenter la quantité d'eau journalière par EH⁴⁰ et peut expliquer les pics de demande pendant les mois les plus chauds et secs. Les zones résidentielles irriguées (ZRI) comprennent non seulement les pelouses, mais également les arbres, les haies, les parterres de fleurs, les jardins potagers, etc. Normalement, ce genre de surface est arrosée de manière libre par les propriétaires entre avril et septembre, ce qui pourrait expliquer la forte augmentation de la demande en eau potable dans les communes dépourvues d'un système d'irrigation séparé pendant la période estivale. Une étude a été consacrée à cet usage au chapitre 4.5.6.
- La commune de Zermatt, où y il n'y a pratiquement pas d'irrigation, a une consommation par EH extrêmement régulière autour des 400 l/j.
- Les communes de Sierre, Venthône et Veyras sont les communes qui consomment le moins d'eau potable par EH dans la région d'étude. Ce phénomène est la conséquence non seulement de la séparation des réseaux d'irrigation et de l'eau potable à Venthône, mais aussi de la possibilité des citoyens de se brancher sur le réseau d'irrigation communal à Veyras et de la morphologie urbaine de Sierre.
- La commune de Montana est la commune du Haut-Plateau la plus économe en ce qui concerne la consommation d'eau potable par EH. Ce primat est très probablement dû au réseau d'irrigation pour les prairies dont la commune est équipée.

40. Entretien du 8 juin 2011 avec Pierre-Alain Pouget, Chef de Division Eau&Gaz de Sierre Energie SA.

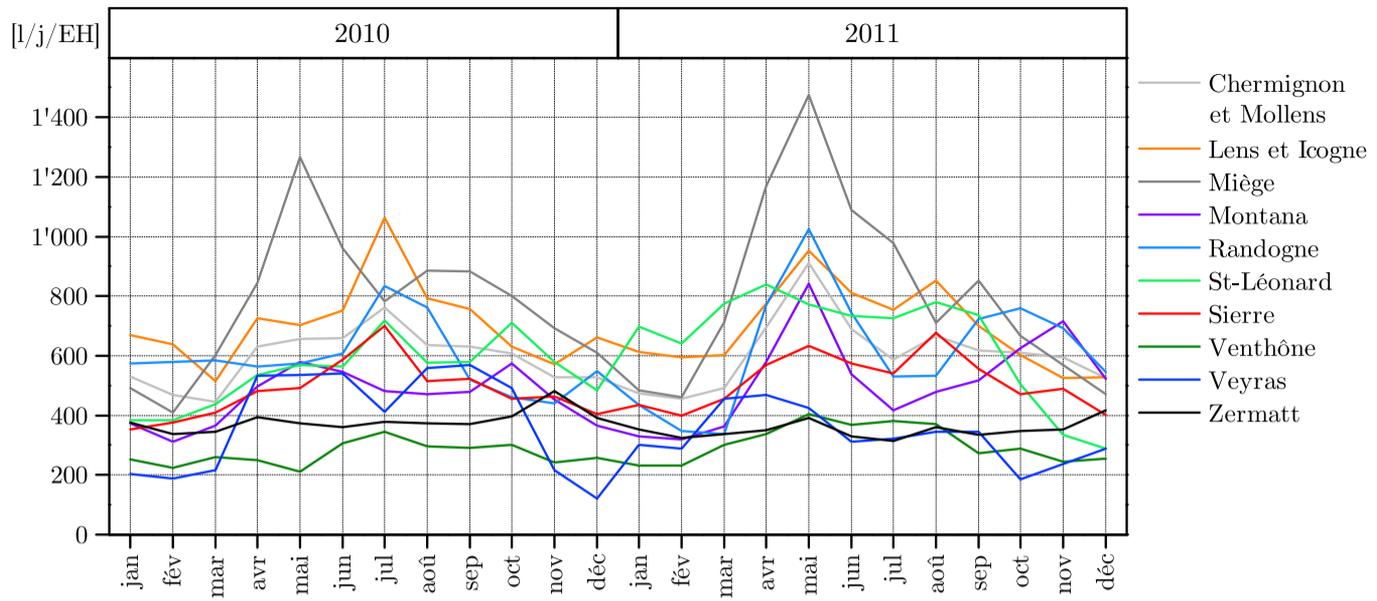


Fig. 4.16 – Comparaison de la consommation d'eau potable par équivalent-habitant journalière des communes de la région.

D'après la figure 4.16, la consommation d'eau potable varie non seulement en termes absolus, mais également en termes de litres par jour par EH. Il s'avère par contre extrêmement difficile d'identifier toutes les causes qui ont déterminé cette variation.

4.4.7 L'usage de l'eau pendant les vendanges

Ce sous-chapitre est consacré à l'eau utilisée dans les caves pendant les vendanges. La composition du vin constitue un milieu plutôt hostile pour les germes pathogènes susceptibles de déclencher des toxi-infections alimentaires collectives ; cependant une hygiène irréprochable est indispensable afin d'éviter l'altération du produit et de ses qualités organoleptiques (IFV, 2011). Par conséquent, durant les mois de septembre et octobre, pendant la récolte, de la vendangeuse à la cuve inox, tout doit être impeccable pour éviter contaminations bactériologiques et grippages mécaniques malvenus (IFV, 2011). La quantité d'eau utilisée dans une cave pour maintenir un niveau hygiénique satisfaisant fluctue en fonction de plusieurs facteurs :

- la quantité de vin produite
- la nature de la surface à nettoyer (bois, plastique, inox...)
- la qualité de l'eau
- l'utilisation de l'eau pour le refroidissement des cuves (entre octobre et novembre)

Les eaux usées sortant des caves sont souvent chargées en matières organiques et très acides, ce qui perturbe l'épuration (Canton du Valais, 2011). La section Protection des eaux du Département des transports, de l'équipement et de l'environnement du Canton du Valais a donc émis des dispositions permettant de minimiser l'impact des effluents vinicoles sur les STEP (Canton du Valais, 2011). La première et plus importante disposition encourage une économie de consommation et un recyclage des eaux non polluées, tandis que les autres mettent l'accent sur la qualité de l'eau (Canton du Valais, 2011).

Les caves vinicoles ne sont pas présentes de manière homogène dans la région de Crans-Montana-Sierre (tableau 4.11 et annexe 13) : sur un total de 60 caves, seuls 3 se situent sur le Haut-Plateau (au-dessus des vignes). Ces caves qui se trouvent dans la partie basse des communes du Haut-Plateau, se trouvent physiquement très proches des autres caves de la région.

Commune	Chermignon	Icogne	Lens	Miège	Mollens	Montana	Randogne	Sierre	St-Léonard	Venthône	Veyras
Nombre de caves	2	0	3	9	0	6	4	18	4	8	6

Tab. 4.11 – Nombre de caves par commune.

Source : Les vins du Valais (2012).

Les encaveurs amateurs ne sont pas inclus dans cette statistique.

En ce qui concerne les communes de Miège (figure 4.10), Montana (figure 4.6), St-Léonard (figure 4.9) et Venthône (figure 4.11), le nombre relativement important de caves explique au moins partiellement le pic de consommation en eau potable pendant les mois de septembre et octobre (cf. aussi figure 4.16). Par contre, ce pic n'est pas visible dans les statistiques de Sierre, « caché » par la quantité d'eau potable utilisée par la ville pendant toute l'année.

Malheureusement, connaître combien de caves sont présentes dans la zone d'étude ne suffit pas à quantifier l'eau utilisée par chaque cave. La consommation en eau des caves dépend principalement de la quantité de vin produite, mais également des techniques de production. L'absence de données à ce propos limite l'essai de quantification à des observations plutôt qualitatives.

4.4.8 L'utilisation de l'eau potable pour l'irrigation en début de saison

L'irrigation du printemps se distingue fortement de celle pratiquée pendant les mois les plus chauds, car les systèmes racinaires des jeunes plantes sont peu profonds et fragiles et il ne faut pas leur permettre de s'assécher complètement (Shortt, 2010). Ce phénomène pourrait donc être à la base de l'augmentation de la consommation d'eau potable (figure 4.16) pendant les mois d'avril et de mai de la plupart des communes (sauf Randogne en ce qui concerne 2010 et Venthône).

4.4.9 Étude sur la consommation d'eau potable des ménages

Démarche

Afin d'approfondir la compréhension de la consommation d'eau potable dans la région de Crans-Montana-Sierre, une enquête a été lancée en novembre 2011 en vue de mieux connaître la consommation à l'échelle des ménages. Un questionnaire électronique à remplir mensuellement par les habitants de la région a été créé. Le questionnaire consistait en sept questions :

- Nom et prénom ou pseudonyme
- Commune de résidence
- Nombre de personnes vivant dans le ménage
- Année de construction de l'immeuble ou de la maison
- Surface de la pelouse
- Date du relevé du compteur
- Mètres cubes indiqués par le compteur
- Observations sur la consommation en eau potable (cette question facultative concernait les usages inhabituels, comme par exemple le remplissage d'une piscine ou des pertes extraordinaires)

Par rapport à un questionnaire classique, c'est-à-dire distribué à la population et retiré après une période déterminée, un questionnaire en ligne permet la consultation des données pendant le déroulement de l'enquête afin de connaître la participation effective.

Pour assurer une bonne participation au sondage, chaque commune ayant des compteurs (donc toutes sauf Chermignon, Icogne et Montana) a reçu des posters A4 à afficher au pilier public et des dépliants à disposition des citoyens. Le fichier original du dépliant a également été mis à disposition des communes pour qu'elles puissent l'insérer dans leur bulletin communal. Le début de l'étude a été signalé à Danielle Emery Mayor, journaliste au journal local « Sixième dimension », qui a rédigé un article dans le numéro du 6 décembre 2011. Cet article a également été publié dans les réseaux sociaux dont le journal est membre.

Le 24 et 25 juillet 2012, afin d'augmenter la participation au sondage, 1400 prospectus supplémentaires ont été distribués dans la région. Une vingtaine de posters A3 ont été affichés au pilier public des communes, dans les commerces et dans les grands magasins (figure 4.17).

Cet effort supplémentaire n'a toutefois pas fait augmenter la participation à l'étude. Il faut en conclure que, malgré que Crans-Montana-Sierre soit une zone relativement sèche et que l'eau ici soit traditionnellement un sujet de débats, discussions et conven-



Fig. 4.17 – Les posters et les prospectus distribués.

tions, l'argument n'attire évidemment pas l'attention des citoyens. En fait, la participation à l'étude a été nettement inférieure à ce qui était espéré, avec une vingtaine de séries de données collectées à travers le site web du projet MontanAqua, dont seulement 6 d'une durée supérieure à 6 mois.

Résultats généraux

L'étude se base principalement sur les 6 séries de données suffisamment longues pour être analysées (figures 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 et 4.23), concernant la consommation d'eau potable d'une soixantaine de personnes à partir du mois de novembre 2011. Bien que statistiquement non représentatif, cette étude renforce l'hypothèse que l'irrigation des gazons joue un rôle prédominant en ce qui concerne le pic estival de consommation d'eau potable. En fait, la consommation d'eau potable par personne augmente plus sensiblement là où il y a un gazon à entretenir. La consommation mensuelle d'eau potable par personne varie d'une série de données à l'autre de manière plutôt significative. Les causes peuvent être multiples : l'état des conduites, la consommation des repas à la maison, l'habitude de prendre une douche plutôt qu'un bain, etc. Même basée sur un échantillon réduit, cette étude a permis d'établir que la consommation d'eau potable des ménages varie pendant toute l'année. En règle générale, la consommation d'eau potable par personne augmente avec l'augmentation de la température, comme observé pour la consommation d'eau potable des communes. Par contre, les autres pics de consommation d'eau potable sont engendrés par le comportement de chaque citoyen. Cette thématique mériterait d'être approfondie en suivant l'exemple de l'étude

autrichienne « *Wasserverbrauch und Wasserbedarf – Auswertung empirischer Daten zum Wasserverbrauch* » (BLFUW, 2012), basée sur la consommation d'eau potable de plus de 100 immeubles dans l'ensemble du pays. La récolte systématique des données a été faite ici en utilisant des compteurs qui ont enregistré la consommation d'eau potable des ménages choisis chaque 10 minutes sur l'ensemble de l'année 2011. Cette recherche pionnière démontre la volonté de l'Autriche de connaître dans le détail la consommation d'eau potable actuelle pour anticiper la demande future, même si pour l'instant le pays ne connaît pas de problèmes dans ce sens.

Résultats spécifiques

Le champ facultatif « Observations sur la consommation en eau potable » du questionnaire en ligne s'est avéré très instructif. Avec ces informations supplémentaires, les zones d'ombre qui restent sur l'origine des pics de consommation après l'analyse des données récoltées ont été comblées. Les trois séries de données suivantes ont été documentées minutieusement et représentent pourtant les cas les plus significatifs de cet étude.

Étude de cas 1 La première série de données (figure 4.18) fait référence à une maison bifamiliale habitée par 6 personnes. Construite avant 1990, elle se caractérise par un gazon de 200 m² avec un potager de 10 m² et quelques arbres fruitiers. La maison est habitée de manière stable pendant toute l'année. La consommation d'eau potable de ce ménage est marquée par un pic de consommation printanier évident. Le pic de consommation pendant les mois de mars, avril et mai a été causé par le remplacement d'une partie du gazon et l'arrosage abondant nécessaire après l'ensemencement. Pendant la même période, deux pommiers ont été plantés. Cette série de données met en évidence l'impact que l'arrosage peut avoir sur la consommation en eau potable

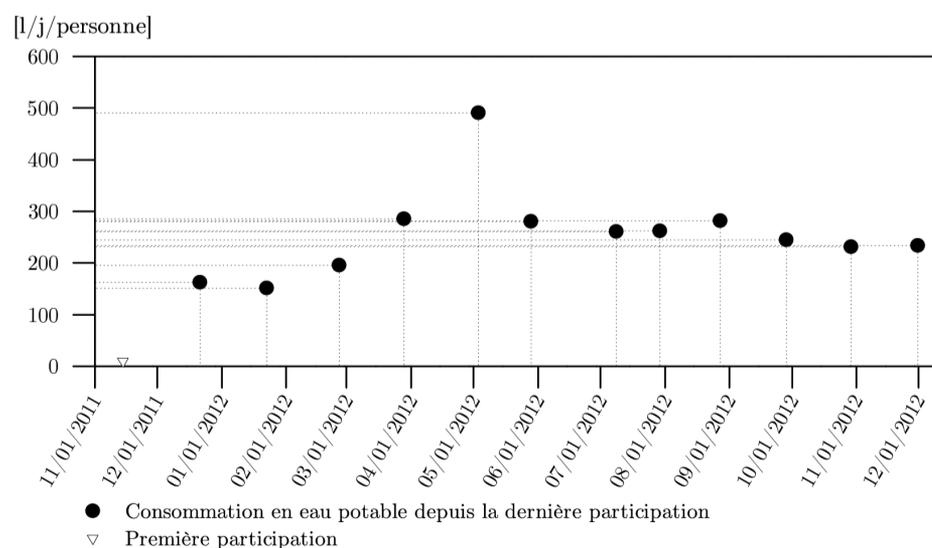


Fig. 4.18 – Étude sur la consommation en eau des ménages : étude de cas 1.

des ménages, qui peut facilement faire doubler la consommation : dans ce cas, 490 litres/personne/jour contre 280 litres/personne/jour au mois d'août.

Étude de cas 2 L'étude de cas 2 (figure 4.19) traite d'une maison unifamiliale construite avant 1990, caractérisée par un gazon qui n'est pas arrosé systématiquement et un jardin potager de dimensions modestes. Cette série de données se révèle très importante car elle décrit la consommation en eau potable d'une habitation familiale qui a une population variable entre 3 et 5 personnes (variation soigneusement notée). La consommation en eau potable de ce ménage est profondément influencée par la présence ou l'absence des résidents, facteur qui semble avoir déterminé, par exemple, le pic de consommation de février. La fourchette de consommation d'eau potable a comme extrêmes 148 litres/jour/personne durant le mois de décembre et 236 litres/jour/personne durant le mois de juillet.

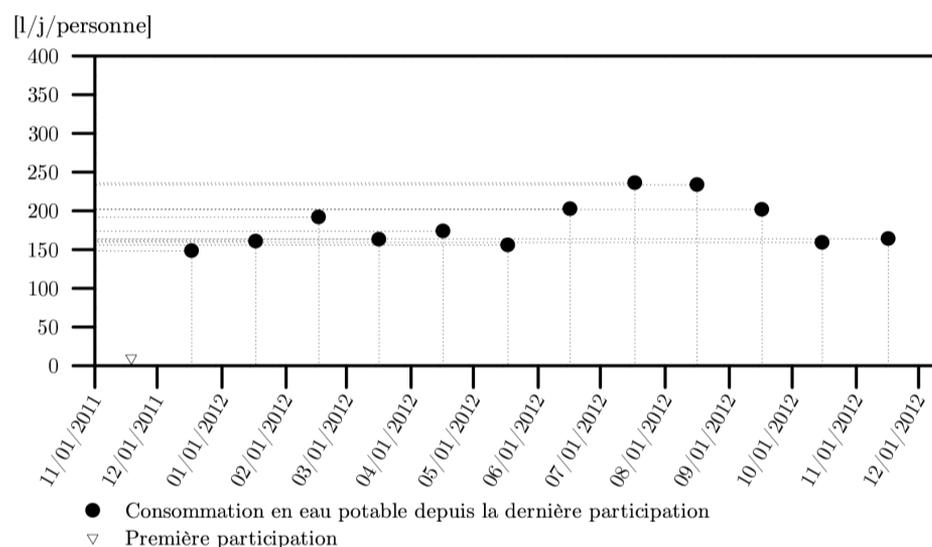


Fig. 4.19 – Étude sur la consommation en eau des ménages : étude de cas 2.

Étude de cas 3 Cette troisième série de données (figure 4.20) présente les données de l'immeuble le plus grand pris en considération par cette étude. Cet immeuble, construit avant 1990, est habité par 46 personnes, a un gazon minuscule et un bar (qui selon l'administrateur du bâtiment équivaut à 10.5 personnes). La fermeture estivale de ce dernier a pu être prise en compte grâce aux observations faites par le participant à l'étude. La consommation d'eau potable par personne varie très peu pendant toute l'année et elle passe d'environ 200 litres/personne/jour pendant l'hiver à un maximum de 216 litres/jour/personne pendant l'été.

Par contre, pendant la période des vacances estivale juillet-août, la consommation se réduit à 186 litres/personne/jour à cause de l'absence de certains locataires.

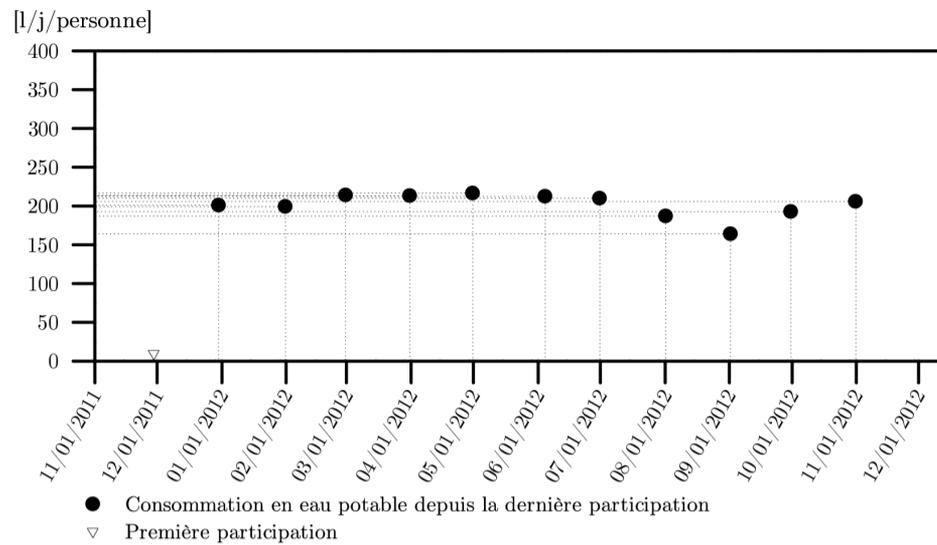


Fig. 4.20 – Étude sur la consommation en eau des ménages : étude de cas 3.

Étude de cas 4, 5 et 6 Ces cas d'étude se caractérisent par un nombre nettement inférieur d'observations faites de la part des participants à l'étude. Il s'agit d'une villa de trois personnes construite avant 1990 (figure 4.21) et de deux petits immeubles de 12 personnes (construit après 1990) et 19 personnes (construit avant 1990). La consommation d'eau potable de la villa semble être influencée par l'augmentation de la température moyenne; celle des deux immeubles (figures 4.22 et 4.23), par contre, reste plutôt stable entre 175 et 275 litres/personne/jour.

Étude de cas de courte durée À côté des séries de données de plus de six mois, l'étude a permis de récolter une demi-douzaine d'autres séries de données d'une longueur variant entre deux et trois mois. Ces séries ne peuvent pas donner des indications fiables sur la variation annuelle de la consommation à cause de leur durée limitée, mais elles peuvent cependant fournir d'autres informations d'une certaine importance. Par exemple, il semble que les constructions les plus récentes soient également celles qui consomment le moins d'eau; jusqu'à env. 75 litres/personne/jour pour une maison (construite après 2000) de 4 personnes à Veyras (où l'arrosage des gazons n'est pas fait avec l'eau potable) entre avril et mai 2012.

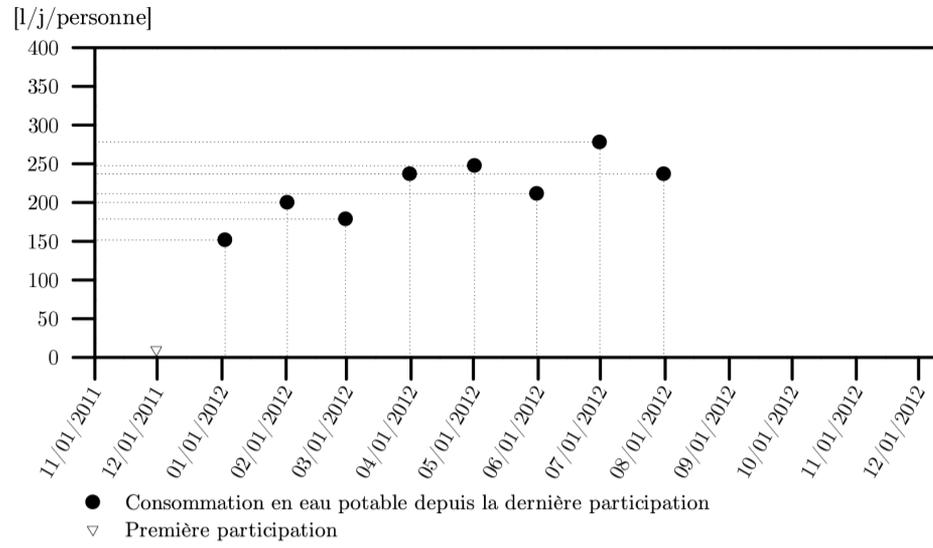


Fig. 4.21 – Étude sur la consommation en eau des ménages : études de cas 4.

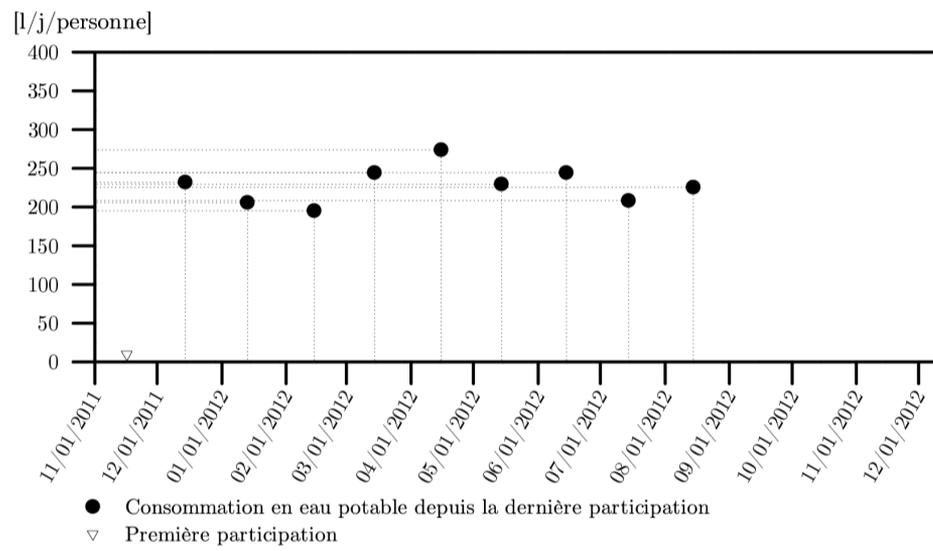


Fig. 4.22 – Étude sur la consommation en eau des ménages : études de cas 5.

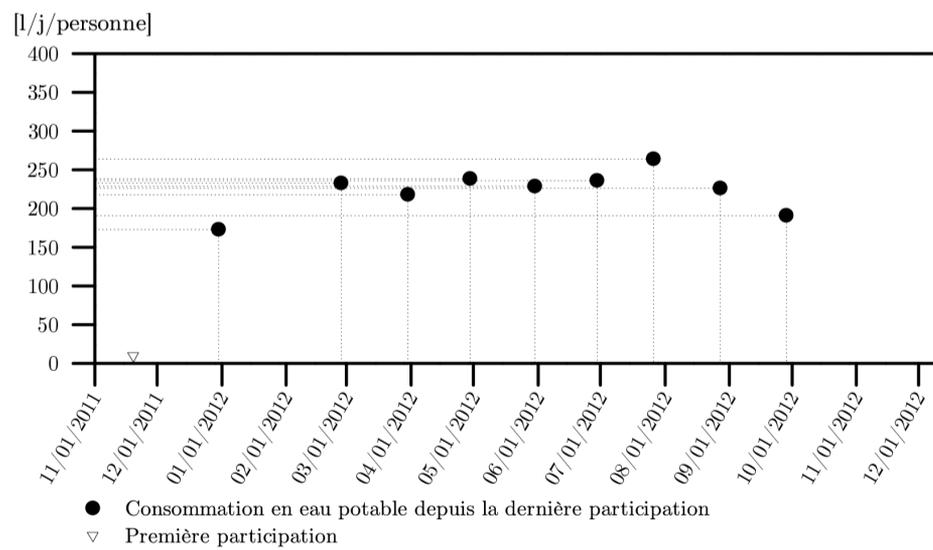


Fig. 4.23 – Étude sur la consommation en eau des ménages : études de cas 6.

4.4.10 Conclusions

La consommation d'eau potable en 2010 et 2011

Malgré les difficultés bureaucratiques et administratives qui ont impliqué rendez-vous, lettres et dialogues téléphoniques avec la plupart des présidents et des responsables techniques des communes, le processus d'acquisition des données a permis de faire la lumière sur la consommation en eau potable de la région de Crans-Montana-Sierre.

L'eau potable consommée mensuellement pendant l'année 2010 et 2011 est résumée dans la figure 4.24. Au total, ce sont 7.7 millions de m³ qui ont été distribués en 2010 et 8.2 millions de m³ en 2011, ce qui équivaut à une moyenne mensuelle de 644'000 m³ en 2010 et 684'000 m³ en 2011.

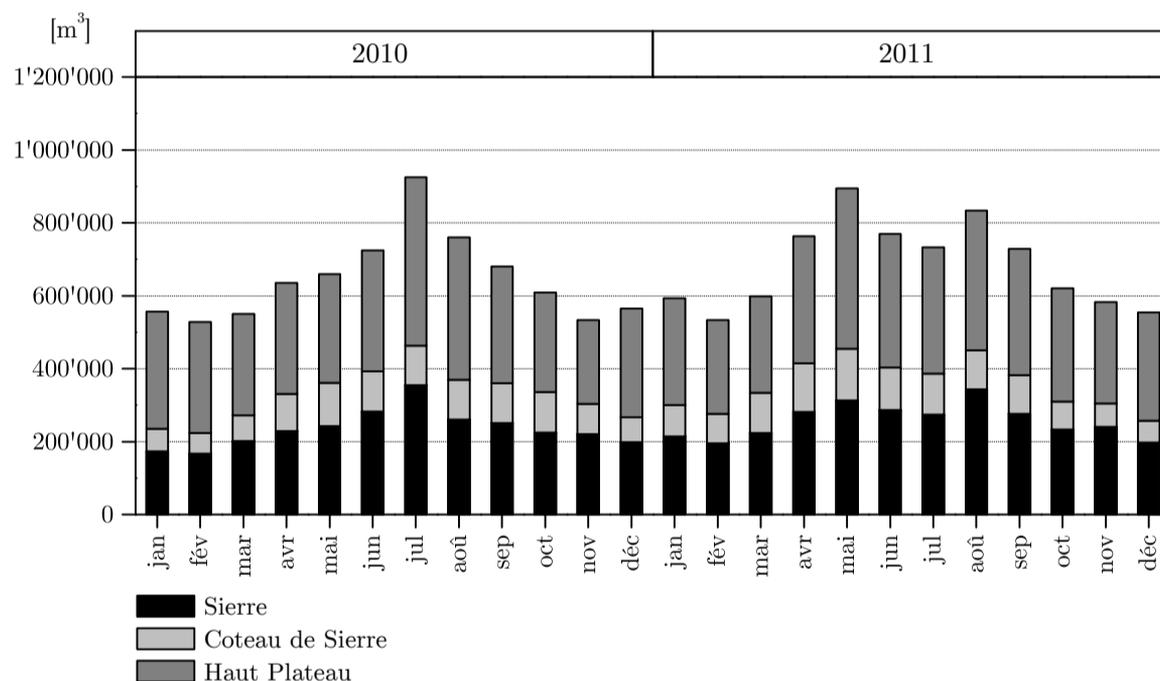


Fig. 4.24 – Consommation d'eau potable en 2010 et 2011

L'influence du climat

Dans les chapitres précédents, l'origine des pics de consommation a été analysée minutieusement commune par commune, ce qui a permis de mieux comprendre l'influence des activités humaines sur la consommation d'eau potable dans la région de Crans-Montana-Sierre. Il est ressorti que l'utilisation de l'eau potable à des fins d'arrosage influence fortement la consommation moyenne. En d'autres termes, les besoins estivaux sont plus importants surtout parce qu'une partie de l'eau est utilisée pour l'arrosage. Mais quelle est l'influence du climat sur les activités humaines et par conséquent sur

la consommation d'eau potable? Est-ce qu'il est possible de trouver une formule permettant d'estimer la consommation d'eau potable de la zone d'étude en partant de données météorologiques?

Pouvoir estimer la consommation en eau potable de la région de Crans-Montana-Sierre à partir de la température moyenne mensuelle permettra ensuite d'appliquer les scénarios climatiques et, par conséquent, de mieux comprendre l'impact de l'augmentation de la température sur la consommation d'eau potable. C'est pour cette raison que l'estimation de l'eau consommée par les résidents en 2010 et 2011 dans toute la région a été comparée avec la température moyenne mensuelle enregistrée à la station météorologique de Montana (figure 4.25).

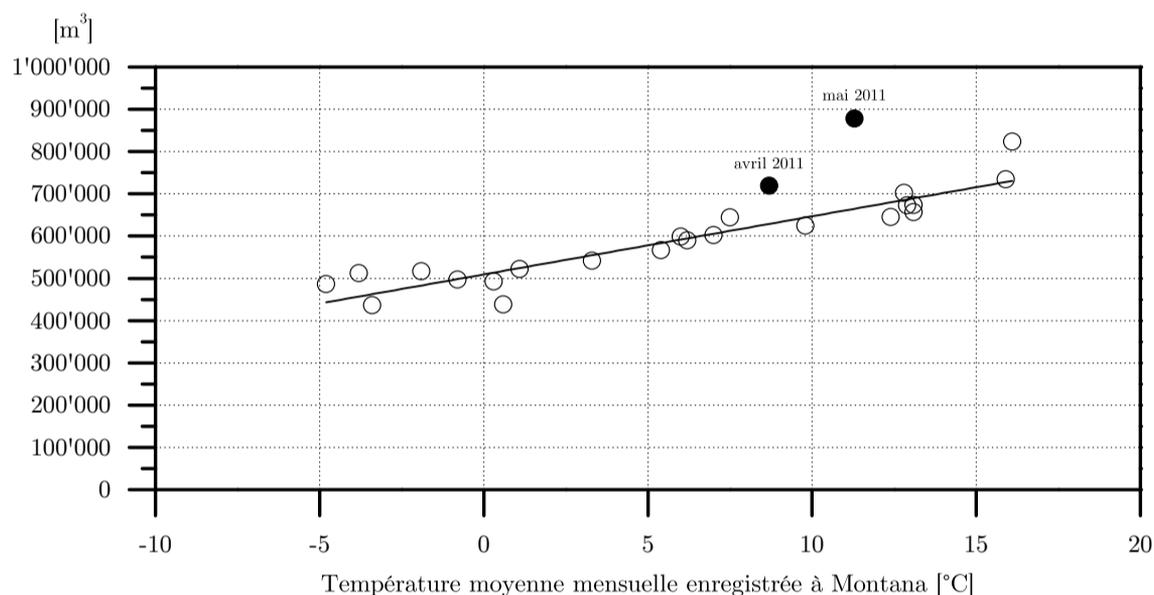


Fig. 4.25 – Consommation d'eau potable des résidents et température.

La droite de régression est décrite par l'équation 4.2,

$$y = 13'757x + 509'271 \quad (4.2)$$

où y représente la consommation d'eau potable des résidents et x la température moyenne mensuelle à Montana. Les mois d'avril et mai 2011 n'ont pas été pris en considération à cause de la sécheresse qui les a caractérisés, qui a engendré une consommation beaucoup plus importante que d'habitude. En appliquant l'équation 4.2 à ces deux mois on obtient une estimation de consommation en eau potable nettement inférieure à la consommation réellement enregistrée.

La quantité extrêmement réduite de données à notre disposition limite fortement la possibilité de poser des hypothèses solides à propos de la consommation d'eau potable pendant les périodes de sécheresse. De ce point de vue, avoir à disposition les don-

nées de consommation d'eau potable de l'année 2003, caractérisée une forte sécheresse estivale, aurait pu contribuer à mieux comprendre les effets du manque de précipitations sur la consommation d'eau potable de la zone d'étude. Puisque ces données n'existent pas, pour avoir une estimation plus précise de l'influence de la sécheresse sur la consommation d'eau potable régionale, il faut attendre que le phénomène se reproduise. Dans l'état actuel des connaissances, il semble évident que l'influence d'une sécheresse devient plus importante au fur et à mesure que la température moyenne mensuelle augmente. Cela signifie qu'une sécheresse estivale comme celle de 2003 aurait dû se traduire par un pic de consommation estivale d'eau potable plus important par rapport à celui engendré par la sécheresse printanière de 2011, qui a été de 300'000 m³ (+ 23%). En conclusion, à l'exception des période de sécheresse, la consommation d'eau potable de la région de Crans-Montana-Sierre peut être estimée plutôt précisément en se basant sur la température moyenne mensuelle enregistrée à Montana.

4.5 L'irrigation

4.5.1 Mise en place d'un réseau de mesures sur les bisses

Afin de connaître les quantités d'eau amenée aux cultures par les bisses, un réseau de mesure a été installé sur les principaux canaux d'irrigation de la région. Les stations de mesure ont été installées le plus proche possible des cultures, c'est-à-dire avant le départ du premier bisse secondaire (tableau 4.12).

Station de mesure	Coordonnées suisses
Grand Bisse de Lens 1 (station à l'amont)	600'103/127'852
Grand Bisse de Lens 2 (station à l'aval)	598'726/123'788
Bisse du Sillonin	599'837/127'182
Bisse du Tsittoret	607'638/133'146
Bisse Neuf	608'562/130'936
Bisse du Marais	609'175/128'475
Répartiteur des Planigettes (station à l'amont)	608'994/129'807
Répartiteur des Planigettes (station à l'aval)	609'042/129'760

Tab. 4.12 – Coordonnées des stations du réseau de mesures sur les bisses.

Carte des stations du réseau de mesures sur les bisses à l'annexe 14.

Les stations du réseau de mesures sur les bisses (annexe 14) ont été équipées avec des sondes du modèle HyMADD produites par MADD Technologies⁴¹. Ces appareils fonctionnent avec un microcontrôleur qui effectue, pour chaque acquisition, une série de mesures de pression et de température (tableau 4.13), qui sont ensuite enregistrées en mémoire non volatile (MADD Technologies, 2011).

Date et heure	Pression [mH ₂ O]	Température [C]
2010.06.16 15:10:00	0.293	10.97
2010.06.16 15:20:00	0.298	10.93
2010.06.16 15:30:00	0.292	10.95

Tab. 4.13 – Exemple de données enregistrées par le réseau de mesures sur les bisses.

Si la pression de la colonne d'eau enregistrée est de 0.293 m H₂O, la hauteur de la lame d'eau sera de 0.293 m. Toutefois, chaque sonde a été calibrée en effectuant plusieurs mesures de la hauteur de l'eau à la main. Cette opération a été rendue nécessaire en raison de l'installation d'abris en aluminium, qui influencent négativement la hauteur de la lame d'eau de l'ordre de quelques mm. Les abris en aluminium ont été installés là où la charge sédimentaire pouvait représenter un danger pour l'intégrité des sondes, problème plus fréquent dans les bisses du bassin versant de la Raspille. Ces protections ont permis aux sondes de résister, avec des dégâts mineurs, lors de la crue des 10 et 11 octobre 2011 (OFEV, 2011a).

41. Le site web de MADD Technologies est consultable à l'adresse suivante : <http://www.jdc.ch>

4.5.2 La méthode des surfaces partielles

À cause de leurs caractéristiques, les parois et le fond des bisses influencent sensiblement l'écoulement de l'eau. Les matériaux utilisés pour construire les bisses abaissent la vitesse de l'eau près des bords et sur le fond du chenal (annexe 14). Ce phénomène est dû à la rugosité des matériaux et il est particulièrement important dans les chenaux à débit contenu (Bollrich, 2000). Pour prendre en compte l'importance de la rugosité, nous avons utilisé la méthode hydrologique des surfaces partielles. Cette méthode prend en compte la géométrie du chenal et le matériel dont il est constitué (Bezzola, 2008). Exprimée par l'équation 4.3, la méthode des surfaces partielles permet de calculer le débit d'un cours d'eau à partir de l'estimation du rayon hydraulique R_S et de la hauteur de la lame d'eau P_S de la surface de la partie centrale de la coupe transversale du chenal A_S (Bezzola, 2008).

$$A_S = R_S P_S \quad (4.3)$$

L'estimation du rayon hydraulique de la partie centrale de la coupe transversale du chenal R_S est ensuite introduite dans l'équation 4.4, qui permet d'obtenir la vitesse de l'eau au centre de l'écoulement.

$$U_{mS} = 2.5 \ln \frac{a R_S}{2 d_{90}} \sqrt{g R_S J} \quad (4.4)$$

U_{mS} est la vitesse au centre du chenal, a est une constante de valeur 14 (utilisée pour des profils à diamètre réduit), d_{90} représente le diamètre des grains, g la force d'attraction gravitationnelle et J correspond à $\tan \alpha$, où α est la pente du fond du chenal (Bezzola, 2008). A partir de cette équation, il est possible de calculer la vitesse d'écoulement à l'extérieur du rayon hydraulique U_{mW} , c'est-à-dire la vitesse de l'eau près des bords (équation 4.5), qui est toujours plus faible que la vitesse au centre du chenal ($U_{mS} > U_{mW}$). Afin de calculer U_{mW} , il faut également introduire dans l'équation A , la surface de la partie externe de la coupe transversale du chenal.

$$U_{mW} = \frac{U_{mS}}{A - A_S} \left(\frac{A}{1.05} - A_S \right) \quad (4.5)$$

Une autre étape fondamentale de ce processus est l'attribution d'un coefficient de rugosité K_{St} aux matériaux en contact avec l'eau, qui a été réalisée à l'aide des valeurs proposées par Bollrich (2000) (tableau 4.14).

La valeur choisie K_{St} est introduite dans l'équation 4.6, ce qui permet de quantifier l'influence de la rugosité des parois du chenal R_W sur l'écoulement et d'obtenir enfin le débit.

$$R_W = \left(\frac{U_{mW}}{K_{St} J^{1/2}} \right)^{3/2} \quad (4.6)$$

Matériel	k par mm
Béton lisse	0.8
Mur à sec fin	3.0
Mur à sec grossier	20.0
Galets fins, sable	30.0
Galets moyens	50.0

Tab. 4.14 – Coefficients de rugosité (k) des matériaux de construction des bisses.

Source : Bollrich, 2000.

Les relations hauteur-débit obtenues par la méthode des surfaces partielles devraient être validées à l'aide de jaugeages au sel. Malheureusement, le régime contrôlé des bisses se différencie d'un régime naturel par une variation soudaine du débit provoquée par l'ouverture et/ou à la fermeture de la vanne de la prise d'eau. Par conséquent, il n'est pas possible de faire une campagne de jaugeages au sel satisfaisante, car pour construire une courbe de tarage il faut effectuer plusieurs injections de sel à différentes hauteurs de la lame d'eau. Les jaugeages effectués n'ont donc pas permis d'obtenir une courbe de tarage complète pour chaque bisse, mais seulement la validation du débit pour certaines hauteurs déterminées.

La conversion des débits en volumes a été faite en exploitant l'équivalence suivante : $1 \text{ l/s} = 3.6 \text{ m}^3/\text{h}$. La matrice résultante, avec les données enregistrées chaque 10 minutes, a été ensuite traitée au moyen du logiciel Matlab afin d'obtenir des valeurs journalières. Le script utilisé, mis à disposition par Natan Micheletti, doctorant à l'IGD, est consultable à l'annexe 15.

4.5.3 L'eau amenée par les bisses en 2010 et 2011

Grâce au réseau de mesures, le débit des bisses de la région est finalement connu dans le détail. Malheureusement, la quantité d'eau d'irrigation amenée sur le Haut-Plateau par le tunnel du Mont Lachaux, infrastructure qui a remplacé le Bisse du Rho en 1946 (Reynard, 2000a), reste inconnue. L'estimation de l'eau d'irrigation amenée à travers le Mont Lachaux se base sur le débit du bisse du Rho en 1925 (Commune de Lens, 2012) : « Le 25 juillet 1925, le bisse du Rho étant mis en charge, on a mesuré un débit de 120 litres/seconde à la sortie du tunnel inférieur d'Huiton. Par les jours chauds, il atteindra 400 litres/seconde ». Ces données, comparées avec celles du Grand Bisse de Lens, suggèrent que chaque saison d'irrigation le Mont Lachaux amène sur le Haut-Plateau entre 1 et 1.5 millions de m³ d'eau. L'estimation de la répartition mensuelle du débit du Mont Lachaux a été faite sur la base du débit mensuel des autres bisses du bassin versant de la Liène (le Grand Bisse de Lens et le Sillonin). Une analyse attentive de la saison d'irrigation 2010 (figure 4.26) (du début avril à la fin septembre) révèle un besoin en eau d'irrigation accru pendant les mois de juillet et août.

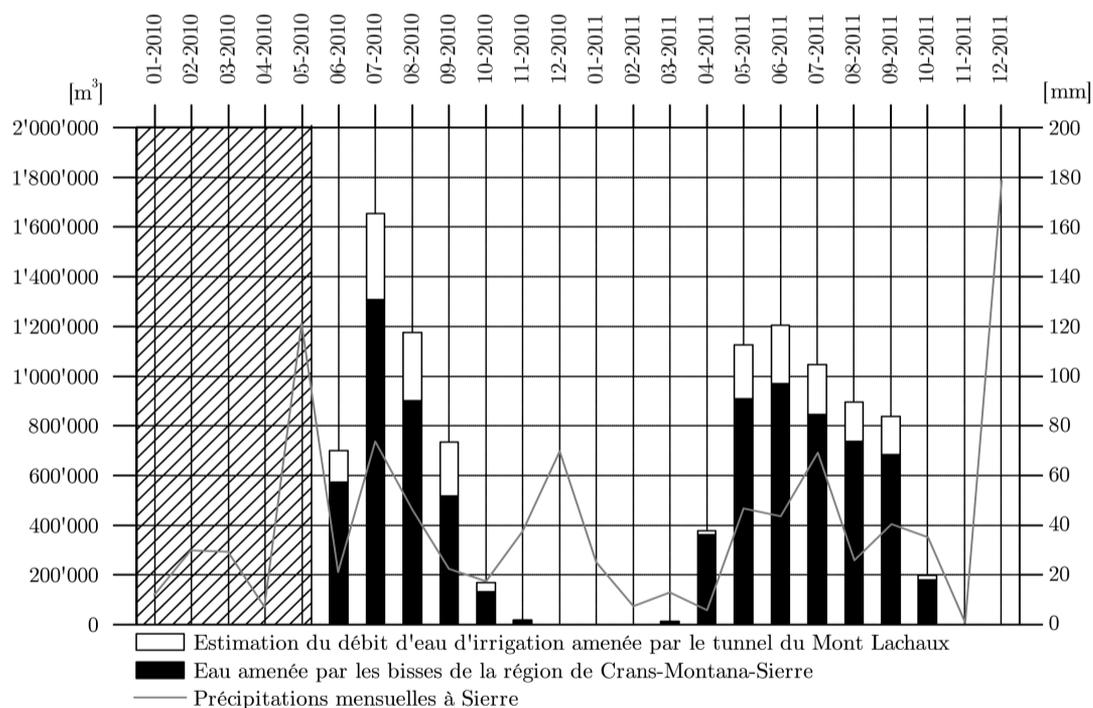


Fig. 4.26 – Volume d'eau transporté en 2010 et 2011 par les bisses de la région.

Estimation de l'eau amenée annuellement par le Mont Lachaux : 1'000'000 m³.

Avant de passer à l'analyse de la saison d'irrigation 2011, un examen des précipitations de la même période pour les années 2010 et 2011 s'impose. Ce qui frappe le plus est la différence de précipitations du mois de mai. En effet, si pendant le mois de mai 2010 les précipitations ont dépassé 120 mm, l'année suivante, elles n'ont pas atteint 50 mm. Une telle variation a porté à une augmentation importante des besoins en eau

d'irrigation, qui a été anticipé par rapport à l'année 2010. Ce décalage se traduit par un pic de consommation additionnel situé en mai.

Bien que seules deux saisons de mesure soient à disposition, on peut conclure que la répartition mensuelle des eaux dérivées par les bisses dépend fortement de la situation météorologique.

Dans les prochains sous-chapitres, les saisons d'irrigation 2010 et 2011 seront traitées dans le détail, premièrement à l'échelle mensuelle et dans un deuxième temps à l'échelle journalière.

Saison d'irrigation 2010

Bien qu'incomplètes, les données récoltées pendant la saison d'irrigation 2010 (tableau 4.15) permettent de se faire une idée relativement précise de la quantité d'eau transportée par les bisses dans la région de Crans-Montana-Sierre.

Mois	Grand Bisse de Lens ^a	Bisse du Sillonin ^b	Bisse Neuf ^c	Bisse du Marais ^d	Répartiteur des Planigettes ^e	Bisse du Tsittoret ^f	Total
	m ³						
mar	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
avr	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
mai	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
jun	144'197	91'158	152'460	0	104'962	79'780	572'558
jul	387'277	246'852	295'214	9	141'163	238'136	1'308'651
août	306'038	199'257	180'239	0	83'229	131'955	900'719
sep	226'377	169'668	106'361	24	15'285	n.d.*	517'714
oct	20'006	44'835	68'208	104	72	n.d.*	133'225
Total	1'083'894	751'771	802'076	138	344'710	449'872	3'432'867

Tab. 4.15 – Débit des principaux bisses de la région de Crans-Montana-Sierre en 2010.

* infiltration d'eau dans le datalogger et panne technique de la sonde.

^a Les mesures ont commencé le 16 juin et se sont terminées le 4 octobre; ^b Les mesures ont commencé le 16 juin et se sont terminées le 8 octobre; ^c Les mesures ont commencé le 16 juin; ^d Les mesures ont commencé le 16 juin; ^e Les mesures ont commencé le 12 juin; ^f Les mesures ont commencé le 15 juin.

Pendant la saison d'irrigation 2010, les bisses de la zone d'étude ont transporté environ 5 millions de m³ d'eau. Ce chiffre a été calculé en tenant compte du manque de données dans la première partie de la saison d'irrigation (entre mars et mi-juin) et de l'estimation de la quantité d'eau d'irrigation amenée sur le Haut-Plateau par le tunnel du Mont Lachaux (1 million de m³).

Bisses du bassin versant de la Liène Le débit du Grand Bisse de Lens connaît une augmentation sensible (env. 5'000 m³/j) après le 12 juillet 2010 pour ensuite retourner au début du mois d'août au débit précédent d'environ 10'000 m³/j. L'écoulement

reste constant jusqu'à la fin du mois d'août (28 août 2010) pour ensuite diminuer soudainement d'environ 300 m³/j. Le débit du bisse du Sillonin reste toujours inférieur à celui du Grand Bisse de Lens; la différence entre les deux bisses est de 2'500 - 3'000 m³/j pendant la majeure partie de la saison d'irrigation.

Bisses du bassin versant de la Raspille Le débit du bisse du Tsittoret augmente jusqu'à environ 22'500 m³/j pendant l'été et est sujet à des variations à court terme assez importantes. Pour des raisons techniques, les données enregistrées par la sonde entre le 19 août 2010 et la fin de la saison d'irrigation n'ont pas pu être récupérées. La reconstruction des données entre le 19 et le 31 août 2010 se base sur celle de l'année 2011. Le Bisse Neuf connaît un débit relativement constant d'environ 6'000 m³/j jusqu'au 21 juillet 2010, qui ensuite diminue peu à peu jusqu'à la fin de la saison d'irrigation. La quantité d'eau que le répartiteur des Planigettes délivre aux cultures varie sensiblement, surtout pendant la période estivale. Entre la mi-juillet et la mi-août, le débit de ce bisse est concerné par des pics très importants dus aux besoins des agriculteurs. Utilisé sporadiquement, le bisse du Marais a passé la majeure partie de la saison d'irrigation 2010 à sec ou avec un débit extrêmement faible (maximum de 100 m³/j le 5 octobre 2010). Son utilisation a été relativement plus fréquente à partir du début de septembre.

Saison d'irrigation 2011

Le commentaire des données de la saison d'irrigation 2011 (tableau 4.16) vise à mettre l'accent sur les différences avec la saison d'irrigation de l'année précédente et sur le début de l'irrigation, non disponible pour l'année précédente. Pendant la saison d'irrigation 2011, les bisses de la zone d'étude ont transporté environ 6 millions de m³ d'eau.

Ce chiffre a été calculé en tenant compte du manque de données pour le répartiteur des Planigettes (à cause de l'obstruction de la station à l'aval) et de l'estimation de la quantité d'eau d'irrigation amenée sur le Haut-Plateau par le tunnel du Mont Lachaux (1 million de m³).

Bisses du bassin versant de la Liène Le Grand Bisse de Lens est concerné par un pic d'utilisation pendant le mois de mai, très probablement dû au manque de précipitations dans la région. La régularité distingue encore le débit du bisse du Sillonin, même si les variations, qui restent contenues, sont un peu plus fréquentes pendant les mois de mai, juin et juillet.

Mois	Grand Bisse de Lens ^a	Bisse du Sillonin ^b	Bisse Neuf ^c	Bisse du Marais ^d	Répartiteur des Planigettes ^e	Bisse du Tsittoret ^f	Total
m ³							
mar	n.d.	0	11'916	669	415	n.d.	13'001
avr	n.d.	26'838	91'299	63	209'262	35'553	336'177
mai	286'426	113'578	236'914	0	178'810	93'593	509'318
jun	311'731	119'411	313'908	0	n.d. *	223'851	537'759
jul	265'197	114'213	277'492	0	n.d. *	188'003	465'495
août	209'768	89'701	292'614	0	n.d. *	145'290	437'904
sep	201'451	83'980	272'861	0	n.d. *	125'882	398'743
oct	29'354	19'329	96'787	0	n.d. *	33'402	130'188
Total	1'303'926	567'050	1'593'791	732	388'488	845'573	4'699'560

Tab. 4.16 – Débit des principaux bisses de la région de Crans-Montana-Sierre en 2011.

* obstruction de la station à l'aval du répartiteur.

^a Les mesures ont commencé le 3 mai et se sont terminées le 5 octobre; ^b Les mesures ont commencé le 27 mars et se sont terminées le 7 octobre; ^c Les mesures ont commencé le 28 mars et se sont terminées le 5 octobre; ^d Les mesures ont commencé le 27 mars et se sont terminées le 7 octobre; ^e Les mesures ont commencé le 27 mars; ^f Les mesures ont commencé le 18 avril et se sont terminées le 7 octobre.

Bisses du bassin versant de la Raspille Le débit du bisse du Tsittoret connaît des pics importants en avril (env. 4'000 m³/j) et en juin (env. 12'000 m³/j). Entre mi-mai et mi-août son débit reste plus ou moins constant (env. 6'000 m³/j). Après cette période, le débit de ce bisse baisse et connaît également des variations très importantes. Au Bisse Neuf, en 2011, en collaboration avec le bureau Idéalp, la station de mesures a été déplacée avant la vanne qui se trouve au début du bisse. Cette sonde a remplacé la sonde posée en 2010 et a permis d'améliorer la précision de notre mesure. Le débit du Bisse Neuf est d'environ 4'000 m³/j pendant la période précédant la mi-mai et d'environ 10'000 m³/j pour toute la période comprise entre la mi-mai et le début octobre.

Les données sur le débit, très irrégulier, du répartiteur des Planigettes, s'arrêtent malheureusement le 31 mai 2011 à cause de l'obstruction du bisse près de la station de mesure située à l'aval du répartiteur (annexe 16). La station de mesure, légèrement endommagée par les 50 cm de sédiments qui se sont déposés dans son lit, n'a donc pas pu fonctionner correctement. A cause de cette masse de sédiments, l'eau sortant du répartiteur a été déviée et ne coule plus que partiellement dans le bisse.

La sonde posée dans le bisse du Marais n'a presque pas touché d'eau en 2011 (seulement trois données de débit enregistrées entre le 29 et le 31 mars). En fait, le secteur du vignoble que ce bisse desservait est maintenant arrosé avec de l'eau potable.

Discussion

L'estimation de la quantité d'eau amenée par les bisses pose les bases pour comprendre le besoin en eau des cultures dans la région de Crans-Montana-Sierre à l'échelle temporelle et spatiale. Les variations de débit des bisses du bassin versant de la Liène se produisent plus au moins aux mêmes moments, ce qui n'est pas le cas pour les bisses du bassin versant de la Raspille. Les variations du débit des bisses dépendent surtout du besoin en eau des cultures, ce qui permet de poser l'hypothèse que les besoins de la zone desservie par les bisses du bassin versant de la Liène seraient plus uniformes par rapport à ceux de la zone desservie par les bisses du bassin versant de la Raspille.

Mois	Eau amenée par les bisses [m ³]	
	Bassin versant de la Liène	Bassin versant de la Raspille
mai	617'277 (55%)	509'318 (45%)
jun	667'823 (55%)	537'759 (45%)
jul	580'403 (55%)	465'495 (45%)
aoû	457'952 (51%)	437'904 (49%)
sep	437'535 (52%)	398'743 (48%)

Tab. 4.17 – Comparaison entre le débit des bisses des bassins versants de la Liène et de la Raspille entre mai et septembre 2011.

La comparaison entre la quantité d'eau amenée dans la région de Crans-Montana-Sierre par les bisses du bassin versant de la Liène et de la Raspille est resumée dans le tableau 4.17. Ce tableau ne prend en considération que la saison d'irrigation 2011 (période entre mai et septembre), la saison d'irrigation 2010 étant incomplète (installation du réseau de mesure en juin). En considérant le fait que la station située à l'aval du répartiteur des Planigettes a fonctionné jusqu'au 31 mai 2011, les quantités d'eau prélevées dans le bassin versant de la Liène et de la Raspille sont très proches, avec une différence qui est toujours inférieure à 10%. Ce résultat permet d'affirmer que les deux bassins versant sont utilisés, en ce qui concerne l'eau d'irrigation, environ de la même manière pendant la période entre mai et septembre. Toutefois, la quantité d'eau qui coule dans les bisses ne correspond pas forcément à la quantité d'eau utilisée par l'homme pour l'irrigation. En fait, seule une partie de l'eau prélevée dans la Liène et dans la Raspille est utilisées immédiatement ; le reste de l'eau peut être stocké dans des réservoirs ou encore poursuivre sans interruption jusqu'à l'aval. Le chapitre 4.5.5 s'occupera, à l'aide du module agronomique MABIA de WEAP, de calculer l'eau nécessaire aux cultures pour éviter le stress hydrique, de manière à obtenir non seulement une estimation de l'eau amenée par les bisses mais également une évaluation de l'eau qui est réellement nécessaire aux cultures de la région.

4.5.4 Étude sur l'infiltration de l'eau dans le sol

Le Grand bisse de Lens a été équipé de deux stations de mesures situées à environ 600 mètres de distance, afin d'étudier l'infiltration de l'eau dans le sol. Pendant la période de mesure, la différence de débit enregistrée dans les deux stations a toujours été inférieure à la marge d'erreur des instruments de mesure. Pour ce tronçon, qui se situe dans la forêt située au nord-ouest d'Icogne, on peut conclure que l'infiltration d'eau dans le sol est très probablement négligeable.

4.5.5 Essai de quantification de l'irrigation nécessaire à éviter le stress hydrique

Principes

La complexité du réseau d'irrigation secondaire (annexe 17), qui prélève l'eau directement dans les bisses principaux de la région, est telle que la quantification de l'eau d'irrigation utilisée pour satisfaire les besoins en eau des cultures ne peut pas être faite de manière traditionnelle (c'est-à-dire avec l'installation d'un réseau de mesure). Il s'avère donc nécessaire d'investiguer, à l'aide d'un modèle agronomique, les nombreuses relations existant entre sol, végétation et climat.

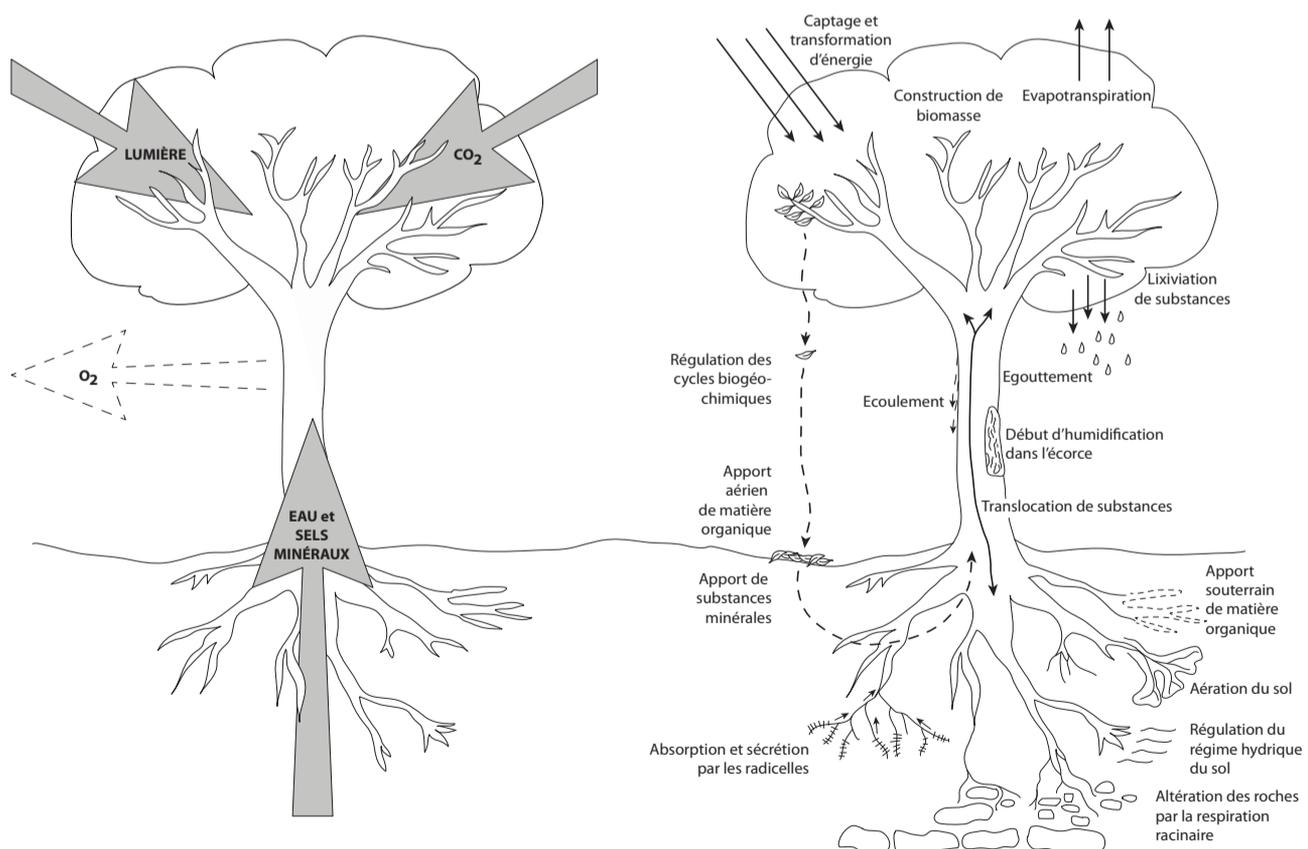


Fig. 4.27 – Photosynthèse et relations entre le sol et les plantes.

Source : Gobat et al., 2010 (digitalisée et modifiée).

Cette démarche permettra également de calculer la quantité d'eau qui a été nécessaire pour irriguer les cultures de la région de Crans-Montana-Sierre dans le passé. Il faut remarquer que même si ce genre de modèle envisage de reproduire la nature, il reste tout de même une interprétation simplifiée de la réalité, ne permettant pas de quantifier l'ensemble des processus existant entre la végétation et l'environnement (figure 4.27). La méthode choisie pour la quantification de l'irrigation nécessaire aux cultures est la méthode MABIA, qui se présente sous la forme d'un module intégré dans le modèle WEAP (annexe 18) et développé à l'Institut National Agronomique de Tunisie par Jabloun et Sahli (2012). Cette méthode permet d'estimer le besoin en eau d'irrigation des cultures à partir des surfaces cultivées, en se basant principalement sur le K_c , un coefficient qui intègre les caractéristiques des cultures et les effets de l'évaporation de l'eau contenue dans le sol. MABIA utilise la démarche innovatrice « Dual K_c », qui prévoit que la valeur du coefficient de culture (K_c) est divisée par un coefficient de culture de base (K_{cb}) et une composante distincte (K_e), représentant l'évaporation moyenne de la surface du sol (SEI, 2011)⁴².

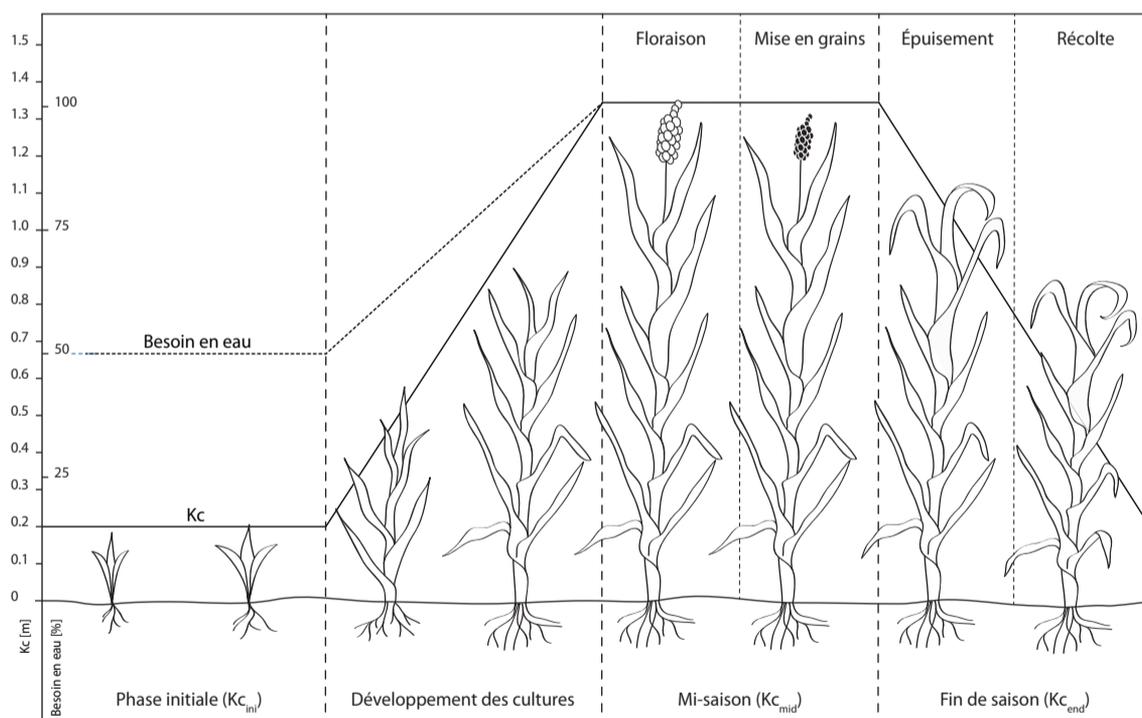


Fig. 4.28 – Le besoin en eau des cultures et le K_c .

Source : Brouwer et Heibloem, 2001 (digitalisée et modifiée).

Le besoin en eau des cultures se compose de la transpiration des plantes, de l'évaporation de l'eau contenue dans le sol et de la surface occupée par la plante (Brouwer

42. Des informations supplémentaires sur les algorithmes utilisés par MABIA sont disponibles sur le site web du Stockholm Environment Institute, consultable à l'adresse : <http://www.weap21.org>

et Heibloem, 2001). Dans la phase initiale (figure 4.28), l'évaporation est plus importante que la transpiration (Brouwer et Heibloem, 2001). Par contre, une fois que le développement est atteint, la transpiration devient plus importante (Brouwer et Heibloem, 2001). La variation et l'importance de l'évaporation de l'eau contenue dans le sol justifient donc le choix des concepteurs de MABIA de répartir le K_c entre le coefficient de culture de base (K_{cb}) et l'évaporation du sol (K_e). Pendant la phase initiale du développement, le besoin en eau des cultures est estimé à 50% de la nécessité en eau au début de la mi-saison, lorsque les plantes sont entièrement développées (Brouwer et Heibloem, 2001). L'hypothèse de base de ce chapitre est que toutes les cultures appartenant à la même typologie sont irriguées de manière homogène. Poser cette hypothèse s'est avéré nécessaire à cause de l'impossibilité de contrôler l'irrigation de chaque parcelle de la région.

Ajustement structurel de WEAP pour l'échelle régionale

Les caractéristiques des cultures décrites jusqu'ici (figure 4.29) ont porté à la création de 211 zones cultivées. Chacune de ces zones est divisée selon le type de sol, la commune et la tranche d'altitude (chaque 100 m).

Jusqu'à présent, le modèle WEAP a été appliqué à des surfaces bien plus grandes que la région d'étude du projet MontanAqua, comme de grands bassins hydrographiques (Mounir et al. 2011) ou un pays comme le Bénin (Höllermann et al. 2010), ce qui exige un ajustement structurel du modèle. En fait, la structure du modèle réalisé pour la région de Crans-Montana-Sierre est constituée de 211 « nœuds principaux », ce qui représente à peu près les nœuds structurels présents dans l'étude sur l'entier du Bénin, qui est plus de 2000 fois plus vaste (Höllermann, et al. 2010). Dans le modèle WEAP conçu pour la région de Crans-Montana-Sierre, les nœuds structurels appelés « catchments », qui normalement équivalent aux bassins versants, sont utilisés à une micro-échelle (dans l'ordre de milliers de m^2) et peuvent être considérés comme des nœuds exigeants de l'eau pour les surfaces cultivées. Afin d'éviter toute confusion possible, ces nœuds seront dorénavant appelés « catchments », terme anglais qui représente au sens large le captage de l'eau.

Afin de permettre au lecteur de comprendre dans le détail la démarche qui a porté à la modélisation du besoin en eau de la région de Crans-Montana-Sierre, les prochains sous-chapitres visent à illustrer les données les plus importantes utilisées par MABIA, en mettant l'accent sur le processus qui a permis de les obtenir.

Typologie et caractéristiques des cultures

Les types de surfaces agricoles de la région de Crans-Montana-Sierre sont au nombre de trois : les vignobles, les prairies et les vergers.

- La vigne (*Vitis Vinifera*) est un arbuste grimpant (Lauber et Wagner, 2009) cultivé en de nombreux cépages au-dessous de 800 mètres d'altitude et qui est arrosée de manière systématique (aspersion ou goutte-à-goutte) dans la majeure partie de la région.
- Les prairies (souvent irriguées par aspersion et/ou fertilisées) sont composées principalement de graminées et de plantes herbacées, mais des arbustes peuvent également être présents (Dietl et al., 1991).
- Les vergers de la région sont souvent associés à la prairie, et permettent son développement entre les arbres.

Les cultures de la région de Crans-Montana-Sierre ont été cartographiées par Marco Niklaus, étudiant de Master à l'Université de Berne et par Emmanuel Rey, doctorant à l'Université de Berne. En ce qui concerne les prairies, seules celles qui sont irriguées ont été prises en compte. Malheureusement, les surfaces occupées par les vergers sur le territoire de la commune de St-Léonard n'ont pas été cartographiées, ce qui ne permet pas la modélisation du besoin en eau de ces dernières.

Bien que la librairie de cultures comprise dans MABIA soit très fournie, la création de nouvelles catégories de culture s'est révélée nécessaire. En se basant sur les valeurs de la FAO pour les cultures les plus semblables à celles de la région de Crans-Montana-Sierre et en demandant successivement la confirmation des valeurs obtenues aux collaborateurs des stations de recherche Agroscope, nous avons pu obtenir et utiliser pour la modélisation, les données suivantes (tableau 4.18) :

Le tableau 4.18 contient également deux importants facteurs qui pour l'instant n'ont pas été expliqués dans le détail :

- Le facteur d'épuisement représente la fraction d'eau disponible totale qu'une culture peut extraire de la zone racinaire sans souffrir de stress hydrique (Jabloun et Sahli, 2012).
- Le coefficient de réponse du rendement (K_y) correspond à la relation linéaire entre le rendement relatif (Y_a / Y_{max}) et l'évapotranspiration relative (ET_a / ET_{max}) (FAO, 1987). Les prairies et les vergers n'ont pas de valeurs K_y ; donc pour ces cultures $ET_a = ET_{max}$ et $Y_a = Y_{max}$.

Après en avoir discuté avec les experts d'Agroscope, les valeurs utilisées pour ces deux facteurs restent celles fournies par la FAO.

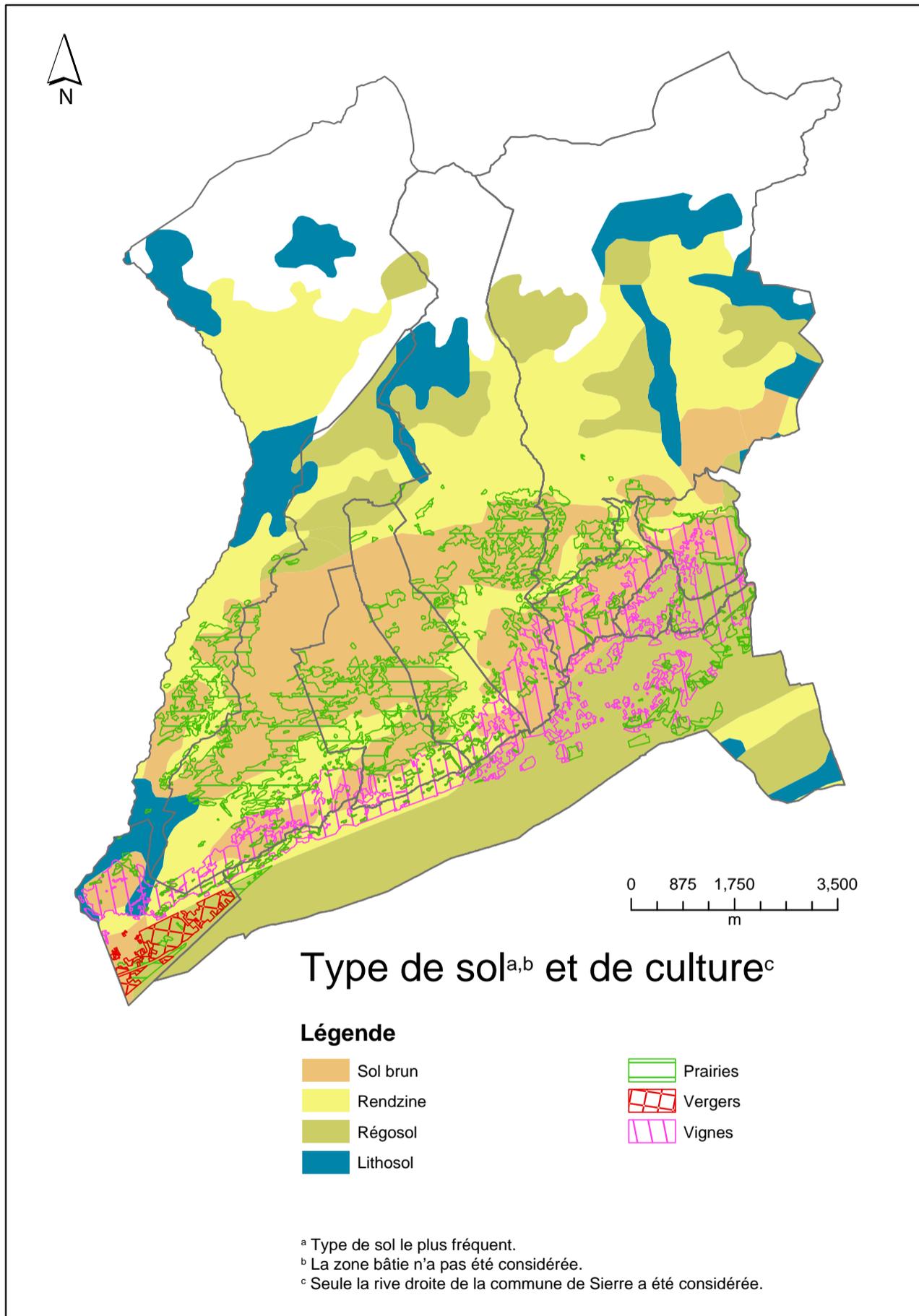


Fig. 4.29 – Type de sol et de cultures.

Données de base : carte pédologique de la Suisse 1:200'000, DFKP, DFE, DFI, 1980 (digitalisée et modifiée).

Culture	Début ^a	Longueur des phases de croissance [jours]					Coefficient de culture de base, K_{cb}			H_{max} [m]
		initiale	dév.	mi.	fin	total	initiale	mi.	fin	
Vignes	1 avr	20	50	80	33	190	0.01	0.65	0.35	2.00
Prairies < 1000 m	1 mar	20	51	113	30	214	0.95	1.05	1.00	1.00
Prairies > 1000 m	15 mar	20	36	98	30	184	0.95	1.05	1.00	1.00
Vergers	1 mar	56	36	66	45	203	0.40	0.80	0.60	4.00

Culture	Facteur d'épuisement			Coefficient de réponse du rendement, K_y					Racines [m]	
	initial	mi.	fin	initiale	dév.	mi.	fin	globale	min	max
Vignes	0.45	0.45	0.45	0.20	0.70	0.85	0.40	0.85	1.00	1.50
Prairies < 1000 m	0.55	0.55	0.55						0.15	0.50
Prairies > 1000 m	0.55	0.55	0.55						0.15	0.50
Vergers	0.50	0.50	0.50						1.00	1.50

Tab. 4.18 – Caractéristiques des cultures dans la région.

Source des données originales : FAO

Adaptations des données en collaboration avec les experts d'Agroscope suivants :

Raphaël Charles, Claire Deléglise, Eric Mosimann, Philippe Monney et Vivian Zufferey.

^a En raison de l'apport d'eau au sol de la part de la neige gisante et des pratiques d'irrigation de la région, dorénavant ne seront considérés que les résultats produits entre avril et septembre.

Propriétés hydriques des sols

Ce sous-chapitre traite, de manière simplifiée, les principales propriétés hydriques des sols et met l'accent sur les caractéristiques pédologiques qui les déterminent. D'après la carte pédologique de la Suisse (1:200'000), les sols les plus fréquents dans la région de Crans-Montana-Sierre sont les suivants : lithosol, régosol, rendzine, et sol brun. Chacun de ces sols a des propriétés hydriques spécifiques (tableau 4.19) qui dépendent de trois facteurs : la texture, la structure et la porosité.

- La caractéristique la plus importante est certainement la texture, qui détermine les forces de rétention de l'eau et influence toutes les autres propriétés du sol (Gobat et al., 2010).
- La structure influence la circulation de l'eau : très rapide dans les structures grossières, moyenne dans les formes grumeleuses et presque nulle en cas de forte compaction (Gobat et al., 2010).
- La porosité définit le volume du réservoir hydrique du sol, qui dépend aussi des relations entre les vides du sol et leur mode d'arrangement (Gobat et al., 2010).

Données climatiques nécessaires à la modélisation

Les données climatiques proviennent des stations de mesure de MétéoSuisse, situées à Montana, Sierre et Sion (tableau 4.20). Les données de la station de Montana ont été utilisées pour tous les « catchments » situés au-dessus de 1'000 m d'altitude. Pour les « catchments » situés au-dessous de 1000 m, par contre, le discours est plus com-

Type de sol	Propriétés du sol (% du volume)			
	Saturation	Capacité de rétention hydrique	Point de flétrissement	Capacité en eau
Lithosol	41.7	10.35	2.42	7.93
Régosol	40.1	14.90	4.54	10.36
Rendzine	43.2	36.02	19.38	16.64
Sol brun	48.6	34.52	13.12	21.40

Tab. 4.19 – Caractéristiques hydriques des sols les plus fréquents dans la région.

Source des données originelles : Randall B. Brown, Univ. of Florida

plexe. La station climatologique de Sierre enregistre exclusivement les précipitations, les données de température et d'humidité proviennent donc de la station de Sion, située à environ 7.5 km à l'ouest de St-Léonard et présentant des conditions climatiques très similaires à celles de la partie basse de la région de Sierre (tableau 4.21).

Station de mesure	Coordonnées suisses	Altitude
Montana	601'706 / 127'482	1'427 m (1'508 avant l'11 février 2009)
Sierre	609'200 / 127'460	539 m
Sion	591'630 / 118'575	482 m

Tab. 4.20 – Coordonnées des stations météorologiques utilisées.

Source : MétéoSuisse.

Variables météo	Gradient linéaire entre	
Précipitations	station de Montana	station de Sierre
Température minimale	station de Montana	station de Sion
Température maximale	station de Montana	station de Sion
Humidité relative moyenne	station de Montana	station de Sion
Vitesse du vent	station de Montana	–
Radiation solaire	station de Montana*	–

Tab. 4.21 – Provenance des données météorologiques utilisées dans MABIA.

* valeurs modifiées par rapport à l'exposition des communes.

MABIA exige deux types de données pour le calcul de l'eau nécessaire aux cultures : les précipitations et l'évapotranspiration (Jabloun et Sahli, 2012). Les mesures d'évapotranspiration sont malheureusement rarement disponibles et notre région ne fait pas exception. Afin de compenser ce manque de données, MABIA recourt à l'équation de Penman-Monteith (Jabloun et Sahli, 2012) (équation 4.7), comprend tous les paramètres qui régissent l'échange d'énergie et de flux de chaleur latente correspondant (FAO, 1998), ce qui permet de calculer les valeurs d'évapotranspiration (λET) à partir d'autres paramètres météorologiques (Jabloun et Sahli, 2012).

$$\lambda ET = \frac{\Delta (R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \quad (4.7)$$

Où R_n est la radiation solaire, G est le flux de chaleur du sol, $(e_s - e_a)$ représente le déficit de pression de vapeur de l'air, r est la densité moyenne de l'air à une pression constante, c_p est la chaleur spécifique de l'air, Δ représente la tension de vapeur, γ est la constante psychométrique et r_s et r_a sont la surface et la résistance aérodynamique (FAO, 1998). À cause de la complexité de la morphologie du territoire, la radiation solaire mesurée par la station Météosuisse de Montana ne peut pas être utilisée pour l'ensemble de la région d'étude. La radiation solaire typique pour chaque « catchment » a été calculée à l'aide d'un SIG, en utilisant un MNT à 2 m de résolution. Les valeurs calculées pour les coordonnées correspondant à la station de mesure de Montana ont été utilisées comme série de donnée de référence. Cette démarche a permis de calculer les rapports mensuels entre la série des valeurs calculées pour Montana et les autres séries de données. Ces rapports ont été ensuite appliqués aux valeurs réellement mesurées à Montana. Les séries reconstruites ne diffèrent pas grandement des valeurs mesurées, mais par contre, contribuent à l'augmentation de la précision de la modélisation.

Résultats pour la période 1980-2011

Les résultats annuels par culture (figure 4.30) montrent la diversité du besoin en eau des cultures de la région de Crans-Montana-Sierre. Les prairies irriguées ont un besoin en eau qui peut atteindre 3.4 millions de m^3 par année. Cette demande non satisfaite concerne toutes les années entre 1980 et 2011, sans aucune exception. Le vignoble, par contre, se caractérise par un besoin en eau discontinu : certaines années, il est très proche ou égal à zéro, alors que pour certaines années sèches (1998, 2000, 2003 et 2004), la demande non satisfaite en eau est estimée entre 3 et 3.7 millions de m^3 . Ce résultat ne doit pas surprendre, vu la résistance différente au manque de précipitations des deux cultures concernées. Les prairies ont besoin d'un apport en eau constant pour ne pas connaître de stress hydrique et par conséquent cesser la production de biomasse. La vigne est beaucoup mieux adaptée au climat sec du coteau de Sierre et elle nécessite donc de l'eau seulement pendant les périodes les plus sèches. L'amplitude de la variation annuelle de la demande en eau non satisfaite, qui s'élargit considérablement si les précipitations entre avril et septembre sont inférieures à 250 mm (chapitre 4.5.5), dépend donc en grande partie du besoin en eau du vignoble. Au total, les années

particulièrement sèches (1998, 2000, 2003 et 2004) nécessitent entre 5 et 7 millions de m^3 , ce qui dépasse les quantités dérivées par les bisses de la région.

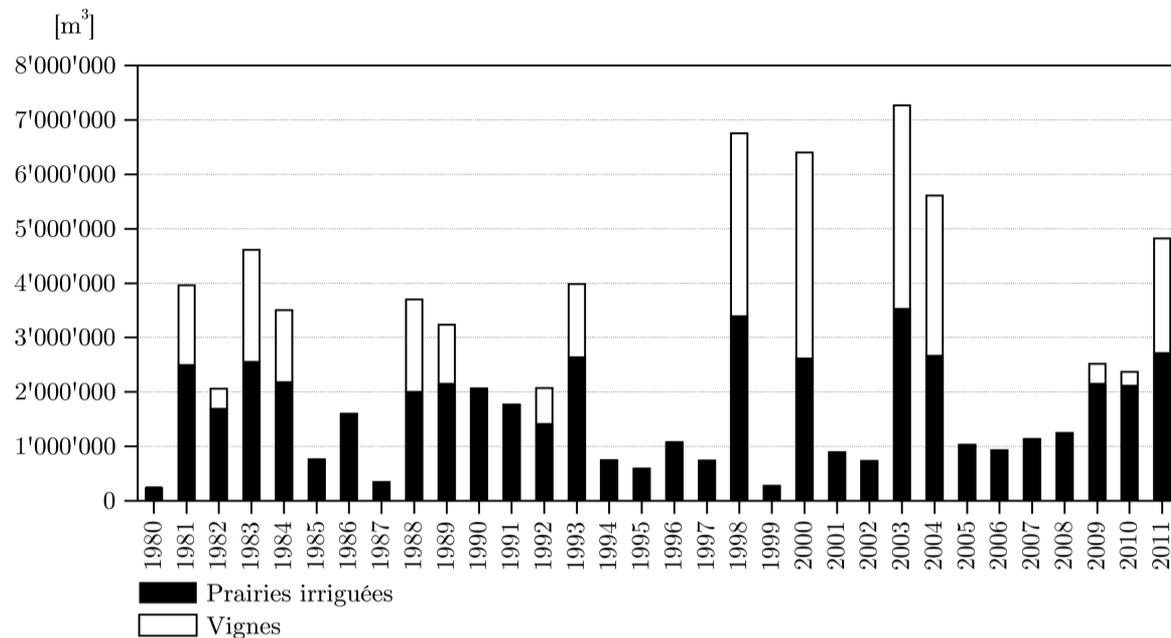


Fig. 4.30 – Demande en eau non satisfaite par culture entre 1980 et 2011.

Modélisation faite à l'aide du module MABIA de WEAP.

Les résultats obtenus pour le vignoble semblent surestimer systématiquement le besoin en eau en fin de saison, c'est-à-dire pour les mois de septembre et octobre (pas considéré dans les résultats finaux). De plus, le besoin en eau des cultures peut différer sensiblement des intérêts des agriculteurs. En fait, il faut également considérer qu'une contrainte hydrique modérée (entre -3 et -5 bars) favorise l'accumulation des sucres dans les raisins lors de la maturations des baies et la synthèse des composés phénoliques (Agridea, 2007). Les agriculteurs ont donc intérêt à ne pas satisfaire entièrement le besoin en eau des vignes, car une quantité plus élevée de sucre dans les raisins permet de produire un vin de meilleure qualité (Van Leeuwen et Seguin, 1994). Il faut également tenir compte de la tendance générale à la diminution des quantités de raisin produites depuis le début des années 1980. Les valeurs de la demande en eau modélisées ici correspondent donc à des maximaux qui ne sont certainement pas atteints dans la réalité. En ce qui concerne la modélisation du besoin en eau des prairies, il faut également signaler que, d'après les messages d'avertissement que WEAP donne après avoir terminé sa tâche, il semble que le modèle n'arrive pas toujours à compléter les itérations nécessaires à donner un résultat auquel on peut faire entièrement confiance. Les résultats pour les mois concernés⁴³ et ceux qui les suivent, qui partagent la caractéristique d'être relativement humides, sont donc à considérer avec prudence. Globalement, les résultats obtenus en utilisant WEAP et MABIA semblent être plausibles en termes quantitatifs et temporels, mais la marge d'amélioration est considérable, surtout en ce

43. Juin 1980, juin 1983, août 1987, juin 1992, juin 1996, septembre 2000, septembre 2006, août 2008 et juin 2010.

qui concerne le détail de l'information introduite dans le modèle. L'hétérogénéité du territoire de la zone d'étude et de ses cultures (type de sol, altitude, type de cépage, etc.) a imposé des simplifications importantes, mais absolument nécessaires au niveau pratique.

Demande en eau non satisfaite et précipitations

Une estimation de l'eau nécessaire aux cultures pour les années comprises entre 2000 et 2011 a été effectuée pour permettre la comparaison des résultats avec ce qui s'est passé réellement. Les résultats de la modélisation de l'eau nécessaire aux cultures par année montrent que les années se divisent nettement en deux classes (figure 4.31 et tableau 4.22). La première classe est constituée par les années avec moins de 250 mm de précipitations en plaine entre avril et septembre et un besoin en eau supérieur à 4 millions de m³, c'est-à-dire 2000, 2003, 2004 et 2011. Les années restantes, qui se caractérisent par une quantité de précipitations entre avril et septembre supérieure à 250 mm, ont un besoin en eau inférieur à 3 millions de m³. En comparant l'estimation de la quantité d'eau amenée dans la région de Crans-Montana-Sierre par les bisses avec les résultats de la modélisation faite à l'aide de MABIA, on constate que l'année 2010 a un besoin en eau d'environ 2.4 million de m³ et que les bisses pendant cette année ont transporté env. 5 millions de m³ d'eau. La quantité de précipitations du mois d'août 2010 (53.2 mm à Sierre), combiné avec des températures plus fraîches que la moyenne et un ciel couvert pour une bonne partie du mois, est la cause première de l'écart entre le besoin en eau de 2010 avec les autres années analysées. L'année 2011 a un besoin en eau d'environ 4.5 millions de m³ et les bisses ont transporté env. 6 millions de m³ d'eau. À première vue, cette comparaison semble révéler qu'en 2010, il y a eu largement assez d'eau pour irriguer les cultures et que l'année 2011, même avec une marge réduite, a bénéficié de conditions favorables, mais il ne faut pas oublier que l'eau qui est amenée par les bisses n'est pas entièrement utilisée pour irriguer les cultures et qu'une partie de l'eau d'irrigation provient des réseaux d'eau potable. Néanmoins cette estimation permet de se faire une idée du potentiel en eau utilisable pour irriguer dans la région par rapport aux besoins des cultures.

Les années les plus sèches après 2000, 2010 et 2011

La figure 4.32 montre que les années les plus sèches (2000, 2003, 2004 et 2011) partagent une soudaine augmentation du besoin en eau, qui permet de diviser la saison d'irrigation en deux périodes distinctes :

la phase précédant l'augmentation et celle qui la suit. La première phase est fortement influencée par les précipitations : en 2011 par exemple, à cause de la sécheresse de mars

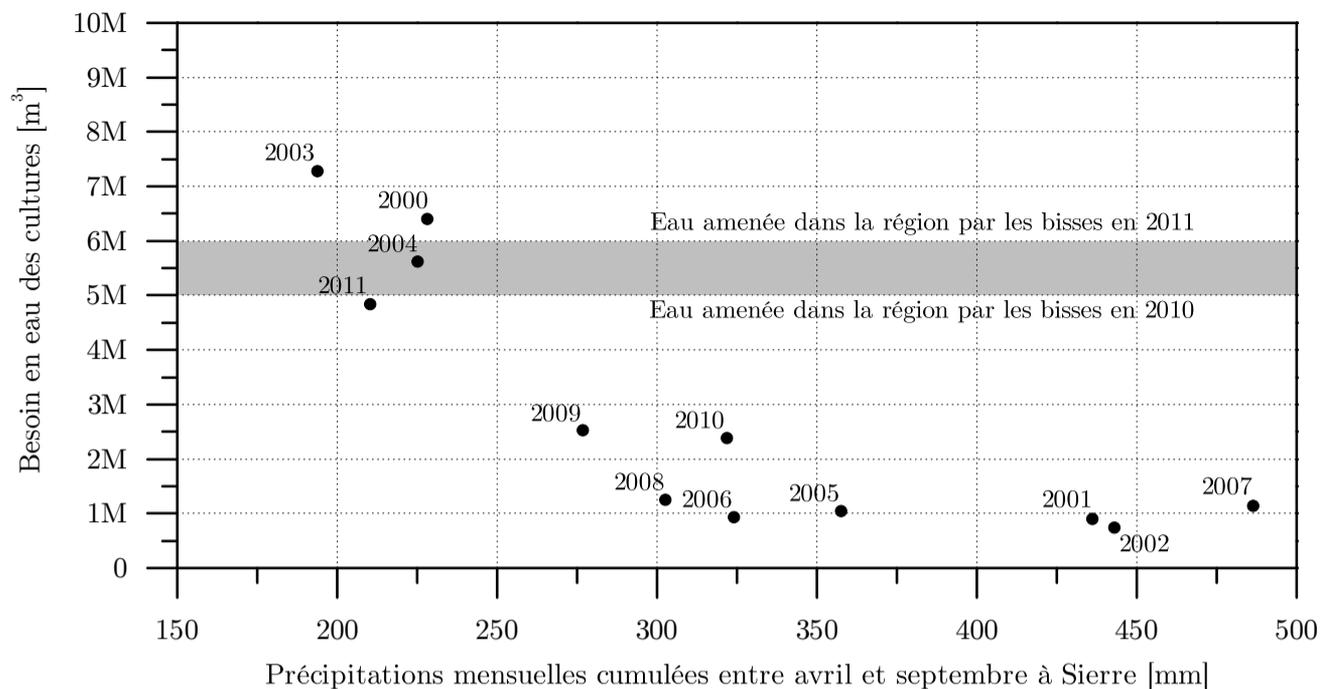


Fig. 4.31 – Estimation de l’eau nécessaire aux cultures par année (2000-2011) dans la région de Crans-Montana-Sierre.

En gris l’enveloppe de la quantité d’eau amenée par les bisses en 2010 et 2011.

Année	P ^a [mm]	Demande en eau non satisfaite		Total
		Prairies irriguées	Vignes	
2000	228	2'611'911	3'784'883	6'396'794
2001	436	897'229	0	897'229
2002	443	730'266	0	730'266
2003	194	3'521'041	3'746'462	7'267'503
2004	225	2'664'517	2'946'648	5'611'165
2005	358	1'014'402	15'135	1'029'537
2006	324	921'337	10'589	931'926
2007	487	1'131'784	0	1'131'784
2008	303	1'248'408	0	1'248'408
2009	277	2'148'087	365'203	2'513'290
2010	322	2'112'829	258'536	2'371'365
2011	210	2'711'777	2'112'829	4'824'606
Moyenne	317	1'809'466	1'103'357	2'912'823
Max	487	3'521'041	3'784'883	7'267'503
Min	194	730'266	0	730'266
Écart-type	94	890'560	1'502'772	2'322'522

Tab. 4.22 – Estimation de l’eau nécessaire aux cultures par année (2000-2011) dans la région de Crans-Montana-Sierre.

Modélisation faite à l’aide du module MABIA de WEAP.

^a Précipitations entre avril et septembre enregistrées à Sierre.

et avril (OFEV, 2011c), l’eau nécessaire aux cultures durant ces deux mois a été plus élevée par rapport à 2000 et 2004 (OFEV, 2009). La différence entre le besoin en eau pendant la saison d’irrigation 2010 et celui des années les plus sèches analysées (2000, 2003, 2004 et 2011) est considérable. Ce qui distingue l’année 2010 est le fait que la nécessité en eau des cultures pendant le mois de juillet est élevée et que celle d’août, par contre, est plus réduite (figure 4.32 et tableau 4.23). Les phénomènes climatiques qui ont porté à cette situation très particulière sont principalement les précipitations excédentaires et l’ensoleillement déficitaire du mois d’août (Fallot, 2011).

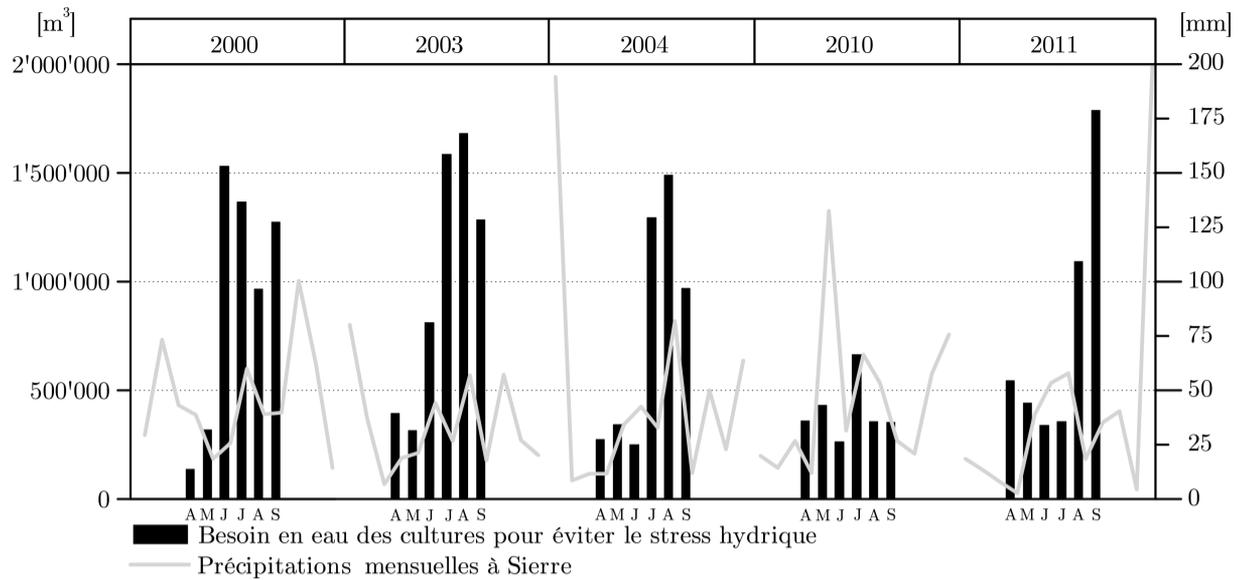


Fig. 4.32 – Estimation de l'eau nécessaire aux cultures par mois.

Modélisation faite à l'aide du module MABIA de WEAP.

Mois	Demande en eau non satisfaite				
	2000	2003	2004	2010	2011
Avril	135'981	394'538	275'364	359'049	543'268
Mai	318'894	314'212	343'426	429'819	441'484
Juin	1'530'985	810'413	248'784	263'020	337'683
Juillet	1'366'161	1'586'847	1'294'224	663'870	357'787
Août	965'495	1'680'508	1'488'593	357'029	1'094'064
Septembre	1'272'977	1'282'746	967'942	354'191	1'788'843
Moyenne	931'749	1'011'544	769'722	404'496	760'522
Max	1'530'985	1'680'508	1'488'593	663'870	1'788'843
Min	135'981	314'212	248'784	263'020	337'683
Écart-type	528'238	541'519	504'755	125'685	525'780

Tab. 4.23 – Besoin en eau durant les années sèches après 2000.

Modélisation faite à l'aide du module MABIA de WEAP.

4.5.6 Essai de quantification de l'eau nécessaire aux zones résidentielles irriguées

Principes

Ce sous-chapitre est consacré à la quantification de la ressource en eau utilisée dans les Zones résidentielles irriguées (ZRI), c'est-à-dire les surfaces nécessitant de l'irrigation (gazon, jardin) à l'intérieur de la zone résidentielle. Elle est effectuée en utilisant la méthode MABIA, mais avec une démarche légèrement différente par rapport à celle utilisée pour estimer le besoin en eau des cultures. En effet, étant donné la taille de la région d'étude et le temps limité à disposition, deux zones d'étude (Montana et Veyras) ont été sélectionnées en partant de l'observation des images aériennes. La première zone se trouve sur la commune de Montana, à environ 1500 m d'altitude, un des endroits à forte fréquentation touristique de la région de Crans-Montana-Sierre. La deuxième zone se situe à environ 600 m d'altitude sur la commune de Veyras, commune résidentielle entourée de vignobles. Les ZRI des deux secteurs sélectionnés ont été cartographiées

de manière qualitative en utilisant les catégories suivantes (figure 4.33) :

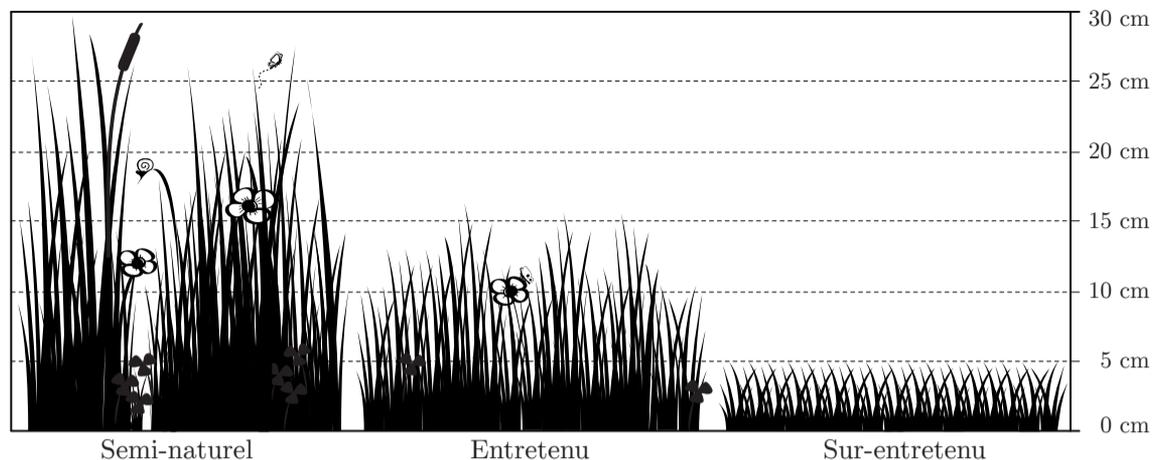


Fig. 4.33 – Catégories de gazons utilisées pour la cartographie qualitative.

- Gazon semi-naturel : la pelouse est relativement haute et hétérogène et présente différentes espèces d'herbes et fleurs ; l'arrosage n'est pas systématique.
- Gazon entretenu : la hauteur de la pelouse est régulière (entre 5 et 15 cm) et l'arrosage systématique mais pas forcément automatisé.
- Gazon sur-entretenu : la hauteur de la pelouse est très régulière et inférieure à 5 centimètres. Cette catégorie de gazon a une biodiversité extrêmement réduite et ne présente qu'une typologie d'herbacées. L'arrosage est automatisé et fait de manière soigneuse et systématique.

Ce type de cartographie, basée sur une visite de terrain réalisée entre le 6 et le 7 juillet 2011, a abouti à la création de cartes qualitatives illustrant l'irrigation des ZRI (figures 4.36 et 4.37). La statistique des surfaces obtenues est résumée dans le tableau 4.24.

Montana	Semi-naturel	Entretenu	Sur-entretenu
Taille moyenne des parcelles (5-95 percentile) [m ²]	1'300	1'000	1'400
Surface totale [m ²]	29'553	87'448	94'249
Pourcentage par typologie [%]	14	41	45

Veyras	Semi-naturel	Entretenu	Sur-entretenu
Taille moyenne des parcelles (5-95 percentile) [m ²]	600	800	1'000
Surface totale [m ²]	85'542	148'473	26'765
Pourcentage par typologie [%]	33	57	10

Tab. 4.24 – Surfaces des zones résidentielles irriguées.

Données utilisées pour la modélisation

Afin de pouvoir estimer le besoin en eau des gazons à Montana et à Veyras, des simplifications se sont révélées nécessaires. La totalité des surfaces occupées par les ZRI a été prise en considération comme ayant une végétation homogène d'espèces herbacées. La hauteur maximale moyenne des catégories de gazons (figure 4.33) a été fixée à 15 cm pour les gazons semi-naturels, 10 cm pour les gazons entretenus

et 5 cm pour les gazons sur-entretenus. Ces hauteurs ont été estimées par rapport aux observations faites le 6 et le 7 juillet 2011. La profondeur minimale des racines a été fixée à la valeur correspondante de la hauteur maximale moyenne, tandis que la profondeur maximale correspond à son double. Les autres paramètres physiologiques sont les mêmes que ceux utilisés pour les prairies pour l'estimation de l'eau nécessaire aux cultures. En ce qui concerne les propriétés pédologiques, on considère que les deux zones d'étude sont situées sur le même type de sol : le sol brun. Les valeurs du coefficient de culture K_{cb} , ont été estimées en suivant les indications fournies par les responsables d'une entreprise active dans la construction et l'entretien des jardins : 0.65 pour les ZRI semi-naturels, 0.85 pour les ZRI entretenues et 1.05 pour les ZRI sur-entretenus. Pendant la mi-saison les valeurs du K_{cb} augmentent de 0.1, en suivant l'évolution des valeurs FAO pour les espèces herbacées.

Résultats de la modélisation

Le tableau 4.25 présente la demande en eau non satisfaite pour les trois catégories de ZRI cartographiées dans les figures 4.36 et 4.37 par m^2 pour la période 1980-2009 et les années 2003, 2010 et 2011. Comme prévu, ces résultats confirment que les surfaces les plus entretenues demandent en moyenne plus d'eau que celles qui le sont moins.

Commune	Catégorie	l par jour et par m^2 en 1980-2009	l par jour et par m^2 en 2003	l par jour et par m^2 en 2010	l par jour et par m^2 en 2011
Montana	Semi-naturel	2.05	3.05	2.31	2.08
	Entretenu	2.79	3.88	3.31	4.24
	Sur-entretenu	3.84	5.20	4.46	5.27
Veyras	Semi-naturel	3.33	4.79	3.64	5.26
	Entretenu	4.01	5.08	4.52	5.52
	Sur-entretenu	5.29	6.60	5.94	6.89

Tab. 4.25 – Surface et besoin en eau annuel des ZRI par m^2 .

Le tableau 4.25 montre que le besoin en eau par m^2 , dans une catégorie de gazon de la zone d'étude de Veyras est toujours plus élevé par rapport à celui de Montana. Ce qui est dû à la situation géographique, Veyras étant situé à plus basse altitude que Montana, avec un climat globalement plus sec. Les figures 4.34 et 4.35 illustrent la quantité d'eau mensuelle nécessaire à éviter le stress hydrique des ZRI par m^2 pour les années 2010 et 2011. En 2010, les ZRI des zones d'étude analysées ont demandé le plus d'eau pendant les mois de mars-avril et de juin-juillet.

En 2011, par contre la sécheresse printanière (avril-mai) a fait exploser la demande pendant cette période de l'année. Lors de la cartographie des ZRI, le 6 et le 7 juillet 2011, la situation s'était par contre « normalisée » grâce aux précipitations qui ont eu lieu entre la deuxième moitié du mois de mai et la fin du mois de juin. Afin d'estimer la

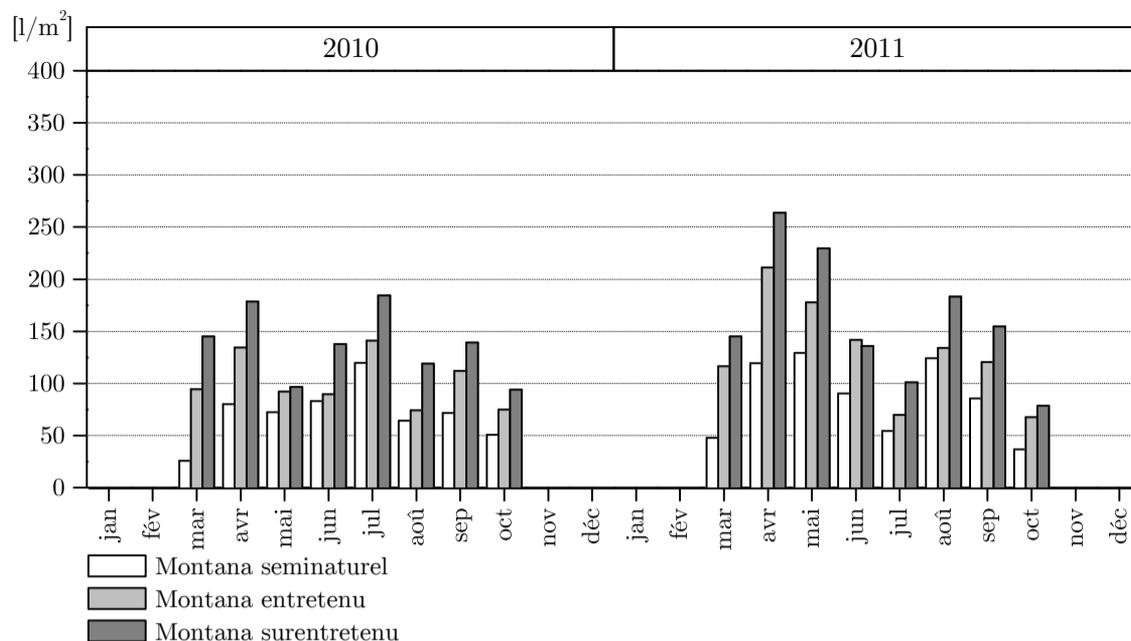


Fig. 4.34 – Demande en eau non satisfaite pour les ZRI de Montana.
Modélisation faite à l'aide du module MABIA de WEAP.

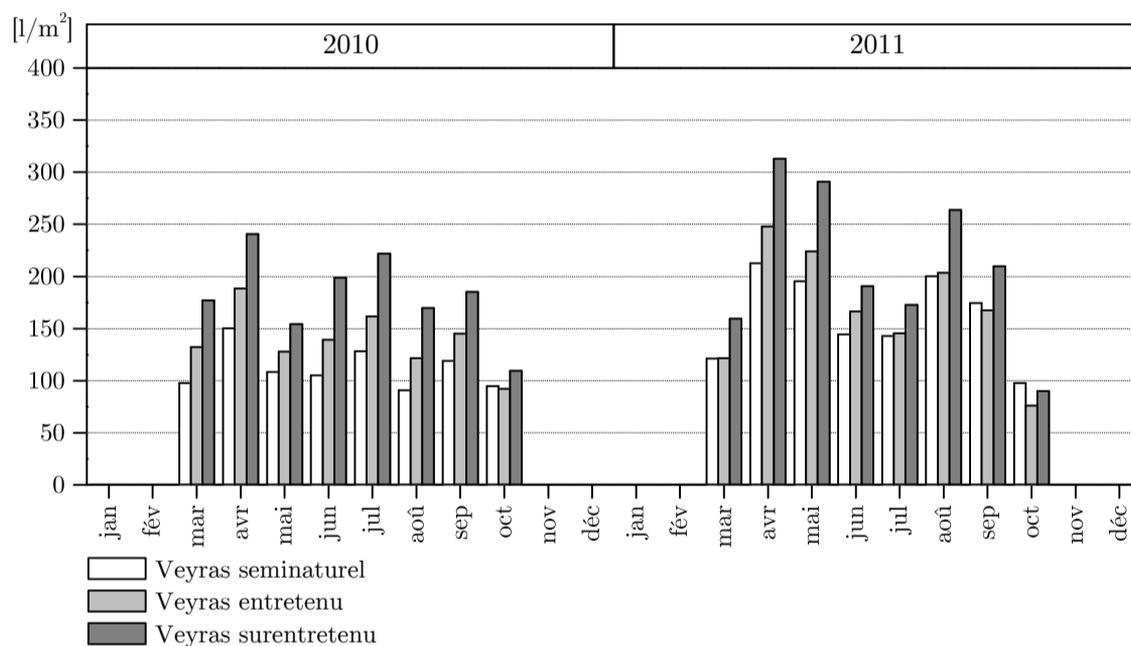


Fig. 4.35 – Demande en eau non satisfaite pour les ZRI de Veyras.
Modélisation faite à l'aide du module MABIA de WEAP.

consommation en eau de la totalité des ZRI de la région, les informations chromatiques de chaque catégorie ont été analysées à partir des photos aériennes à disposition. Après avoir déterminé les couleurs dominantes (c'est-à-dire la tonalité de vert qui se retrouve le plus souvent) dans chaque catégorie, ces couleurs ont été cherchées dans toute la région d'étude. Cette démarche s'est malheureusement révélée impraticable à cause de la différence chromatique minimale entre les différentes catégories des ZRI et entre les ZRI et le reste de la végétation. Le gradient de précipitations entre la plaine du Rhône et le Haut-Plateau a également compromis la démarche prévue. Il n'a donc pas été possible d'estimer la demande en eau globales des zones résidentielles.

Conclusions

La quantité d'eau calculée permet aux ZRI de ne pas connaître de stress hydrique, mais la différence entre cette quantité et celle réellement utilisée pour arroser ces surfaces est probablement très grande. Les observations faites sur le terrain suggèrent que la quantité d'eau utilisée pour arroser les pelouses dans la zone d'étude de Montana est sensiblement plus importante par rapport à celle réellement nécessaire. La modélisation du besoin en eau des ZRI, même si elle est limitée à deux zones d'étude, semble confirmer les hypothèses posées dans le chapitre 4.4.6. Les pics de consommation en eau potable qui surviennent pendant le printemps sont donc probablement directement liés à l'irrigation des ZRI (mais également des cultures) en début de saison.

Pendant l'été, l'irrigation des ZRI, bien que vraisemblablement importante, représente seulement une des causes multiples qui engendrent les pics de consommation en eau potable de la population résidente (la chaleur estivale, l'irrigation de cultures, le nettoyage des voitures, etc.).

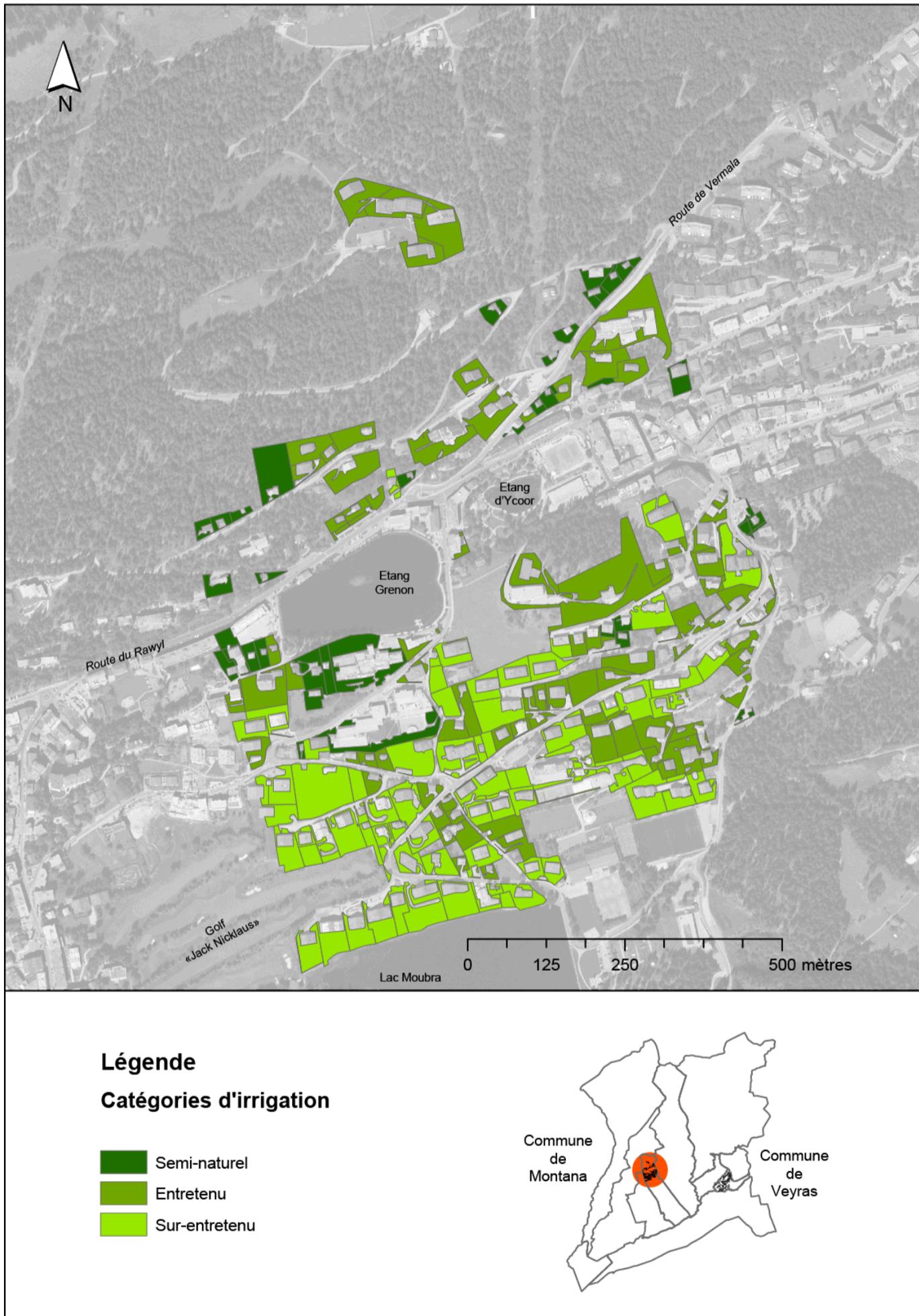


Fig. 4.36 – Surfaces des zones résidentielles irriguées à Montana-station.

Cartographie effectuée le 6 juillet 2011.

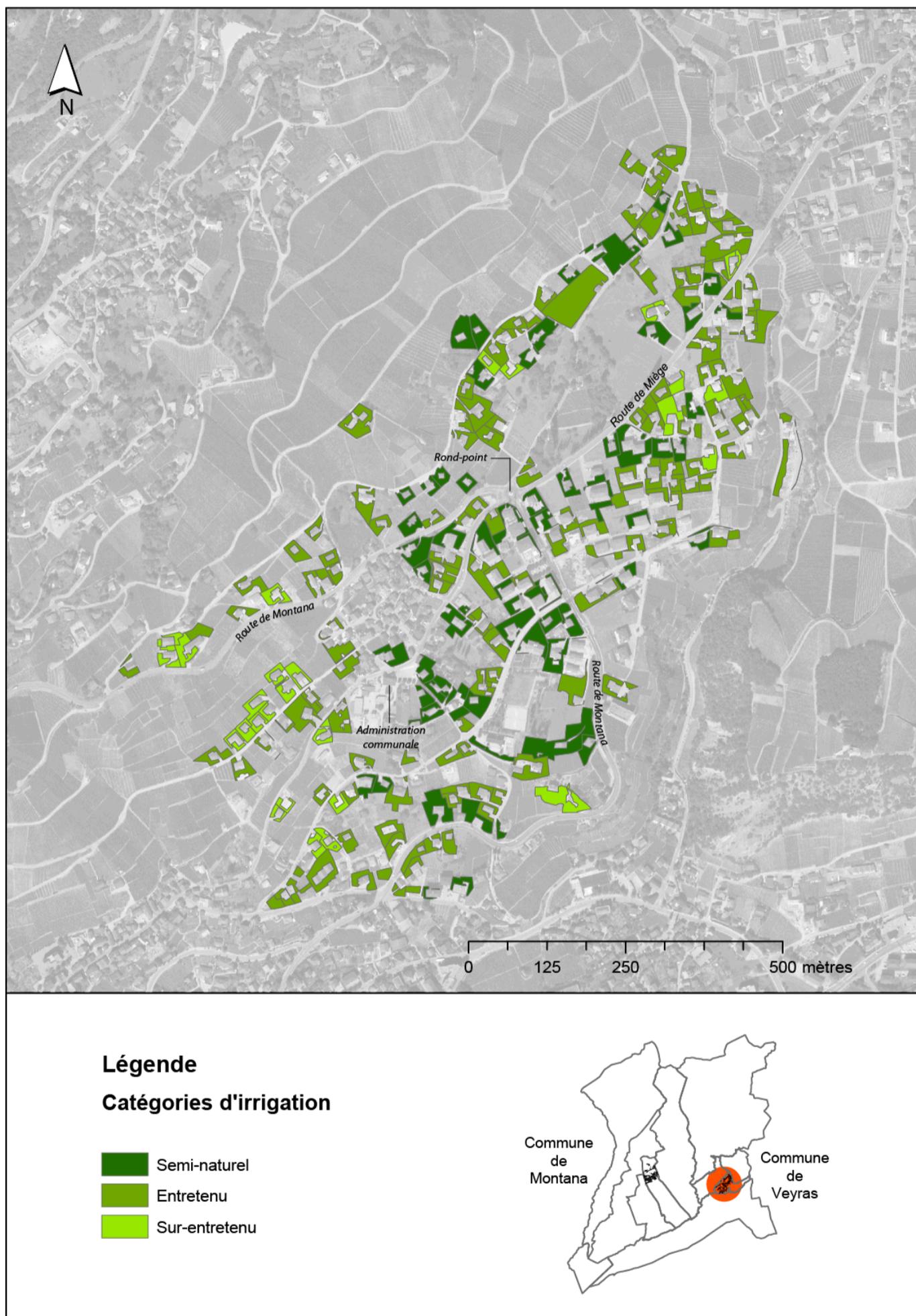


Fig. 4.37 – Surfaces des zones résidentielles irriguées à Veyras.

Cartographie effectuée le 7 juillet 2011.

4.5.7 Le problème de la quantification de l'eau nécessaire à l'écosystème

Bien que le module MABIA de WEAP ait la potentialité de simuler tout type de cultures, il n'a pas la capacité de calculer le besoin en eau d'un écosystème comme celui représenté par la forêt de la région de Crans-Montana-Sierre. En effet, ce module considère des surfaces homogènes, avec une typologie, taille et âge des arbres qui ne connaît ni de variations, ni d'interactions, alors que les écosystèmes sont caractérisés par des interactions entre le climat, la phytocénose, le sol et la zoocénose, qui varient dans le temps (Perry, 1994). La figure 4.38 montre clairement le décalage existant entre la réalité de l'écosystème forêt et l'interprétation de ce même écosystème de la part de MABIA.

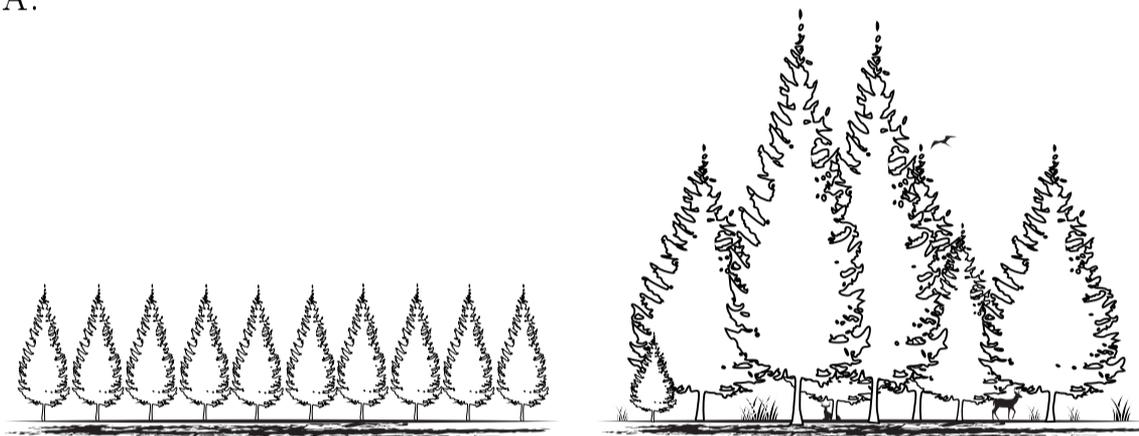


Fig. 4.38 – L'écosystème forêt tel qu'il est interprété par MABIA et dans la réalité.

Pour obtenir des résultats satisfaisants en utilisant MABIA, il faudrait avoir à disposition une cartographie extrêmement détaillée et mener plusieurs études sur la physiologie des arbres de la zone d'étude pendant plusieurs années (Rebetez et Dobbertin, 2004), ce qui est impossible dans le cadre du projet MontanAqua. Face à ces faits et en ne connaissant pas d'alternatives, l'avis d'un expert a été rendu nécessaire. Pascal Vittoz, biologiste et chercheur auprès du Département d'écologie et évolution de l'Université de Lausanne, a gentiment répondu à nos questions le 13 décembre 2011. Il est ressorti de cet entretien que la quantification de la ressource en eau utilisée par les écosystèmes est une question qui n'est pas souvent affrontée par les biologistes. Dans les cas où cette thématique a été traitée, la taille de la région d'étude était nettement plus réduite et homogène que celle de Crans-Montana-Sierre. Nous avons ainsi renoncé à une telle quantification, dont les résultats auraient été trop aléatoires. Par ailleurs, ceci ne porte pas à conséquence sur l'estimation des besoins en eau futurs dans la mesure où l'on considère que si les besoins varient, ce sont les écosystèmes qui changeront (p. ex. développement d'espèces méditerranéennes), sans conséquences sur la demande en eau régionale.

4.5.8 L'irrigation des golfs du Haut-Plateau

Afin de garantir des surfaces de jeu toujours impeccables, la quantité d'eau d'irrigation (c'est-à-dire non potabilisée) utilisée pour arroser les parcours de golf du Haut-Plateau est gérée dans le moindre détail par un système informatique. Les volumes d'eau utilisés dépendent principalement des conditions météorologiques (précipitations et évapotranspiration), de la quantité d'additifs employés et des intervalles d'arrosage appliqués. La particularité de ce type de surface ne permet pas de comparer directement la quantité d'eau utilisée pour son entretien avec celle des autres surfaces de la région. Néanmoins, les parcours de golf du Haut-Plateau sont fort probablement les surfaces les plus gourmandes en eau présentes dans la région, surtout par rapport à la biomasse maintenue et produite par les autres surfaces. Le pic de consommation se situe normalement (2008, 2009 et 2010) entre juillet et août et peut varier entre 15'000 et 25'000 m³ d'eau non potable par mois (figure 4.39 et tableau 4.26).

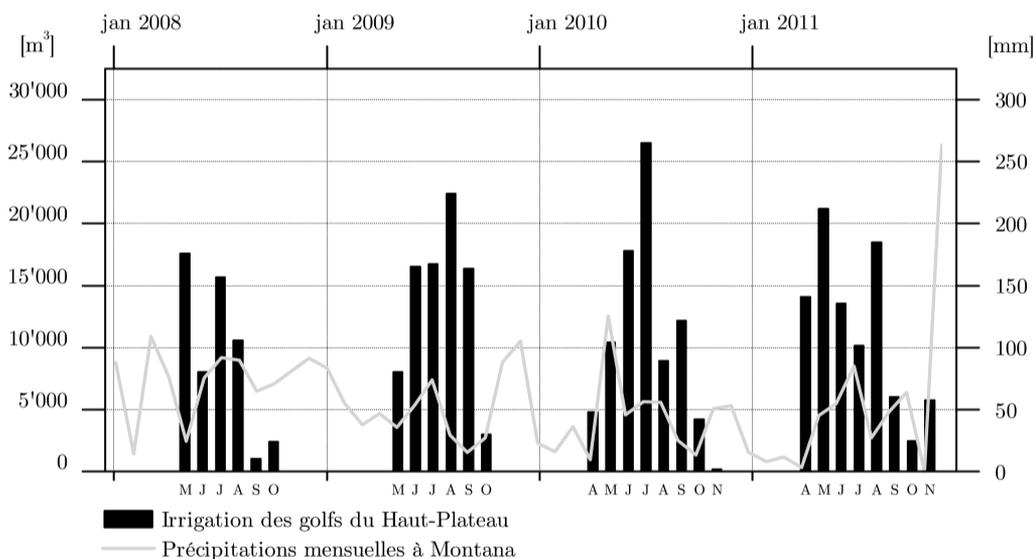


Fig. 4.39 – Irrigation des golfs (Ballesteros et Nicklaus) du Haut-Plateau.

Source des données de consommation 2008 et 2009 : Emery, 2010.

Source des données de consommation 2010 et 2011 :

responsables de l'entretien des parcours Ballesteros et Nicklaus.

Source des données météorologiques : Météosuisse, station de Montana.

Les données à notre disposition mettent en évidence seulement deux années qui se caractérisent par un pic de consommation qui ne se situe pas dans la période habituelle, celui de mai 2008, engendré par les faibles précipitations du même mois (figure 4.39) et celui de 2011, engendré par la sécheresse printanière. En fait, en mai 2008 ont été comptabilisés seulement 4 jours avec des précipitations de plus de 1 mm de pluie à Montana (données Météosuisse), avec des périodes prolongées sans précipitations d'une certaine importance. En ce qui concerne l'année 2011, le mois d'avril n'a enregistré que 3.6 mm de précipitations à Montana (données Météosuisse) et le mois de mai, après de relativement longues périodes sans précipitations, que 45.4 mm de pluie (données Météosuisse).

Mois	Volumes d'eau utilisés			
	2008	2009	2010	2011
Avril	0	0	4'769	14'082
Mai	17'578	8'001	10'403	21'206
Juin	8'044	16'526	17'799	13'553
Juillet	15'681	16'722	26'523	10'163
Août	10'587	22'426	8'909	18'476
Septembre	1'013	16'382	12'159	6'025
Octobre	2'383	2'996	4'221	2'453
Novembre	0	0	173	5'734
Total	55'287	83'053	84'956	91'692

Tab. 4.26 – Volumes d'eau utilisés pour l'irrigation des parcours de golf du Haut-Plateau.

Source des données de consommation 2008 et 2009 : Emery, 2010.

Source des données de consommation 2010 et 2011 :

responsables de l'entretien des parcours Ballesteros et Nicklaus.

Le tournoi de golf de Crans-Montana, qui se déroule entre fin août et début de septembre et qui attire chaque année environ 50'000 spectateurs, connaît des problèmes liés au calendrier de ce genre de compétitions (Swissinfo.ch, 2012b). En fait, à cause de la proximité avec la prestigieuse Ryder Cup (qui a lieu à la fin de septembre aux États-Unis chaque deux ans), plusieurs joueurs sont en phase de repos, ce qui explique leur absence forcée du tournoi de Crans-Montana et qui fait penser les organisateurs à déplacer l'événement à la fin de juillet (Swissinfo.ch, 2012b). Un déplacement comporterait probablement une variation significative de la quantité d'eau utilisée pour irriguer le golf à l'échelle mensuelle, mais la quantité d'eau utilisée pour l'ensemble de la saison d'irrigation devrait rester stable sur les valeurs actuelles. En fait, la dureté du terrain de jeu exigée par les golfeurs professionnels ne permet qu'un très faible arrosage durant une compétition de plusieurs jours. Cette exigence force les responsables de l'irrigation des parcours à arroser abondamment avant la manifestation, de manière à créer des réserves d'eau dans le sol (The Royal and Ancient Golf Club of St Andrews, 2009). A notre connaissance, dans les golf ouverts à tout public, l'irrigation n'est pas autant technologique. En termes de consommation en eau, la quantité d'eau consommées par les parcours de Noas et Super-Crans n'est pas connue.

4.6 L'hydroélectricité

4.6.1 La définition de l'usage de l'eau pour l'hydroélectricité

Si la quantification de la ressource en eau utilisée par Lienne SA est facilitée par la mise à disposition de toute une série de données, la définition de l'usage de l'eau par l'hydroélectricité a été particulièrement débattue au sein du projet MontanAqua. Dans un premier temps, nous avons considéré comme usage l'eau qui sortait du barrage de Tseuzier, pour ensuite changer d'idée et considérer comme usage, l'eau qui entre dans

le lac d'accumulation. En effet, c'est à ce moment-là que l'eau quitte l'hydrosystème naturel, même si elle ne sera turbinée que plusieurs mois plus tard. Cette définition permet également de faire un lien direct avec la disponibilité future de la ressource étudiée par le WP1 et de faciliter les prévisions à l'horizon 2050. En fait, prévoir la quantité d'eau en sortie du barrage s'avère une tâche extrêmement complexe, car les nécessités de Lienne SA varient en fonction du marché de l'énergie. La quantité d'eau en sortie du barrage reste importante pour mieux comprendre le décalage temporel entre le stockage des apports et les nécessités de Lienne SA. Dans l'optique des scénarios socio-économiques futurs, la variation des débits résiduels et leur application pourraient également influencer la ressource à disposition de la société exploitante.

4.6.2 Le barrage de Tseuzier

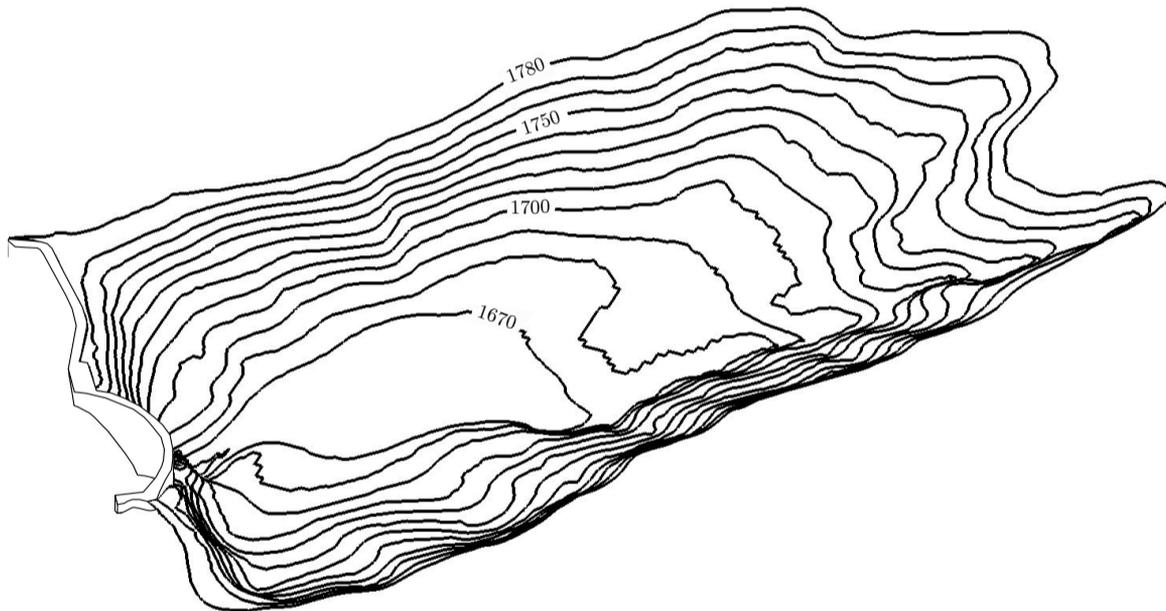


Fig. 4.40 – Reconstruction tridimensionnelle du fond du lac de Tzeuzier.

Equidistance des courbes de niveau : 10 m.
Auteurs : Martina Kauzlaric et Mariano Bonriposi.

Le barrage de Tseuzier (figure 4.40) joue un rôle central dans la production hydroélectrique de Lienne SA et il est également impliqué dans l'approvisionnement en eau des communes du Haut-Plateau et dans l'approvisionnement direct ou indirect de plusieurs bisses. En partant des isoplèthes d'altitude de la carte nationale de la Suisse (1:25'000), feuille 1286 – St-Léonard, la reconstruction tridimensionnelle de la morphologie du fond du lac de Tseuzier a été effectuée par Martina Kauzlaric, doctorante à l'Université de Berne et impliquée dans le WP1. Ce modèle a ensuite été modifié, notamment en ajoutant le barrage voûte et la digue (figure 4.40). En ce qui concerne la période 2005-2010 (figure 4.41), la distribution temporelle des apports a très peu varié, avec la

période estivale qui est de loin la plus importante en termes de quantité absolue. En 2011, par contre, les apports pendant les mois de juin, juillet et août ont été inférieurs d'environ 20 millions de m^3 par rapport aux années précédentes (figure 4.41). Ce déficit est probablement dû au manque de précipitations pendant l'hiver 2010-2011 (MétéoSuisse, 2011a) et aux températures supérieures à la moyenne (MétéoSuisse, 2011b). La quantité de neige qui a fondu est donc inférieure aux années précédentes.

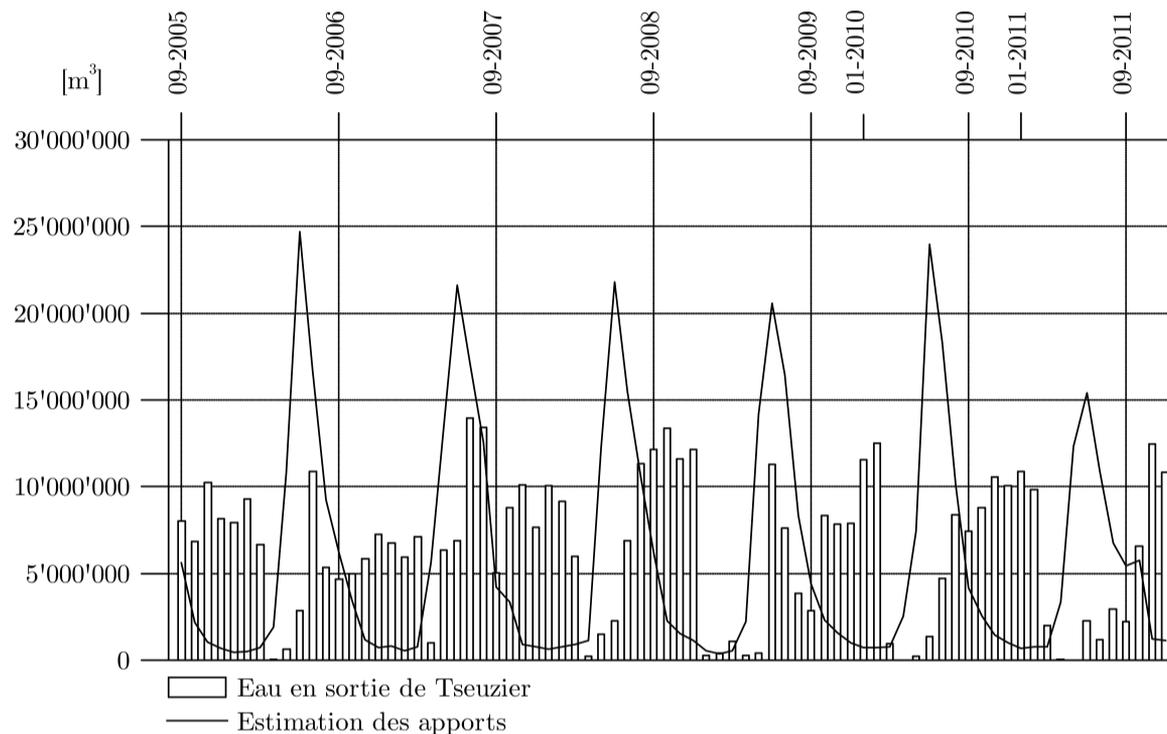


Fig. 4.41 – Eau en entrée et en sortie du lac de barrage de Tseuzier.

Source des données : Lienne SA (annexe 19).

4.6.3 Le lac de compensation de Croix

Le fonctionnement de l'infrastructure de Lienne SA (figure 4.42) pose quelques problèmes à notre tâche de quantification. En fait, une partie des eaux qui est amenée au lac de compensation de Croix depuis le barrage de Tseuzier est ensuite amenée à St-Léonard pour être turbinée une deuxième fois. Le lac de compensation de Croix reçoit également les eaux de la Liène (quantités estimées par Lienne SA), qui proviennent du tronçon situé à l'aval du barrage de Tseuzier et de l'Ertentse. Pour compliquer les choses, on ne connaît ni la morphologie du lac de compensation, ni les variations de la hauteur de l'eau pendant l'année. Quantifier la ressource en eau en sortie du bassin de compensation de Croix se révèle donc une tâche impossible avec les données actuellement disponibles. D'autre part, il faut noter que la seule eau provenant du bassin de compensation de Croix, qui est amenée à nouveau dans la région de Crans-Montana-

Sierre, est celle qui coule dans le Grand Bisse de Lens (où elle ne représente qu'une partie de l'eau amenée par le bisse) et le bisse du Sillonin, où le débit est enregistré en continu. Vu la situation, une quantification précise de l'eau en entrée et en sortie du lac de compensation de Croix a été mise de côté, mais par contre une estimation grossière de l'eau amenée à la centrale de St-Léonard peut quand même être faite en se basant sur la production hydroélectrique annuelle. En suivant cette démarche, on peut estimer que l'eau pompée du lac de compensation pour produire de l'électricité correspond à 40% de l'eau en sortie du barrage de Tseuzier.

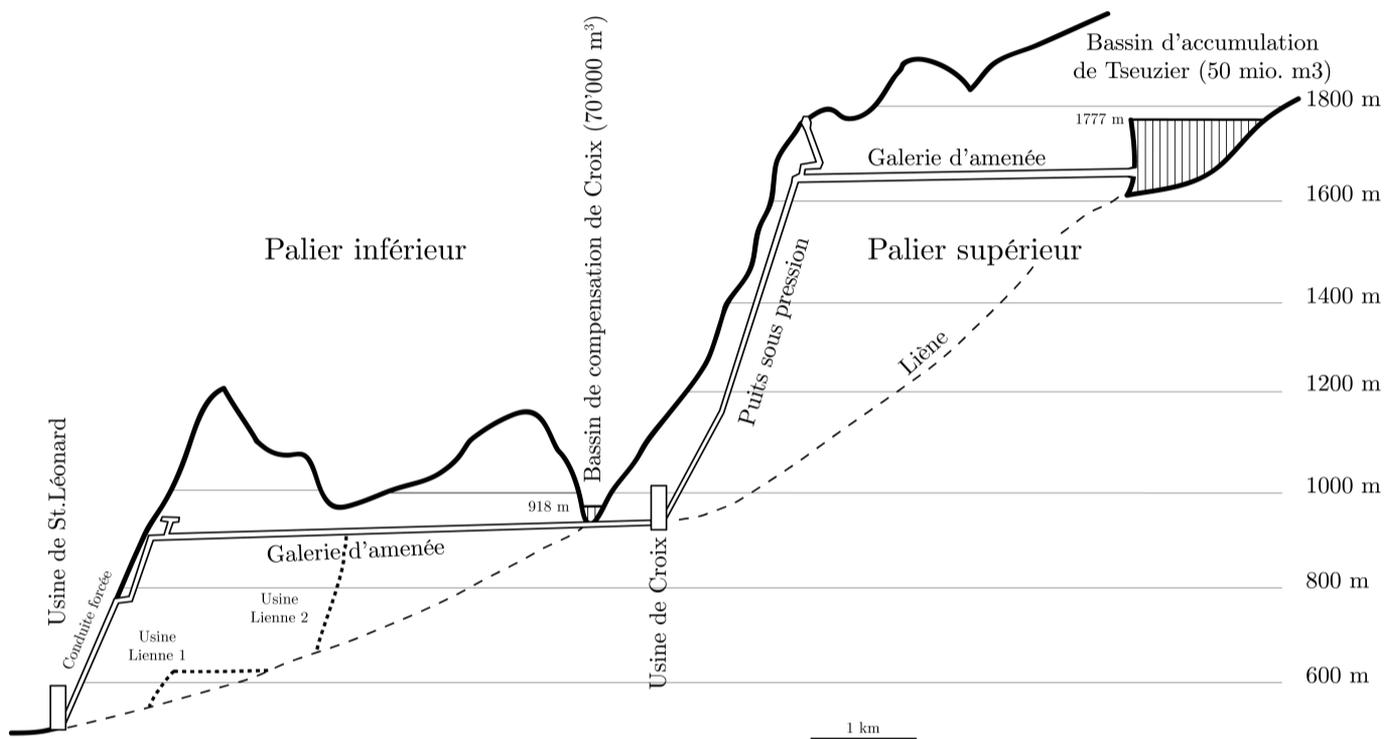


Fig. 4.42 – Plan général de Liègne SA - Profil en long.

Source : Bulletin de la Murithienne, 1956 (digitalisé et modifié).

4.6.4 Autres installations hydroélectriques

Les autres installations hydroélectriques présentes dans la région exploitent la chute de l'eau dans les conduites de transport des communes et utilisent un volume en eau extrêmement réduit, qui sera ensuite ré-utilisé par les communes (eau potable ou eau d'irrigation). La mini-centrale hydroélectrique d'Icogne, qui a été terminée en mai 2012, utilise le surplus des eaux d'irrigation stocké dans le lac d'Icogne (Emery Mayor, 2011b et Sixième Dimension, 2012).

4.7 L'enneigement artificiel

4.7.1 Estimation de la consommation en eau utilisée

La quantification de l'eau utilisée pour l'enneigement artificiel se base sur deux éléments différents : les chiffres officiels publiés à la fin de chaque saison par CMA d'un côté, et l'entretien du 21 juin 2011 avec Monsieur Arthur Clivaz, directeur de CMA, de l'autre. Il faut remarquer que CMA ne dispose pas de statistiques mensuelles en ce qui concerne la consommation en eau de ses canons à neige et qu'il a donc fallu demander une estimation en ce sens à ses responsables. Nous avons travaillé sur trois saisons (2008-2009, 2009-2010 et 2010-2011). La quantité d'eau utilisée pour les canons à neige en 2011-2012, ne nous a pas été communiquée. Une possible explication à ce manque de communication est la publication, le 30 novembre 2011, d'un article sur le quotidien « Le Temps » qui portait le titre « Canons à neige, la stratégie du court terme – Une étude épingle la consommation d'eau de Crans-Montana pour ses canons à neige ». Dans cet article, la journaliste Marie Parvex utilise les informations obtenues de l'entretien avec Emmanuel Reynard, professeur à l'Université de Lausanne et directeur de ce travail, de manière inappropriée et trompeuse. Le texte intégral de l'article est reporté à l'annexe 20 .

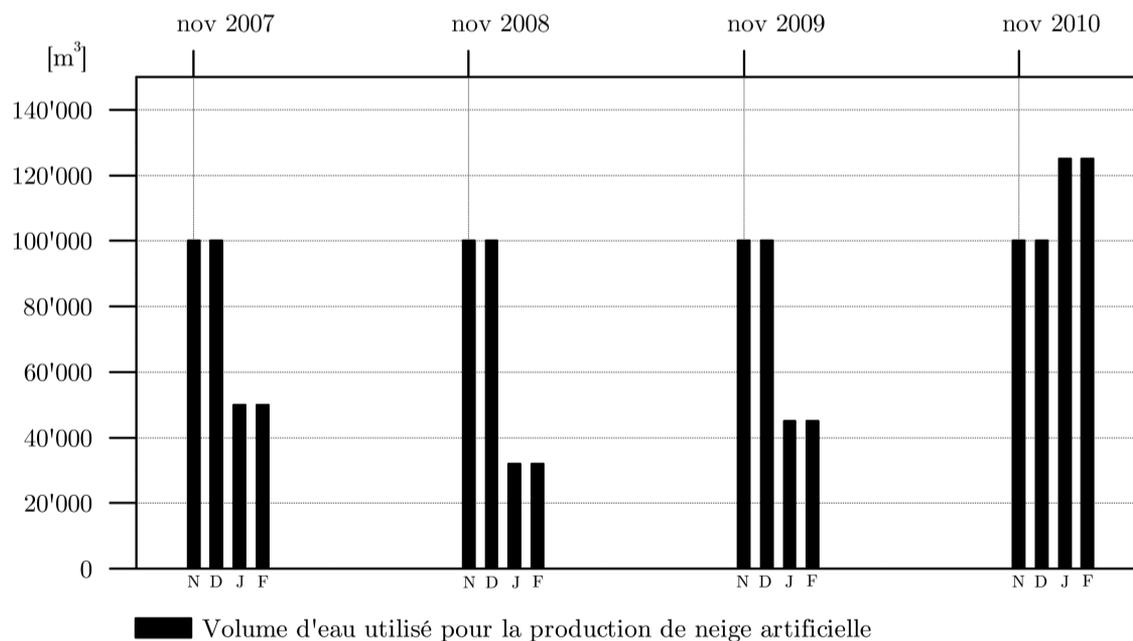


Fig. 4.43 – Estimation de la consommation en eau utilisée pour l'enneigement artificiel.

Source des données de consommation : CMA SA.

La préparation technique « de base » des pistes commence en novembre et continue jusqu'à mi-décembre. Pendant cette période, la production de neige artificielle est particulièrement intense et emploie normalement 200'000 m³ d'eau. En janvier et février, afin d'entretenir les pistes, CMA SA utilise environ 50'000 m³ d'eau par mois, en em-

ployant de grandes quantités d'eau pendant des périodes relativement courtes. Cette situation, selon Arthur Clivaz, n'engendre pas de conflits entre CMA SA et les autres usagers mais, au contraire, elle renforce la collaboration entre ces derniers. Cette collaboration découle de l'intérêt commun des acteurs pour le bon fonctionnement des remontées mécaniques, la plus grande attraction hivernale de la station. Pendant l'hiver 2010-2011, le manque important de précipitations pendant les mois de novembre et décembre (figure 4.43) a nécessité environ 150'000 m³ d'eau supplémentaires. À l'heure actuelle, donc, la quantité de ressource en eau utilisée pendant une saison par CMA SA varie entre 260'000 et 450'000 m³. Étant donné que 1 m³ d'eau produit de 2 à 2,5 m³ de neige (Paccard, 2010), on peut estimer que la production de neige artificielle de CMA SA varie entre 520'000 et 1'125'000 m³ de neige par saison (tableau 4.27). Le tableau 4.27 représente un enneigement homogène sur toute la surface des pistes équipées avec des canons à neige, qui correspond à environ 500'000 m². En réalité, les différents secteurs du domaine skiable ont des nécessités différentes dues à leur exposition, à leur pente et au nombre de passages journaliers des skieurs.

	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Total
Cons. en eau en année ordinaire (2009-2010)	100'000	100'000	50'000	50'000	300'000
m ³ de neige produite par m ² [cm]	40-50	40-50	20-25	20-25	120-150

	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Total
Cons. en eau en année extraordinaire (2010-2011)	100'000	100'000	125'000	125'000	450'000
m ³ de neige produite par m ² [cm]	40-50	40-50	50-63	50-63	180-227

Tab. 4.27 – Consommation en eau utilisée pour l'enneigement artificiel.

4.8 Conclusions

4.8.1 Considérations générales

La quantité d'eau utilisée dans une région comme celle de Crans-Montana-Sierre varie à l'échelle temporelle et à l'échelle spatiale. Cette variation se manifeste à cause du dynamisme complexe du système, qui reflète l'assortiment des facteurs internes et externes qui l'influencent. Le milieu physique et les conditions climatiques sont les principaux facteurs influençant de la quantité de ressource à disposition. L'utilisation de l'eau est dépendante du besoin en eau des acteurs de la région, qui utilisent la ressource pour toute la série d'usages qui ont été analysés dans les chapitres précédents. En plus d'influencer la disponibilité des ressources en eau, le climat joue un rôle important aussi en ce qui concerne la demande en eau des acteurs de la région. Ceci est valable pour l'irrigation, l'eau potable et également pour la production de neige artificielle. Il est difficile de s'exprimer sur l'influence du climat sur la demande en eau de l'hydroélectricité car la demande d'électricité ne provient pas principalement de la région de Crans-Montana-Sierre.

Le choix de mettre l'accent sur les années 2010 et 2011 a été forcé par la gestion du projet et par la synchronisation entre les Working Packages. En 2010, les conditions météorologiques ne sont pas très différentes de la moyenne (Fallot, 2011 ; MétéoSuisse, 2010c ; cf. chapitre 4.3), même si l'ensoleillement du mois d'août a été déficitaire. En termes généraux, l'année 2010 est à considérer comme « normale », ce qui permet de faire une comparaison avec les années qui présentent des anomalies climatiques importantes, comme par exemple 2003 et 2011 (OFEV, 2009, 2011c et Fallot, 2012). Toute la démarche de cet essai de quantification des usages de l'eau a mis en évidence l'hétérogénéité et le manque de données qui affectent la zone d'étude. L'optimisme initial a donc été refroidi par les circonstances, qui ont nécessité plusieurs modifications du plan de travail initialement prévu. Cette situation a comporté l'apprentissage et l'application d'approches alternatives, comme l'estimation du besoin en eau des cultures. Ces dernières ont permis de franchir les difficultés causées par le manque de données et de poser les bases idéales pour la prochaine étape de ce travail qui aura la tâche d'évaluer la possible évolution des usages de l'eau à l'horizon 2050, en prenant en considération les visions socio-économiques élaborées en collaboration avec les acteurs locaux du groupe de suivi RégiEau.

4.8.2 L'usage de la ressource en eau en 2010 et 2011

Les figures 4.44 et 4.45 résument la quantité d'eau utilisée pour chaque usage pendant les années 2010 et 2011 et offrent une bonne vue d'ensemble de la concentration temporelle de l'usage de l'eau pour les usages analysés. Dans les chapitres précédents, l'évolution de la quantité d'eau a été traitée usage par usage, tandis que les figures 4.44 et 4.45 résument finalement le résultat de ces analyses et permettent d'avoir une estimation complète du besoin en eau dans la région de Crans-Montana-Sierre.

La consommation d'eau potable augmente pendant les mois les plus chauds de l'année. Cette quantité supplémentaire correspond à environ un huitième de la consommation annuelle totale de la région et est probablement engendrée par l'irrigation des jardins et des pelouses (ZRI).

D'après la figure 4.44, l'agriculture, qui dépend fortement des conditions météorologiques, semble être l'usage qui varie le plus pendant l'année. En fait, la simulation effectuée à l'aide de MABIA pour quantifier le besoin en eau des cultures pour éviter le stress hydrique, a porté à des résultats qui peuvent varier considérablement d'une année à l'autre et, également, d'un mois à l'autre (Reynard et Bonriposi, 2012). La différence de la demande en eau non satisfaite entre 2010 et 2011 est évidente et déterminée par les conditions météorologiques particulières qui ont caractérisé ces deux années. Le printemps 2011 a été particulièrement demandeur en eau à cause de la sécheresse printanière (Météosuisse, 2011b). Nous ne sommes pas au courant de la quantité d'eau utilisée pour enneiger artificiellement au mois de novembre et décembre 2011, mais le volume employé est certainement proche de celui des années précédentes. L'hydroélectricité n'a pas été intégrée dans la figure 4.44 à cause de l'importance de la quantité d'eau qu'elle utilise et qui cache les usages les moins importants en termes quantitatifs (figure 4.45). En ce qui concerne la représentativité de l'entier du projet MontanAqua, il s'avère extrêmement important d'avoir pu étudier une année (2011) affectée par la sécheresse. En fait, à l'avenir, les périodes de sécheresse persistantes pourraient se multiplier et devenir, sinon la normalité, des phénomènes plutôt récurrents (OFEV, 2012a).

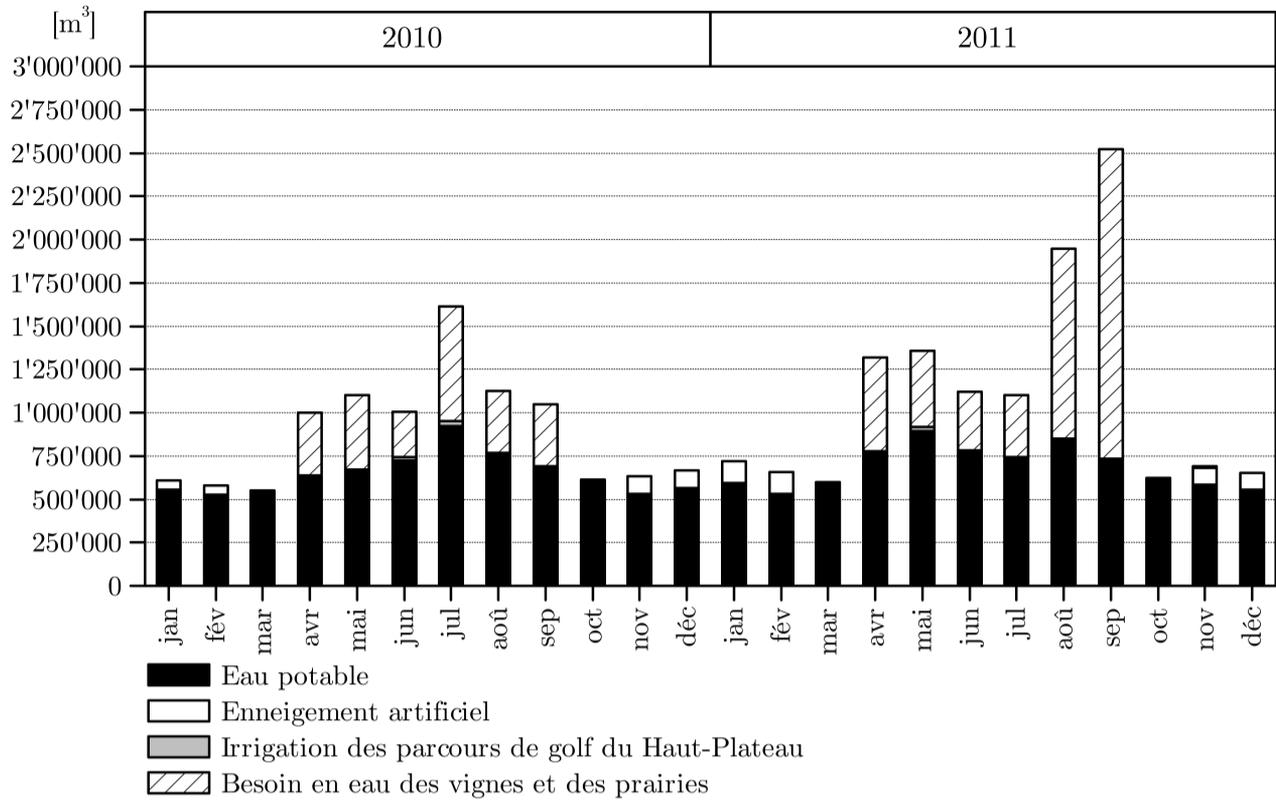


Fig. 4.44 – Usage de l’eau en 2010 et 2011 dans la région de Crans-Montana-Sierre (l’hydroélectricité a été omise).

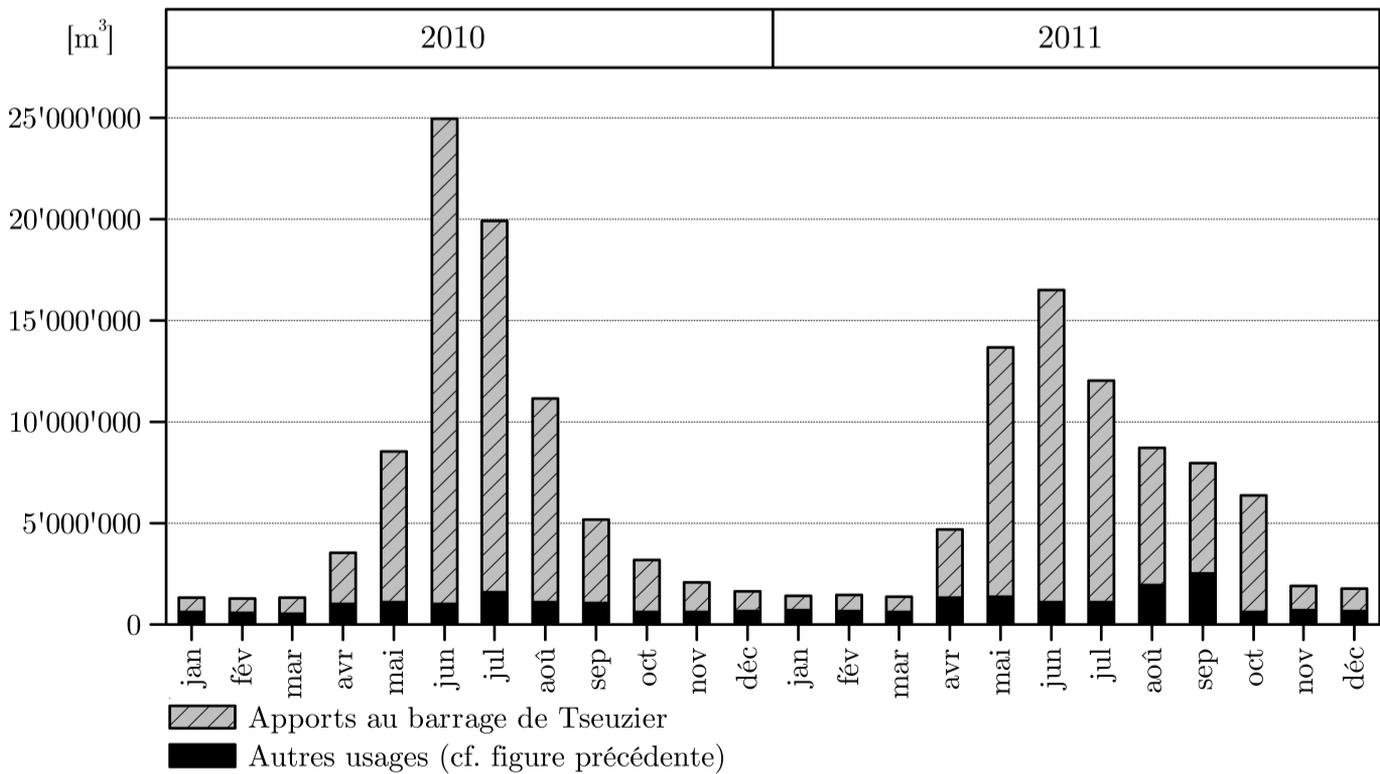


Fig. 4.45 – Usage de l’eau en 2010 et 2011 dans la région de Crans-Montana-Sierre.

Cinquième chapitre

Les usages futurs de l'eau

5.1 Introduction

Le but de cette partie du travail est d'estimer les possibles évolutions de la consommation d'eau de la région de Crans-Montana-Sierre à l'horizon 2050. Cette tâche est complexe et ambitieuse, l'évaluation précise de l'évolution future de la demande en eau dépendant de plusieurs facteurs. De plus, la quantité de connaissances et de variables inconnues pour ce calcul est considérable (Khatri et Vairavamoorthy, 2009). L'accent sera mis sur la démarche utilisée pour la prévision de l'évolution de l'usage de l'eau, sur les difficultés rencontrées pendant la démarche, sur les variables non prises en considération et sur les résultats de la simulation. Ce travail pourra ainsi servir de point de départ pour des futures recherches sur la même thématique dans d'autres régions d'étude. Dans chaque chapitre, les données utilisées et celles qui auraient été nécessaires pour obtenir des résultats optimaux seront évoquées.

5.2 Les scénarios climatiques

Le climat est un système dynamique extrêmement complexe en constante évolution qui affecte toutes les activités humaines (Lindzen, 1994). Par conséquent, sa variation porte à une modification du comportement des membres de la société (GIEC, 2008). Les usages de l'eau sont fortement influencés par le climat et pour en prévoir l'évolution, l'application de scénarios climatiques s'avère nécessaire. Les scénarios climatiques CH2011, ont été développés par une équipe d'experts faisant partie de C2SM, MétéoSuisse, ETH Zürich, NCCR Climate et OcCC ; ils s'appuient sur les résultats du plus récent rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), publié en 2007 et le projet européen ENSEMBLES (2009).

La topographie du territoire suisse, qui est fortement « lissée » par les modèles climatiques globaux et régionaux (MCG et MCR), a nécessité l'application d'une technique de downscaling (figure 5.1) performante (Bosshard et al., 2011).

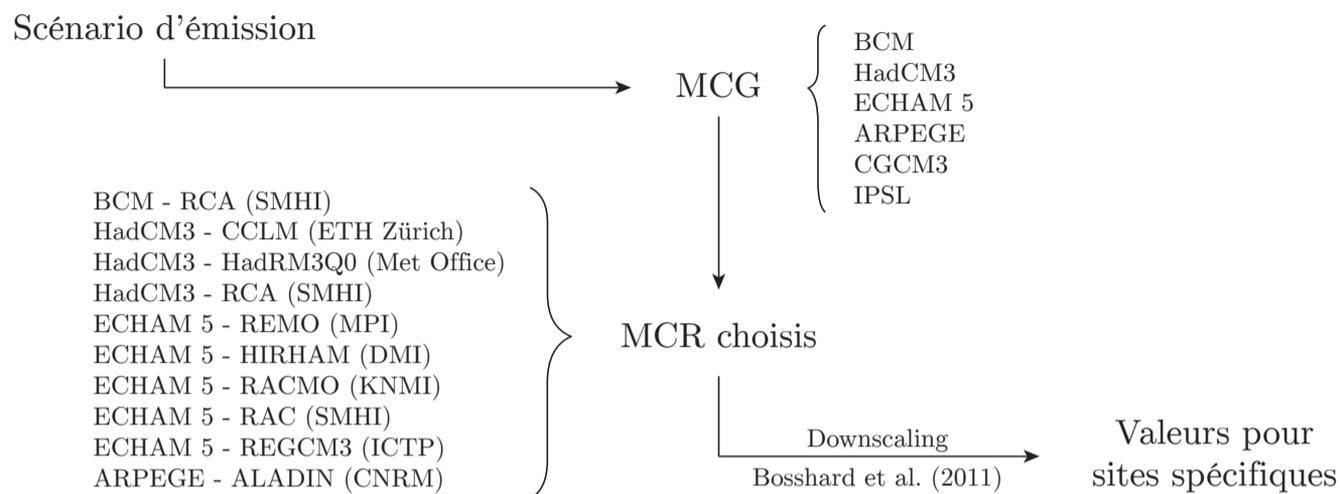


Fig. 5.1 – L'adaptation des scénarios climatiques à des sites spécifiques.

Source des données : CH2011, 2011(modifié).

Pour faire face à ce défi, Bosshard et al. (2011) ont élaboré une méthode capable d'obtenir des résultats pour des sites spécifiques (CH2011, 2011), qui a permis de calculer les variations des scénarios climatiques selon les dix MCR choisis pour chaque station météorologique de Meteosuisse. Les valeurs calculées par Bosshard et al. (2011) représentent des « delta change », c'est-à-dire des coefficients à appliquer aux données journalières de température et précipitations de la période de référence (1980-2009) pour prévoir le climat à l'horizon 2050, 2075 et 2100. Dans le cadre de ce travail, seule les prévisions à l'horizon 2050 seront utilisées (2021-2050). Les coefficients concernant la température sont additifs, alors que ceux pour les précipitations sont multiplicatifs. À titre d'exemple, la figure 5.2 montre les coefficients de variation « delta change » appliqués aux données enregistrées par la stations de Montana. La ligne en tirets représente la moyenne des dix scénarios choisis et c'est sur ce dernier que nous allons nous concentrer pour les observations suivantes (figure 5.2) :

- la variation de température est légèrement plus élevée au début et au milieu de l'année ;
- la variation de température entre mars et avril est légèrement plus faible ;
- les précipitations devraient diminuer pendant les mois de février, mars, juin, juillet et août ;
- les précipitations devraient augmenter entre septembre et janvier et également en avril et mai.

En appliquant les « delta change » aux données enregistrées entre 1980 et 2009, on obtient des séries de données avec température et précipitations qui varient selon le scénario climatique utilisé, mais avec une distribution des événements météorologiques inchangée. Cela signifie que la série temporelle 1980-2009 est reportée à 2021-2050 sans modifier la répartition des précipitations à l'échelle temporelle, mais seulement leur aspect quantitatif. Les mêmes observations sont valables pour la température. Les séries de données obtenues ne sont donc pas à considérer comme une prévision ponctuelle, mais comme une variation de la tendance des données historiques.

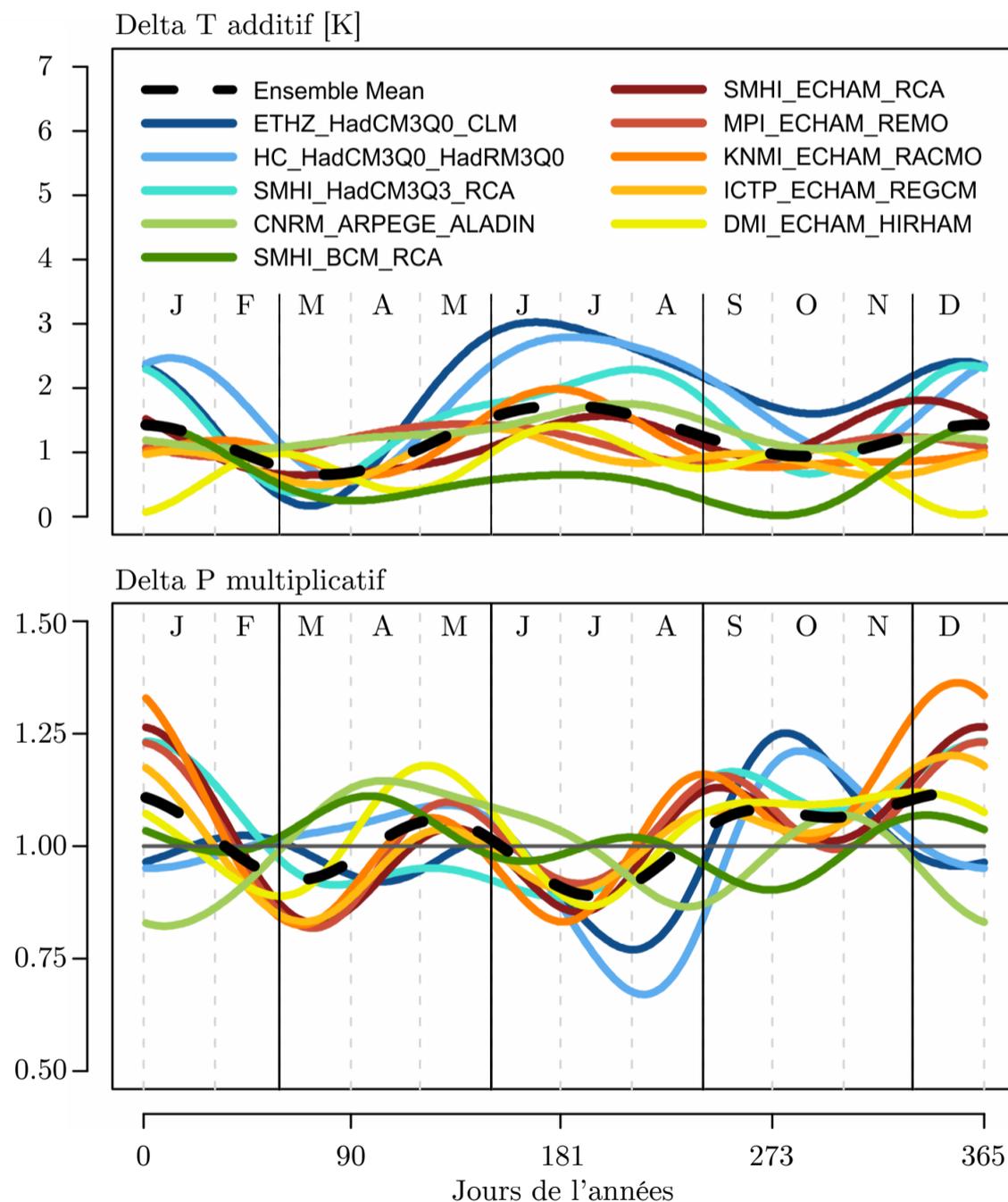


Fig. 5.2 – Coefficients de variation pour la station météorologique de Montana.

Source : Bosshard et al. (2011) (modifié).

5.3 Visions de futurs possibles et scénarios socio-économiques

La conception des stratégies de développement qui mènent aux visions futures, développées sous la direction de Flurina Schneider - coordinatrice au sein du projet MontanAqua - a vu la participation de toute l'équipe du projet et du groupe RégiEau (Briguet, 2012). Lors de la réunion du groupe RégiEau du 22 juin 2011, les acteurs locaux n'ont pas su formuler une vision de développement régional partagée par tous les intervenants et ils ont donc demandé aux chercheurs présents d'élaborer trois visions sur la base des discussions eues pendant l'atelier et de les présenter lors de la réunion suivante (Schneider et Rist, 2013). Dans un premier temps, les variables à inclure dans les stratégies de développement ont été choisies au sein du groupe de projet MontanAqua (démographie, consommation d'eau potable, tourisme, agriculture, vignoble, hydroélectricité, infrastructures de l'eau, institutions et collaborations). La création de trois stratégies plausibles a ensuite été réalisée. Ces stratégies se distinguent entre elles par leur orientation : expansion, stabilisation et modération. La liste complète des variables pour chaque vision est consultable à l'annexe 21 ; les principes directeurs des scénarios sont résumés dans le tableau 5.1 (entre parenthèses, le nombre qui leur a été attribué).

Stratégie d'expansion (1a et 1b)*
La croissance est au centre du développement de la région. Le tourisme de masse, les activités lucratives et les résidences secondaires sont au centre des activités. Les ressources en eau et le paysage sont des éléments importants, mais ne sont pas la première priorité. En effet, grâce aux mesures d'ingénierie disponibles, l'approvisionnement en eau est assuré (gestion par l'offre).
Stratégie de stabilisation (2)
L'eau et le paysage sont parmi les ressources les plus importantes de la région. Ces éléments sont indispensables tant pour le tourisme que pour le bien-être de la population locale. Pour cette raison, le développement régional de la région Crans-Montana-Sierre est plutôt basé sur des approches alternatives visant à une utilisation optimale des ressources. La gestion de l'eau se concentre en particulier sur l'optimisation de la consommation d'eau (gestion par la demande).
Stratégie de modération (3)
Le développement de la région de Crans-Montana-Sierre est orienté principalement vers l'amélioration de la qualité de vie des résidents et des visiteurs. La création d'emplois est toute aussi importante qu'une quantité suffisante d'eau potable et le maintien d'un paysage culturel sain. Les utilisations de l'eau et du paysage sont alignées sur le cycle de l'économie locale.

Tab. 5.1 – Principes directeurs des scénarios socio-économiques.

* Le scénario 1a se base sur une croissance démographique plus élevée que le scénario 1b.

Source : Schneider, 2011.

Le 23 février 2012, les membres du groupe RégiEau ont eu l'occasion de s'exprimer par rapport à ces scénarios en votant pour celui qu'ils préféreraient pour chaque variable (annexe 22). Pendant ce processus, l'ambiance à l'intérieur du groupe RégiEau s'est faite considérablement plus collaborative, par rapport à la réunion précédente

du 22 juin 2011, car la volonté de parvenir à un accord a prévalu sur les points de désaccord (Schneider et Rist, 2013). Cette évolution n'est pas due exclusivement à l'intégration progressive des acteurs locaux dans la démarche du projet MontanAqua et à une confiance réciproque accrue, mais également à l'atténuation (au moins temporaire) des tensions d'ordre politique et économique entre une partie des acteurs locaux (Schneider et Rist, 2013). Les intervenants pouvaient exprimer 11 votes favorables (un vote pour chaque variable) et seulement 5 votes défavorables : de cette manière une opposition systématique était impossible et, par conséquent, la démarche entière ne risquait pas un éclat (Schneider et Rist, 2013). Cette réunion a ainsi abouti à la création d'une quatrième vision, nommée « RégiEau », fruit du consensus de la plupart des intervenants à la réunion (tableau 5.2)

Stratégie RégiEau (4)
L'agriculture est d'une grande importance pour la région (production alimentaire), et au service du tourisme, de la conservation et de l'entretien du paysage. La production est centrée sur les produits locaux et sur l'élevage de la race d'Hérens et d'ovins. Selon l'emplacement, on trouve également des chèvres. Globalement, on observe une diversification et une conversion vers l'agriculture biologique. L'économie alpestre joue un rôle important et de nombreuses entreprises pourraient survivre grâce à une législation adaptée et aux produits de l'agrotourisme.

Tab. 5.2 – Principes directeurs de la vision future du groupe RégiEau.

Source : Schneider, 2011.

5.3.1 Conciliation des visions futures avec les scénarios quantitatifs

Avant d'approfondir ce sujet, il est nécessaire de mettre l'accent sur les caractéristiques des visions et de leurs stratégies, qui ne représentent pas des prévisions, mais des expressions de la volonté politique des acteurs de la région. Parmi le nombre infini de futurs possibles, les quatre visions représentent une fourchette représentative mais non exhaustive de ce qui pourrait se passer dans la région d'ici à 2050, et c'est dans cet esprit qu'il faut les considérer.

Les stratégies de développement (tableaux 5.1 et 5.2) ont été conçues dans le détail par les membres de l'équipe du projet MontanAqua. Cet intense et complexe travail peut être divisé schématiquement de la manière suivante :

1. proposition d'inscription dans la démarche d'une nouvelle variable dépendante de celles des stratégies de développement (par exemple l'évolution démographique) ;
2. discussion de la pertinence de la nouvelle variable par rapport aux objectifs de la recherche ;
3. évaluation de la faisabilité du point 1 ;

4. recherche des données existantes aptes à supporter le procédé ;
5. réflexion sur les implications de cette variable par rapport aux autres choisies ;
6. intégration dans une grande feuille de travail (littéralement) et ;
7. conception des variations de la nouvelle variable par rapport aux différentes stratégies de développement.

Cette démarche est innovatrice et, à notre connaissance, aucune littérature n'existe à ce sujet. Il a donc fallu de nombreuses heures de discussion entre les chercheurs de MontanAqua (surtout entre Flurina Schneider, Emmanuel Reynard et les doctorants des trois Work Packages du projet) pour aboutir à des conclusions plausibles. Plusieurs fois, nous avons dû abandonner une piste de recherche à cause du manque de données sur l'ensemble de la région, en nous contentant de réaliser des études de cas ou en abandonnant le sujet.

Cette démarche est hybride. Combinant données et conceptions subjectives, elle a permis de comprendre quels sont les impacts des changements socio-économiques sur le territoire et la demande en eau qu'il génère. En ce qui concerne les conceptions de futurs possibles, la possibilité de travailler activement avec les acteurs locaux s'est avérée indispensable.

Dans la suite du chapitre, les variables socio-économiques les plus importantes utilisées pour l'estimation de la demande en eau de la région en 2050 sont mises en évidence. Une attention particulière a été accordée à la description de la démarche et des données utilisées.

Les changements démographiques

L'évolution démographique de la région de Crans-Montana-Sierre est l'un des facteurs qui influencera le plus la quantité d'eau utilisée en 2050. Par conséquent, l'estimation du nombre futur d'habitants de la région se révèle fondamentale. Les trois scénarios démographiques que l'OVS (2011) a élaborés pour le Valais à l'horizon 2035 ont été prolongés jusqu'à 2050 en exploitant la tendance linéaire du nombre d'habitants prévus entre 2015 et 2035. Selon l'OVS (2011), le Valais central représentait en 2010 39.4% de la population du canton, ce qui correspond à une augmentation de 0.1% par rapport à 1991 et, par conséquent, à une certaine stabilité démographique (tableau 5.3).

L'évolution de la population de l'ensemble du Valais central représente la voie du milieu entre le Bas-Valais, plus dynamique et avec une plus forte croissance démographique, et le Haut-Valais, qui voit sa population se réduire. Les scénarios de l'OVS pour le Valais central, ont été appliqués à la population des communes de la zone d'étude sans modifications. À cause des caractéristiques des communes (proximité à la ville, disponibilité de logements, prix des terrains, etc.), l'évolution démographique à l'échelle

Année	Haut-Valais	Valais central	Bas-Valais
1991	28.5%	39.3%	32.2%
2010	25.9%	39.4%	34.8%
Variation	-2.6%	0.1%	2.6%

Tab. 5.3 – Population résidente en Valais par région.

Source des données : l'OVS, 2011.

communale n'aura très probablement pas la même intensité dans toutes les communes de la région de Crans-Montana-Sierre, mais les dynamiques communales et intercommunales futures de la zone d'étude sont difficiles à estimer car elles sont influencées par une multitude de facteurs socio-économiques difficilement prévisibles et qui peuvent changer soudainement (par exemple lors d'une fusion entre communes ou d'une variation de la conjoncture économique ou encore d'un changement politique tel que celui découlant de l'adoption de l'initiative Weber en mars 2012). Comme il est difficile de connaître l'évolution de ces facteurs à l'horizon 2050, nous avons appliqué de manière uniforme les scénarios démographiques à l'échelle communale. Entre 2010 et 2035, la croissance démographique sera due avant tout aux soldes migratoires internationaux (OFS, 2011). Selon l'OFS (2011), le vieillissement et la concentration de la population autour des métropoles (Zurich et Arc lémanique) influenceront également l'évolution démographique de la zone d'étude. Le scénario AR-00-2010 « moyen » (Sc2 dans la figure 5.3) est considéré par l'OVS (2011) comme le plus plausible. Cette évolution démographique a également été retenue comme la plus probable par les acteurs locaux qui ont participé à la séance du groupe RégiEau du 23 février 2012. Ce scénario prévoit une croissance démographique plutôt faible et régulière qui portera la population de la zone d'étude à environ 42'500 habitants en 2050, c'est-à-dire approximativement 6'000 de plus qu'en 2010. Bien que considérés comme moins probables par les acteurs locaux, les scénarios AR-00-2010 « bas » (Sc3 dans la figure 5.3) et « haut » (Sc1b dans la figure 5.3) seront également pris en considération, car ils représentent les limites supérieure et inférieure des évolutions démographiques plausibles OVS (2011). Un dernier scénario démographique a été ajouté à ceux élaborés par l'OVS. Ce dernier, plus extrême en terme de croissance de la population par rapport aux autres, prolonge à l'horizon 2050 le taux de croissance 2000-2010 et propose une population future de 54'260 résidents (Sc1a dans la figure 5.3).

Les facteurs appliqués à la population touristique

La fréquentation touristique constitue un indicateur fondamental de la santé d'une station touristique, mais prévoir précisément son évolution future est une tâche difficile car elle dépend fortement de l'évolution de la conjoncture économique, tant locale que

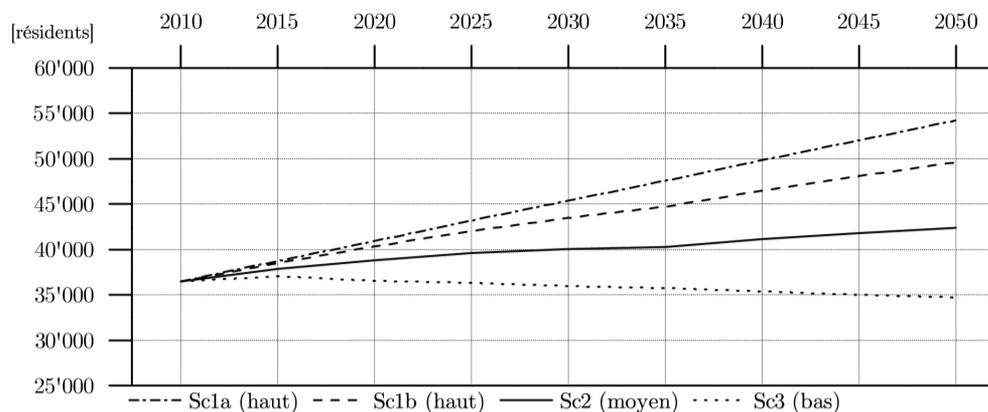


Fig. 5.3 – Scénarios AR-00-2010 appliqués à la zone d'étude.

Source des données : OVS, 2011.

globale. Les visions qualitatives concordent sur le fait que le tourisme est l'un des piliers les plus importants de l'économie régionale et qu'il faut faire le possible pour le soutenir. Même s'ils partagent ce principe, les scénarios se distinguent de la manière suivante :

- La stratégie d'expansion met l'accent sur le tourisme de masse axé sur le ski (entre décembre et mars) et le golf (entre avril et octobre),
- La stratégie de stabilisation vise à rendre la station plus attractive tout au long de l'année.
- La stratégie de modération voit le développement d'un « tourisme doux » comme la meilleure option pour la station.
- La stratégie du groupe RégiEau est identique à celle de stabilisation.

Afin que la quantification de la fréquentation touristique future ait des bases solides, il est nécessaire de s'appuyer sur des données préexistantes et sur leur différence avec la situation actuelle. Au sommet de sa période de splendeur, avant la crise économique des années 1990, la station de Crans-Montana arrivait à compter plus de 1.8 millions de nuitées par année. Aujourd'hui, les nuitées sont stables à 1.2 millions par année. La station pourrait donc accueillir 1.5 fois plus de touristes qu'actuellement, sans devoir trop adapter ses infrastructures. Cette constatation a permis d'attribuer à chaque stratégie de développement un facteur multiplicatif entre 1 et 1.5 (tableau 5.4).

Mois	Expansion	Stabilisation	Modération
DJFM	1.5	1.5	1
AM	1	1.5	1.5
JJAS	1.5	1.5	1.5
ON	1	1.5	1.5

Tab. 5.4 – Facteurs multiplicatifs saisonniers de la fréquentation touristique future.

Il faut remarquer que les facteurs multiplicatifs ne sont jamais inférieurs à 1, même en ce qui concerne le scénario de modération. Ce choix a été fait car tout le monde envisage une renaissance de la station, en étant bien conscient qu'une diminution de la fréquentation touristique pourrait porter à une situation de déclin, sur la carte du tourisme national et international. L'application des facteurs multiplicatifs permet de faire varier le nombre, et surtout la distribution, des nuitées de la fréquentation touristique future. La figure 5.4 montre la distribution potentielle des nuitées hôtelières futures. Les mêmes facteurs multiplicatifs ont été ensuite appliqués à l'estimation des nuitées parahôtelières.

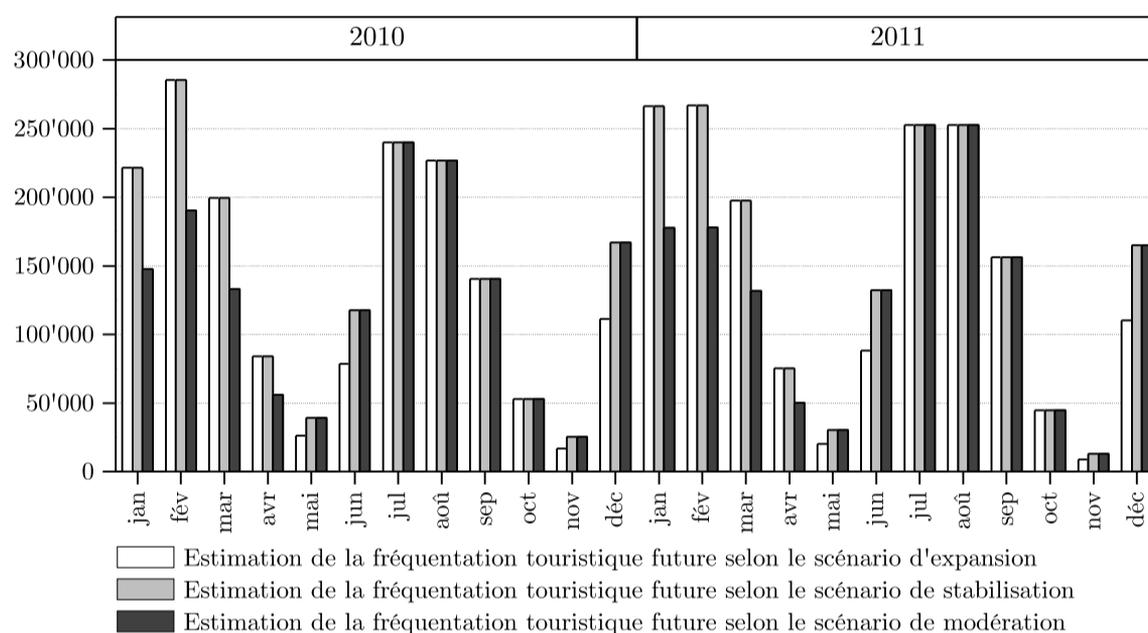


Fig. 5.4 – La fréquentation touristique hôtelière future selon les facteurs multiplicatifs.

Source des données : OFS, 2012.

Facteurs multiplicatifs appliqués aux valeurs mensuelles pour les années 2010 et 2011.

L'évolution de l'utilisation du sol

Rétrospective

Pour fêter ses 175 ans d'existence, l'Office fédéral de topographie Swisstopo donne dès le 17 janvier 2013, la possibilité de faire un « voyage dans le temps » à travers sa page Web⁴⁴. Ce visionneur de cartes topographiques, toutes rigoureusement digitalisées et géoréférencées, a été utilisé pour mieux comprendre l'évolution paysagère dans la région de Crans-Montana-Sierre, en mettant un accent particulier sur l'évolution de la zone à bâtir résidentielle. La première partie de cette rétrospective se base sur les cartes topographiques mises à disposition par Swisstopo et se caractérise par un approche

44. Disponible à l'adresse : <http://www.swisstopo.admin.ch> (consulté le 19 janvier 2013).

qualitative, la deuxième partie, par contre, exploite des données SIG existantes⁴⁵ ce qui permet d'obtenir des résultats plus concrets. Les cartes topographiques de la région de Crans-Montana-Sierre pour les années 1946, 1974 et 1998 sont présentées à l'annexe 23⁴⁶. Ces trois étapes temporelles ont été choisies car elles permettent de montrer la zone d'étude juste après le deuxième conflit mondial, presque à la fin des Trente Glorieuses et après la crise économique des années 1990, tout en gardant un intervalle de temps d'environ un quart de siècle. En comparant 1946 à 1974, les affirmations de Bachmann (1976), qui soulignait le manque de planification et de coordination de la station touristique, reviennent à l'esprit. En fait, pendant cette période, la zone bâtie du Haut-Plateau gagne énormément de surface, en changeant radicalement l'aspect du paysage. Le développement se fait principalement de deux manières :

- En suivant les principales voies de communications existantes et en en créant de nouvelles (annexe 24).
- En occupant les terrains avec les meilleures caractéristiques (pente, exposition et utilisation du sol précédente).

En 1974, sur le Haut-Plateau, ce manque de planification urbaine est désormais évident : le bâti est extrêmement dispersé avec un énorme gaspillage d'espace, qui se fait au détriment des prairies et des pâturages. L'évolution du bâti entre 1974 et 1998 ne change pas significativement. Le vignoble n'est par contre pas touché par le développement de la station touristique à cause de sa localisation (altitude et pente). Entre 1946 et 1974, il gagne de la surface en arrivant à la limite inférieure de la forêt, tandis que pendant la période 1974-1998, il perd quelques hectares sur le coteau de Sierre à cause de la croissance démographique de la ville homonyme et de ses communes périurbaines (Reynard et al., 2007). Pour s'occuper de l'évolution de la zone bâtie résidentielle de la région de Crans-Montana-Sierre en 1998, 2004 et 2010, il faut tout d'abord créer une couche SIG où la construction de nouveaux bâtiments résidentiels est hautement improbable (zone non à bâtir) en exploitant la cartographie la plus précise disponible (Nicklaus, 2012), en ajoutant les routes existantes⁴⁷ (largeur de 10, 6, 4, 3 et 2 m). Des polygones supplémentaires ont été ajoutés « à la main » sur la base de l'observation des photos aériennes (zone industrielle, voie ferrée, autoroutes, carrières, etc.). La couche résultante a ensuite été rastérisée à une résolution de 2 m, tout comme celles contenant les polygones des bâtiments en 1998, 2004 et 2010. Les couches avec les surfaces des bâtiments ont ensuite été ajoutées à la couche de la zone non constructible, ce qui a porté à la création d'un raster contenant deux catégories de surfaces : zone à bâtir potentielle et zone non constructible (qui inclut la zone où la construction de nouveaux bâtiments

45. Données SIG mises à disposition par Marj Tonini, responsable de recherche à l'UNIL.

46. Pour des questions de mise en page et afin de garder une bonne lisibilité, la région d'étude a été divisée en six sous-régions.

47. Données SIG mises à disposition par Marj Tonini, responsable de recherche à l'UNIL.

est hautement improbable et celle déjà bâtie). En diminuant la résolution des raster à 100 m, il est possible d'obtenir des informations hectométriques de la zone potentiellement à bâtir pour chaque étape temporelle. Les rasters obtenus en soustrayant les étapes les plus récentes aux étapes précédentes (2010 moins 2004, 2010 moins 1998 et 2004 moins 1998) montrent la variation de la densité hectométrique de la zone à bâtir potentielle d'une étape à l'autre. Afin d'identifier les zones les plus concernées par la réduction de la zone à bâtir, un filtre de majorité avec quatre voisins a été appliqué. Cet outil de géotraitement, disponible dans le logiciel ArcGIS 10, remplace la valeur des cellules sur la base des valeurs des cellules contiguës (ESRI, 2011).

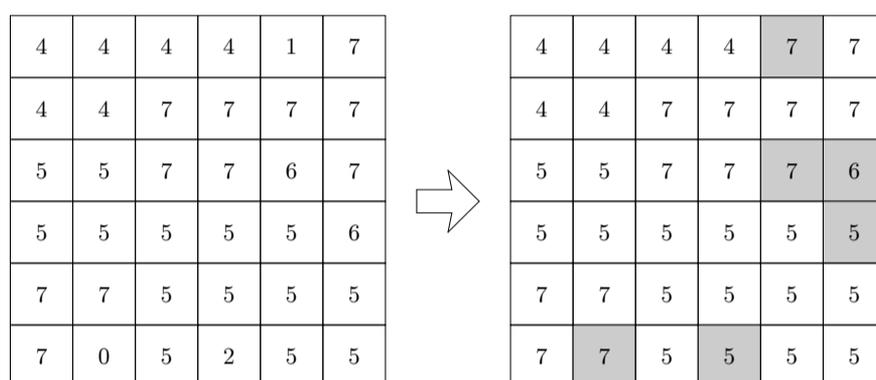


Fig. 5.5 – Les effets de l'application du filtre de majorité.

Source : ESRI, 2011 (modifié).

Le remplacement a lieu seulement si le nombre de cellules voisines ayant la même valeur est suffisamment grand pour être la valeur de majorité. Autrement dit, trois cellules connectées sur quatre doivent avoir la même valeur que le paramètre de majorité (figure 5.5). Deuxièmement, ces cellules doivent être contiguës au centre du filtre spécifié (par exemple, trois des quatre cellules doivent avoir la même valeur). Le filtre de majorité permet donc de lisser le raster obtenu en éliminant systématiquement toutes les cellules isolées, en mettant en évidence les cellules les plus concernées par la réduction de la zone à bâtir. La figure 5.6 montre l'évolution de la zone à bâtir pour l'ensemble de la région d'étude, en mettant en évidence des différences importantes entre les communes. L'évolution de la zone bâtie résidentielle semble dépendre de plusieurs facteurs qui varient en importance d'une commune à l'autre, comme par exemple : la proximité aux voies de communication, la topologie des parcelles, le coût du terrain, l'utilisation précédente de la parcelle et celle actuelle des parcelles contiguës et l'attractivité de la commune (services offerts, distance de la ville la plus proche, etc.). Par conséquent, le développement de la zone bâtie résidentielle de la région de Crans-Montana-Sierre se révèle être très difficile à décrypter. Les communes de la région d'étude se caractérisent

par un développement de la zone bâtie très hétérogène.

L'expansion de la zone bâtie résidentielle des communes de Lens, Sierre, St-Léonard et Veyras servira d'exemple et permettra de mieux comprendre cette variabilité intercommunale :

- La commune de Lens se développe principalement vers le sud-ouest sur le Haut-Plateau et le nord-est en ce qui concerne le village de Lens proprement dit. Cette évolution semble être influencée par la topologie et l'accessibilité aux voies de communication des parcelles concernées.
- La ville de Sierre a densifié son tissu urbain qui était en taches de léopard.
- St-Léonard s'est développé dans la plaine du Rhône et au détriment du vignoble situé au nord du village. Le centre de l'agglomération avait apparemment déjà atteint la densité maximale et il n'a donc pas évolué. Les caractéristiques topologiques et économiques favorisent le développement de l'agglomération sur la rive droite.
- La zone bâtie du village de Veyras a évolué surtout dans la partie sud-ouest, la plus proche de la ville de Sierre. La construction d'immeubles dans cette commune est déterminée par la possibilité d'accéder aux services de la ville de Sierre tout en pouvant bénéficier de la qualité de vie offerte par la commune péri-urbaine (le même discours est valable pour Miège).

De plus, la démarche qui a conduit aux résultats présentés dans la figure 5.6 a mis en évidence que l'évolution de la zone bâtie varie considérablement d'intensité et localisation pour les deux étapes temporelle à notre disposition (1998-2004 et 2004-2010), probable conséquence de l'ouverture de nouvelles zones à bâtir.

Démarche

Prévoir l'évolution d'un nombre élevé de surfaces (prairies, vignoble, vergers, etc.) d'une région comme celle de Crans-Montana-Sierre à une haute résolution (de l'ordre du mètre carré), même en connaissant son évolution dans le passé, comporte plusieurs obstacles. Interrogé sur la faisabilité d'une telle démarche, Michele Volpi, doctorant à l'Université de Lausanne et connaisseur de cette thématique, a mis en évidence quatre points fondamentaux à prendre en considération :

- plus la résolution de l'analyse est haute, plus la tâche devient complexe ;
- la marge d'erreur peut facilement être plus grande de la valeur estimée ;
- il faut utiliser un modèle qui marche de manière impeccable pour le passé (par exemple pour la période 1980-2000) et ensuite le modifier pour l'adapter à la prévision des surfaces futures ;
- la difficulté de valider les résultats est proportionnelle à la résolution de l'analyse.

La prévision des surfaces futures dans la zone d'étude du projet MontanAqua se révèle donc une tâche manifestement difficile et avec une marge d'erreur qui est potentiel-

lement très importante. Quantifier et localiser l'évolution de l'utilisation du sol : un défi impossible à relever ? À une si haute résolution et pour un nombre si important d'utilisations du sol, malheureusement oui ! Même en disposant de toutes les données nécessaires, la difficulté de calibration du modèle pour la période passée reste extrêmement complexe et la marge d'erreur non acceptable pour y baser des décisions politiques. Jusqu'à maintenant, en ce qui concerne l'évolution de l'utilisation du sol, la taille de la région de Crans-Montana-Sierre et la haute résolution d'analyse semblent représenter un obstacle à notre démarche. De l'autre côté de la médaille, il y a la possibilité de collaborer avec les acteurs locaux. Les cartes de l'utilisation future du sol sont le résultat d'une démarche hybride, qui a pu compter sur l'expérience personnelle (et par définition subjective) des acteurs locaux, et qui a été ensuite traduite dans des scénarios futurs construits *ad hoc* (par conséquent, ils ne sont pas applicables à d'autres zones d'étude). À la fin, nous avons opté pour toute une série de variations de changements de l'utilisation du sol que nous avons considérés compatibles avec les stratégies de développement élaborée au sein du projet (tableau 5.5 et figure 5.7).

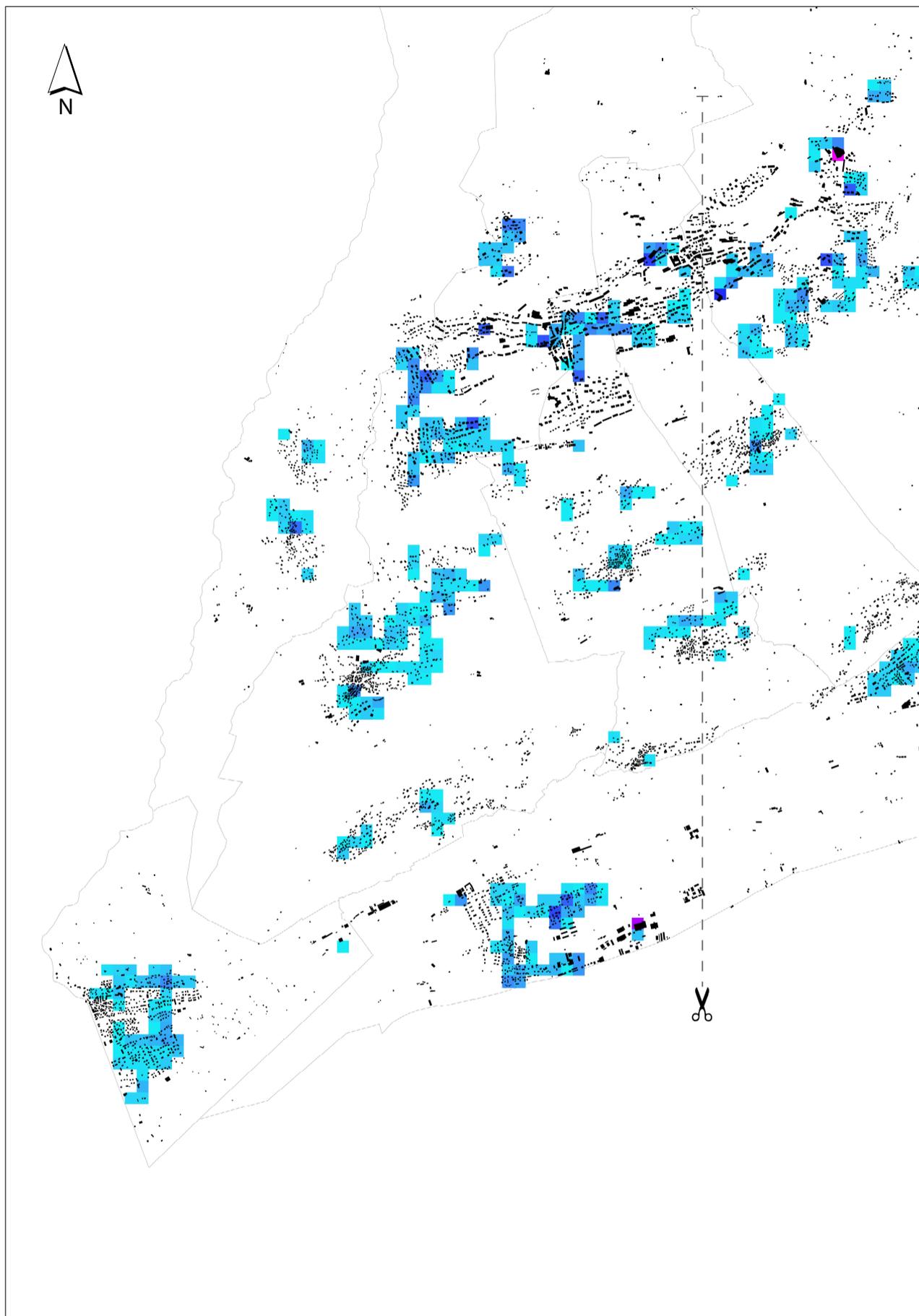


Fig. 5.6 – L'évolution de la zone bâtie entre 1998 et 2010 (ouest).

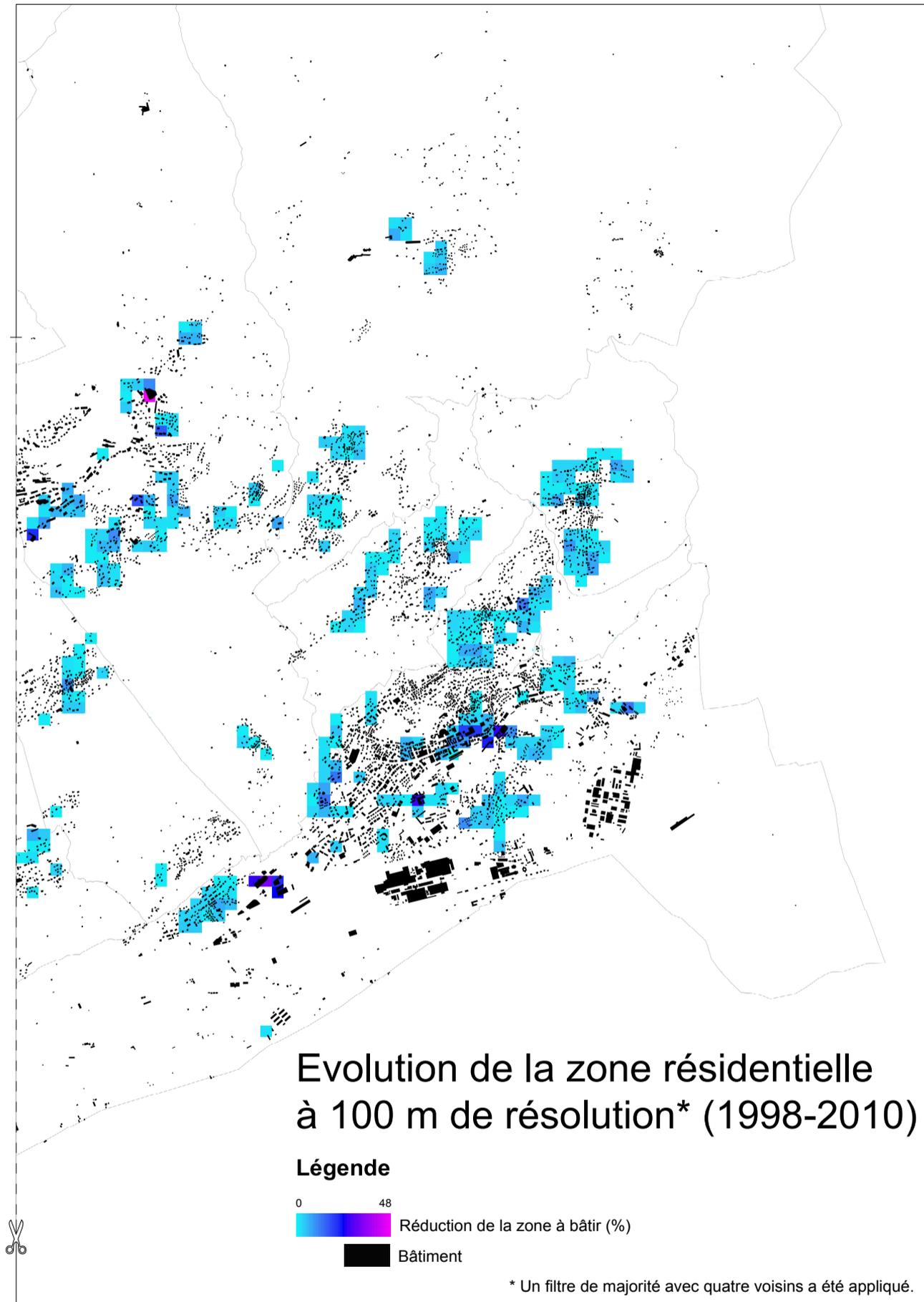


Fig. 5.6 – L'évolution de la zone bâtie entre 1998 et 2010 (est).

Scénarios 1a et 1b	Scénario 2
<p>Surface bâtie Les scénarios démographiques déterminent la dimension du tampon appliqué aux bâtiments de la surface bâtie actuelle. En ce qui concerne le scénario démographique du Sc1a, les parcelles en zone à bâtir situées à une distance de 269 m ont été considérées. Pour le scénario démographique du Sc1b par contre, la distance susmentionnée est de 20.5 m.</p> <p>Parcours de golf Le nouveau parcours de Montana-Randogne a été construit.</p> <p>Forêt La limite supérieure de la forêt atteint l'altitude potentielle indiquée par Pecher et al. (2011) : 2'100 m d'altitude.</p> <p>Alpage La surface d'alpage diminue en fonction de l'augmentation d'altitude de la forêt.</p> <p>Surface irriguée Par rapport à l'actuel, les zones irriguées gardent la même localisation, mais leur surface diminue, principalement à cause de la croissance de la zone bâtie.</p> <p>Vignoble La limite supérieure du vignoble s'élève de 200 m.</p>	<p>Surface bâtie Les scénarios démographiques déterminent la dimension du tampon appliqué aux bâtiments de la surface bâtie actuelle. En ce qui concerne le scénario démographique du Sc2, les parcelles en zone à bâtir situées à une distance de 2.75 m ont été considérées.</p> <p>Parcours de golf Pas de changements.</p> <p>Forêt Diminution de la surface occupée actuellement en fonction de l'agrandissement de la zone bâtie.</p> <p>Alpage Diminution de la surface occupée actuellement en fonction de l'agrandissement de la zone bâtie.</p> <p>Surface irriguée Par rapport à l'actuel, les zones irriguées augmentent. Les parcelles qui se trouvent à moins de 30 m des surfaces actuellement irriguées sont concernées.</p> <p>Vignoble Diminution de la surface occupée actuellement en fonction de l'agrandissement de la zone bâtie.</p>
Scénario 3	Scénario RégiEau
<p>Surface bâtie Similaire à celle de 2010.</p> <p>Parcours de golf Le parcours de Noës est converti en surface irriguée.</p> <p>Forêt Similaire à celle de 2010.</p> <p>Alpage Similaire à celle de 2010.</p> <p>Surface irriguée Par rapport à l'actuel, les zones irriguées augmentent. Les parcelles qui se trouvent à moins de 30 m des surfaces actuellement irriguées sont concernées.</p> <p>Vignoble La limite supérieure du vignoble s'élève de 200 m.</p>	<p>Surface bâtie Les scénarios démographiques déterminent la dimension du tampon appliqué aux bâtiments de la surface bâtie actuelle. En ce qui concerne le scénario démographique AR-00-2010 Moyen, les parcelles en zone à bâtir situées à une distance de 2.75 m ont été considérées.</p> <p>Parcours de golf Similaire à celle de 2010.</p> <p>Forêt Similaire à celle de 2010.</p> <p>Alpage Similaire à celle de 2010.</p> <p>Surface irriguée Par rapport à l'actuel, les zones irriguées augmentent. Les parcelles qui se trouvent à moins de 30 m des surfaces actuellement irriguées sont concernées.</p> <p>Vignoble La limite supérieure du vignoble s'élève de 200 m.</p>

Tab. 5.5 – Résumé des variations des surfaces

Source : Emmanuel Rey (modifié).

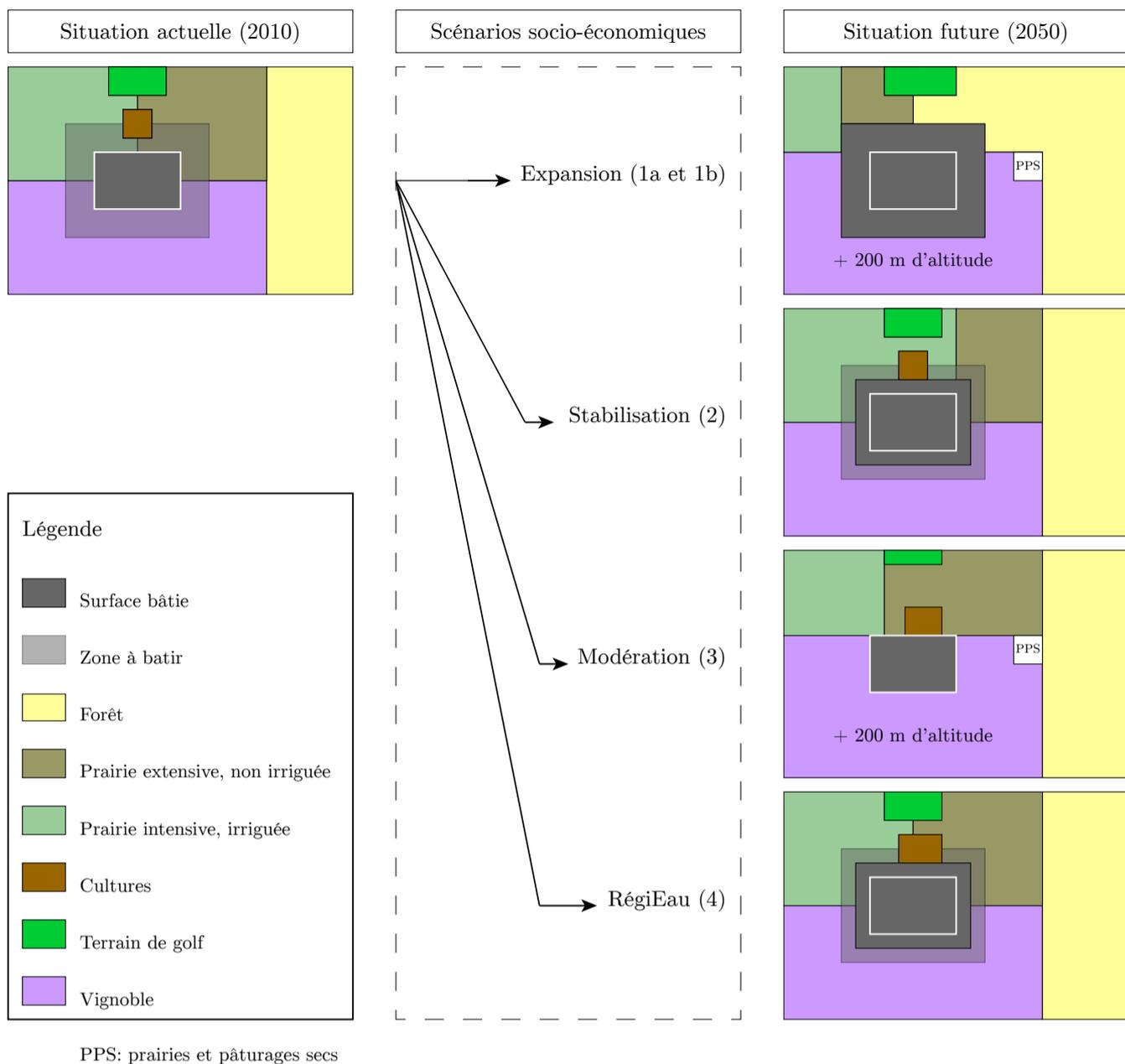


Fig. 5.7 – Schéma de la variation de l'utilisation du sol par scénario socio-économique

Source : Emmanuel Rey et Flurina Schneider (vectorisé et modifié).

Résultats

La figure 5.8 montre les effets que les changements d'utilisation de sol décrits dans le tableau 5.5 et dans la figure 5.7 ont sur les prairies irriguées et sur les vignes, les surfaces qui feront l'objet de recherche dans le chapitre 5.4.2. Si pour ces dernières la variation est réduite, pour la prairie irriguée le taux de variation change nettement entre un scénario socio-économique et l'autre. Le scénario 4 (RégieEau) est de loin celui qui varie le moins par rapport à l'actuel (Nicklaus, 2012), soit en ce qui concerne l'extension du vignoble que pour celle des prairies irriguées. Les scénarios d'expansion (1a et 1b) incluent une diminution des deux typologies de surfaces, qui se fait à l'avantage de la zone bâtie. Dans le scénario 2, toutes les prairies de la région sont irriguées, ce qui fait augmenter considérablement cette surface, le vignoble se réduit ici de façon mo-

dérée. Le scénario 3, celui de modération, prévoit une diminution des prairies irriguées comme dans les scénarios 1a et 1b, mais pas à cause de l'expansion de la zone bâtie. La surface dédiée au vignoble augmente ici de façon modeste à cause de l'augmentation de l'altitude maximale (+ 200 m).

Discussion

La démarche choisie au sein du projet pour produire les cartes concernant les scénarios économiques à l'horizon 2050 a deux limites principales :

1. La non prise en compte de l'évolution des surfaces en cours ;
2. Le manque de validation des résultats obtenus, ce qui détermine l'impossibilité de calculer une marge d'erreur.

Les cartes produites sur ces bases n'ont pas de signification géographique. Malgré cet inconvénient, les cartes produites par Emmanuel Rey sur la base du schéma contenu dans la figure 5.7 permettent d'évaluer l'impact de la variation des surfaces cultivées et de faire une comparaison avec l'influence des scénarios climatiques. En raison des lacunes méthodologiques de la démarche utilisée, tout ce qui en résulte n'est pas à considérer comme une prévision au sens strict du terme, mais plutôt une évolution qui a une possibilité indéfinie de se concrétiser, c'est-à-dire des visions de futurs possibles.

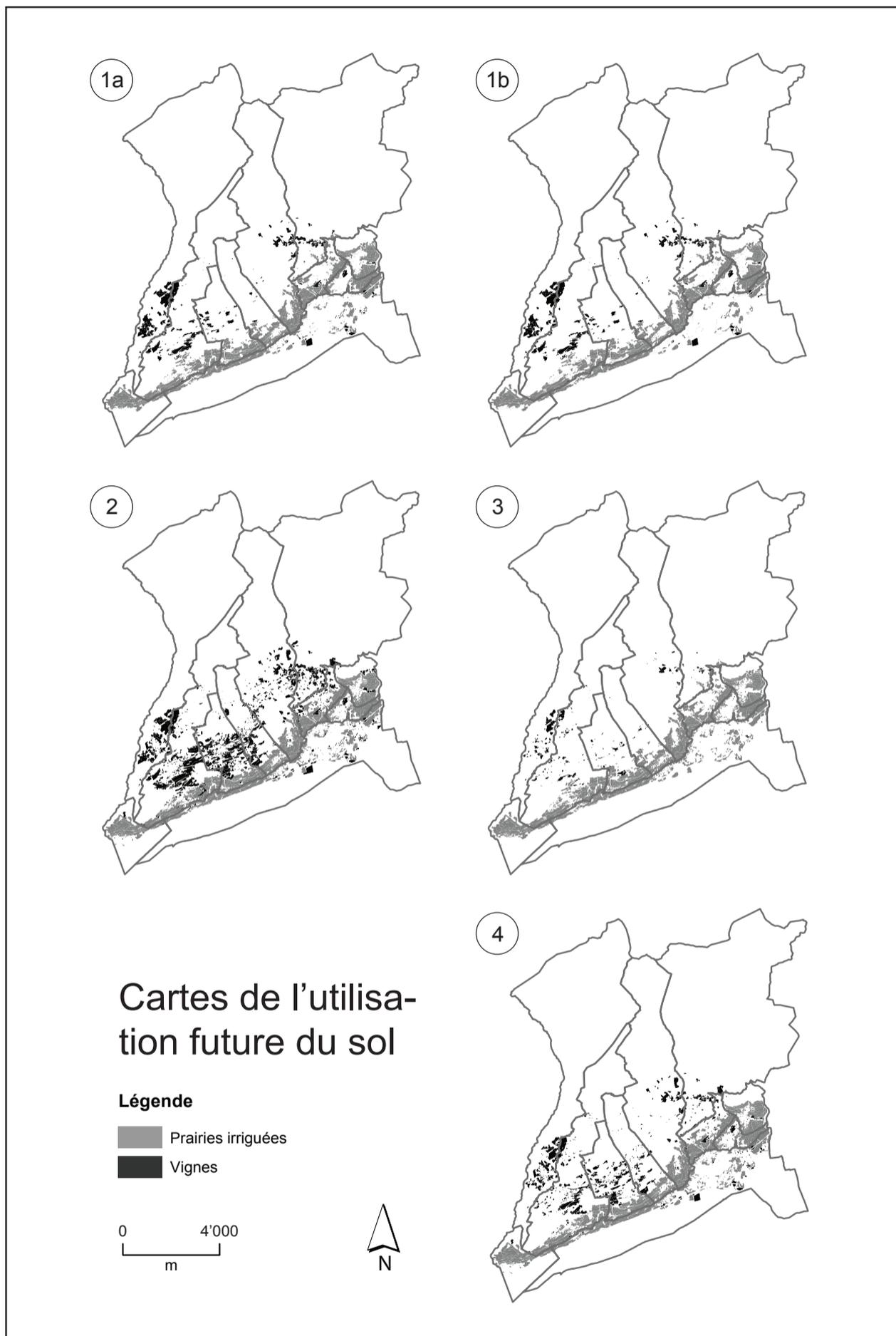


Fig. 5.8 – Cartes de l'utilisation du sol par scénario socio-économique.

Élaborées à partir des données fournies par Emmanuel Rey.

5.4 Variations des usages

5.4.1 Eau potable

Démarche

En 2010, la consommation totale d'eau moyenne par jour et par personne en Suisse était d'environ 320 litres, la consommation maximale d'environ 500 litres (SSIGE, 2011). Selon Flörke et Alcamo (2004) et les responsables des SSIGE⁴⁸, la consommation d'eau en Suisse devrait se stabiliser en 2020 après une réduction de l'ordre de 10% par rapport à l'actuel, et grâce à des améliorations techniques (diminution de la consommation des appareils ménagers notamment). Afin d'appliquer les scénarios socio-économiques, il est nécessaire de modifier l'équation 4.2, obtenue en croisant les données de la consommation d'eau potable en 2010 et 2011 avec la température moyenne mensuelle, en incluant l'évolution démographique et l'amélioration technologique estimée (équation 5.8). Le coefficient directeur et l'ordonnée à l'origine sont désormais proportionnels au nombre de résidents. La consommation résultante est réduite de 10% tout au long de l'année à cause de l'amélioration technique prévue.

$$y = \left(\frac{13'757x + 509'271}{pop^{actuelle}} pop^{future} \right) \frac{9}{10} \quad (5.8)$$

Dans l'équation 5.8, y représente la consommation d'eau potable des résidents, x la température moyenne mensuelle à Montana selon la moyenne des scénarios climatiques CH2011 (bien qu'ils aient été conçus pour être appliqués aux données enregistrées entre 1980 et 2009) et pop la population résidente. La consommation d'eau potable engendrée par les touristes selon les facteurs multiplicatifs (tableau 5.4) est ensuite ajoutée à la consommation obtenue. Cette démarche permet d'obtenir quatre équations estimant la demande en eau potable future pour chaque scénario socio-économique :

$$Sc1a \quad y = 917.33x^2 + 6'130.2x + 765'234 \quad (5.9)$$

$$Sc1b \quad y = 917.33x^2 + 4'558.8x + 707'067 \quad (5.10)$$

$$Sc2 \quad y = 856.3x^2 + 3064.3x + 617'244 \quad (5.11)$$

48. Entretien téléphonique du 7 mars 2012.

Les caractéristiques du scénario de modération, qui décrivent une consommation d'eau potable estivale non corrélée avec la température moyenne mensuelle⁴⁹ impliquent l'utilisation d'une démarche différente par rapport aux scénarios traités jusqu'à maintenant. Au cours de la phase de quantification, il n'a pas été possible de déterminer précisément la quantité d'eau utilisée pour irriguer les jardins et les gazons, même si l'hypothèse que ça correspond à un huitième de la consommation totale actuelle d'eau potable a été avancée. Il s'avère donc difficile d'avancer une ultérieure hypothèse sur l'efficacité des mesures proposées par le scénario 3. Face à ces difficultés, le scénario 3 prendra en considération soit la consommation prévue par l'équation 5.12, que la consommation printanière et estivale minimale.

$$Sc3 \quad y = 710.75x^2 + 4'603x + 492'486 \quad (5.12)$$

Afin de déterminer cette dernière, la consommation maximale obtenue pour les mois d'automne et d'hiver en utilisant l'équation 5.12 a été rapportée au reste de l'année. Cette démarche porte donc à la construction d'un scénario prévoyant une consommation d'eau potable minimale et maximale, ce qui, en absence de données satisfaisantes sur les avantages que les mesures proposées par le scénario de modération, représente un compromis nécessaire.

Les quatre équations obtenues ont ensuite été utilisées avec les températures moyennes mensuelles enregistrées à Montana entre 1980 et 2009, auxquelles le scénario climatique moyen a été appliqué (moyenne des 10 scénarios climatiques du CH2011). Ce procédé a permis d'estimer de manière grossière la consommation d'eau potable dans la région entre 1980 et 2009 (figure 5.9).

49. « Il y a une séparation de l'eau potable et de l'eau du ménage. Les ménages ont réduit leur consommation d'eau par des efforts conséquents d'épargne individuelle. Les jardins et les plantations sont arrosés seulement par de l'eau de pluie recueillie localement ».

Résultats

La figure 5.9 et le tableau 5.6 illustrent l'impact des changements socio-économiques et climatiques sur la consommation en eau potable de la région de Crans-Montana-Sierre. L'ampleur de la variation de la consommation mensuelle moyenne d'eau potable (tableau 5.6) va de +33.5 % pour le scénario d'expansion (Sc1a) à -16.8 % pour le minimum prévu pour le scénario de modération (Sc3). Le scénario RégiEau partage les mêmes résultats que le scénario de stabilisation Sc2 (figure 5.9 et le tableau 5.6).

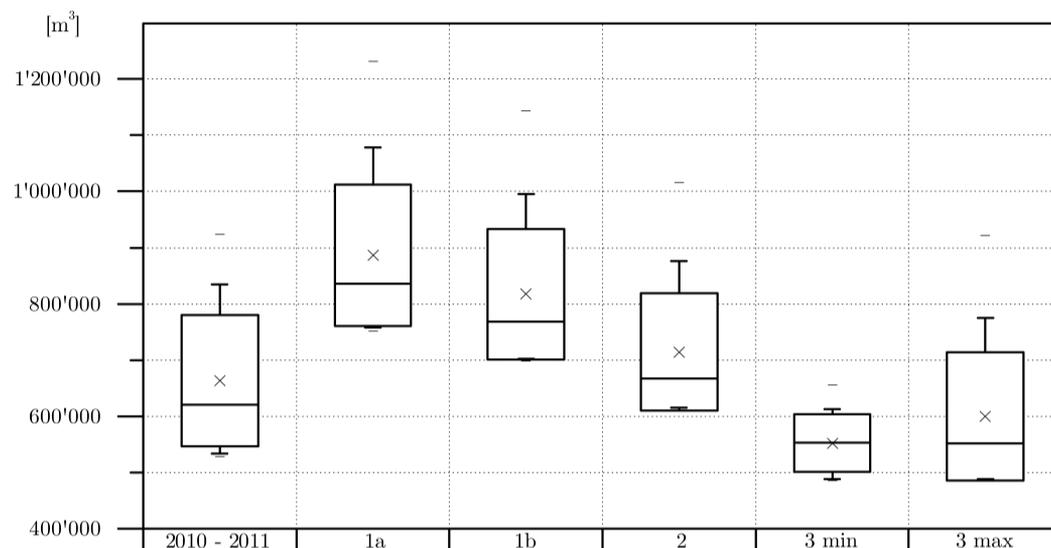


Fig. 5.9 – Estimation de la consommation d'eau potable future selon les différents scénarios.

	2010-2011	Sc1a	Sc1b	Sc2	Sc3
Consommation mensuelle moyenne en m ³	663'850	885'900	817'350	714'550	552'000 - 599'900
Variation		+33.5 %	+23.1 %	+7.6 %	-16.8 % - 9.6 %

Tab. 5.6 – Variation du besoin en eau potable par scénario socio-économique.

Discussion

La démarche utilisée ci-dessus est constituée de plusieurs étapes qui ont demandé plusieurs approximations. Les résultats présentés plus haut sont donc à considérer comme des estimations grossières. Ces derniers (figure 5.9 et le tableau 5.6) montrent que la consommation d'eau potable estimée pour l'avenir pour les différents scénarios socio-économiques augmentera au maximum d'environ un tiers par rapport à l'actuel. Il faut souligner, qu'en l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de faire des estimations sur l'impact possible des autres variables intégrées dans les scénarios socio-économiques élaborés au sein du projet MontanAqua (réduction de l'arrosage des gazons pendant l'été, réseau séparé pour l'irrigation, etc.) sur la consommation d'eau potable, car la quantité de données sur la consommation en eau potable des ménages

est largement insuffisante pour faire ces estimations à l'échelle régionale. Pour continuer la recherche sur cette thématique, il est indispensable de :

- disposer d'un réseau de mesure dans un nombre statistiquement représentatif de ménages ;
- avoir des séries de données de plusieurs années qui se caractérisent possiblement par plusieurs phénomènes de sécheresse ;
- estimer l'impact des mesures imposées par les communes en cas de sécheresse.

Pour conclure, il faut également remarquer qu'éviter complètement que pendant les mois les plus chauds la consommation d'eau potable devienne plus importante par rapport au reste de l'année est extrêmement difficile (Scénario 3 min), voire utopique. Cette limite théorique a été calculée principalement pour donner une limite théorique à la diminution de la consommation d'eau potable pendant les mois compris entre avril et septembre et pas vraiment pour être prise en considération comme un aspect de l'avenir de la région.

5.4.2 Irrigation des surfaces agricoles

Démarche

Le besoin en eau des cultures en 2050 a été calculé en suivant la démarche illustrée au chapitre 4.5.5, en prenant en compte les scénarios climatiques et les scénarios socio-économiques (en particulier l'évolution des surfaces).

Résultats

La figure 5.10 montre les résultats de la modélisation obtenue avec WEAP, en faisant varier la température et les précipitations enregistrées entre 1980 et 2009 conformément aux scénarios climatiques CH2011, mais en gardant les surfaces actuelles (2010).

Selon les scénarios climatiques CH2011, le besoin en eau des vignes (figure 5.10) va augmenter de façon contenue en ce qui concerne 90% des saisons d'irrigation (avril-septembre). Par contre, ce qui va augmenter considérablement est l'écart entre le 9^e et le 10^e décile, qui détermine un besoin en eau sensiblement plus important en cas de sécheresse. D'après la figure 5.10, le besoin en eau annuel moyen des vignes passe de 0.8 à 1.11 millions de m³ (+ 37%), alors que le besoin en eau annuel moyen des prairies irriguées passe de 1.43 à 1.68 millions de m³ (+ 17%). Les prairies irriguées sont moins touchées par les changements climatiques, très probablement à cause de leur besoin actuel en eau, qui est déjà très élevé et de leur altitude (la plupart se trouve au-dessus de la limite des vignes, où le taux d'évapotranspiration est beaucoup moins important par rapport à la Plaine du Rhône).

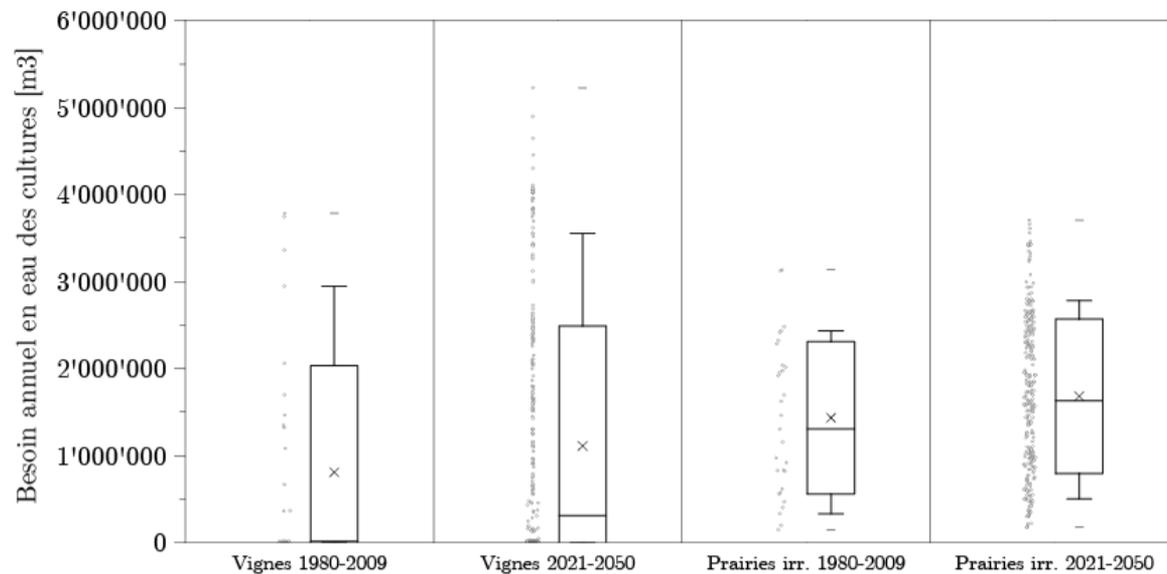


Fig. 5.10 – Le besoin en eau des cultures conformément aux changements climatiques.

L'impact de la variation des surfaces

La variation des surfaces a un impact très important sur le besoin en eau des cultures ; le besoin d'irrigation diminuant avec l'augmentation de l'altitude, fait de l'abandon de l'irrigation aux basses altitudes un facteur important. Le besoin en eau des cultures pour les cinq scénarios socio-économiques a été calculé en se basant sur les surfaces proposées par Rey et al. (2013) (figure 5.7), qui a à son tour exploité le travail de Nicklaus (2012). Cette démarche a été appliquée aux vignes et aux prairies irriguées (chapitre 5.3.1). Le scénario RégiEau, qui correspond à la volonté des acteurs de la région de Crans-Montana-Sierre, prévoit une diminution modérée du besoin en eau des prairies (figure 5.11). Par contre, en ce qui concerne les vignes, l'eau nécessaire pour éviter le stress hydrique augmente d'une façon modeste pendant les années les plus sèches, mais peut augmenter considérablement pendant les années qui dans la période de référence 1980-2009 sont considérées comme « normales » (figure 5.12). Notons que même si les graphiques (figures 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19 et 5.20) illustrant les résultats gardent les séries de données de tous les scénarios climatiques (en gris clair), l'analyse des résultats de la modélisation se concentre principalement sur la moyenne des résultats obtenus (ligne pointillée).

	Sc1a	Sc1b	Sc2	Sc3	Sc4
Prairies	--	--	++	---	(-)
Vignes	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)

Tab. 5.7 – Besoin en eau des cultures par scénario socio-économique.

Les parenthèses ajoutent l'adjectif « modéré » à l'évaluation.

En règle générale, la variation de surface des vignes n'a pas un impact significatif sur son besoin en eau pour deux raisons :

- L'expansion de la zone bâtie dans les parcelles où le vignoble est actuellement présent est limitée et
- à cause de la très faible quantité d'eau que les vignes au-dessus de la limite d'altitude actuelle nécessiteraient.

Les conséquences plus importantes par rapport à la variation de surface, sont celles relatives aux prairies irriguées. Les deux cas les plus extrêmes sont représentés par le scénario 2, où toutes les prairies sont irriguées, et par le scénario 3, où le besoin en eau des prairies ne dépasse désormais que rarement les 100'000 m³ par mois. Il faut remarquer que le scénario 3 prévoit également la conversion d'une bonne partie des prairies en terres agricoles, mais sans spécifier la typologie de culture. Le scénario socio-économique de modération implique la plus forte réduction d'irrigation des prairies, en laissant par contre ouverte la question de l'eau nécessaire pour satisfaire la demande en eau des terres agricoles supplémentaires (à moins de planter des cultures qui ne nécessitent pas du tout d'irrigation). Le tableau 5.8 montre la variation des besoins en eau pour les cultures (vignes et prairies irriguées) de la région de Crans-Montana-Sierre selon les scénarios socio-économiques élaborés dans le cadre du projet MontanAqua.

	1980-2009	Sc1a	Sc1b	Sc2	Sc3	Sc4
Variation du besoin en eau des cultures	-	-18.7%	-24,8%	+32.6%	-34%	-0.2%

Tab. 5.8 – Variation du besoin en eau des cultures par scénario socio-économique.

Discussion

Les scénarios d'expansion (1a et 1b) prévoient une diminution du besoin en eau proche d'un quart du besoin modélisé pour la période 1980-2009. Le scénario de stabilisation (2), par contre, est le seul scénario qui prévoit une augmentation du besoin en eau des cultures, causé par l'augmentation des surfaces occupées par les prairies irriguées. Pour la raison opposée, le scénario de modération (3) connaît la plus importante réduction du besoin en eau parmi toutes les visions proposées. La diminution minimale des surfaces prévue par le scénario RégiEau compense les changements climatiques prévus, en laissant pratiquement inchangée la nécessité d'irrigation des cultures.

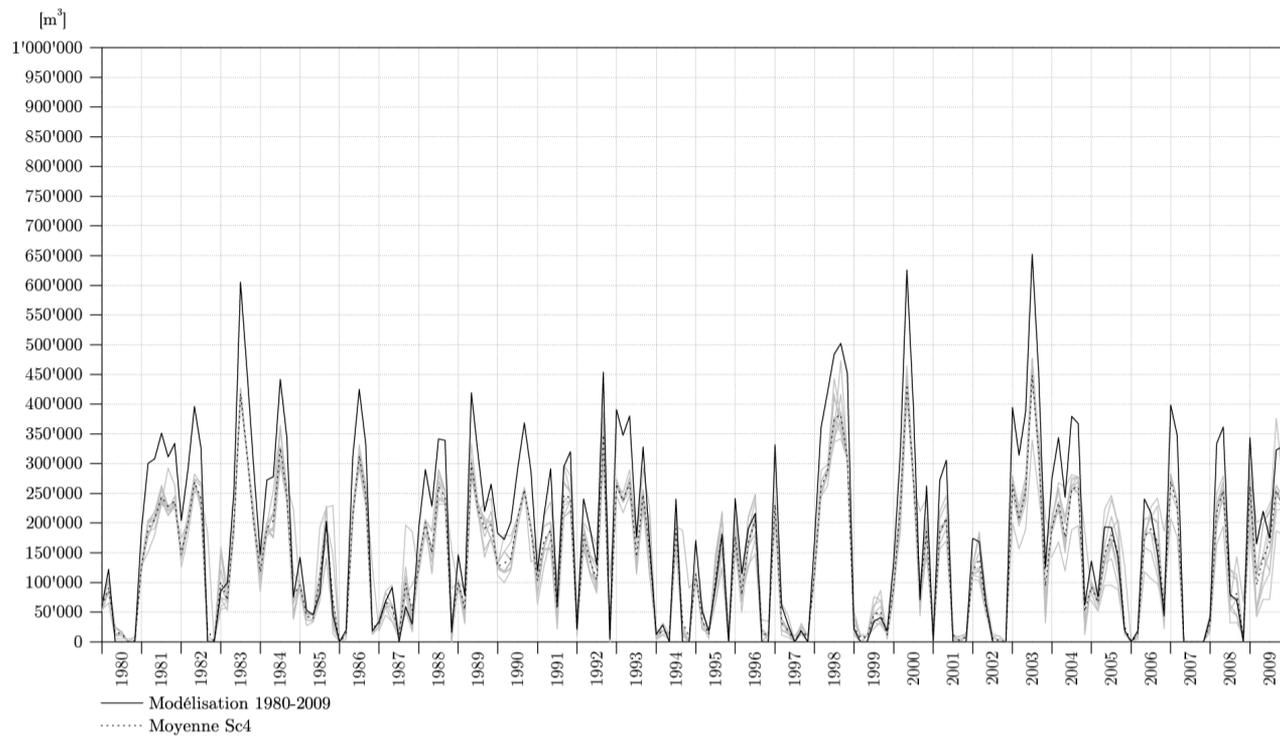


Fig. 5.11 – Estimation du besoin en eau des prairies pour le scénario 4.

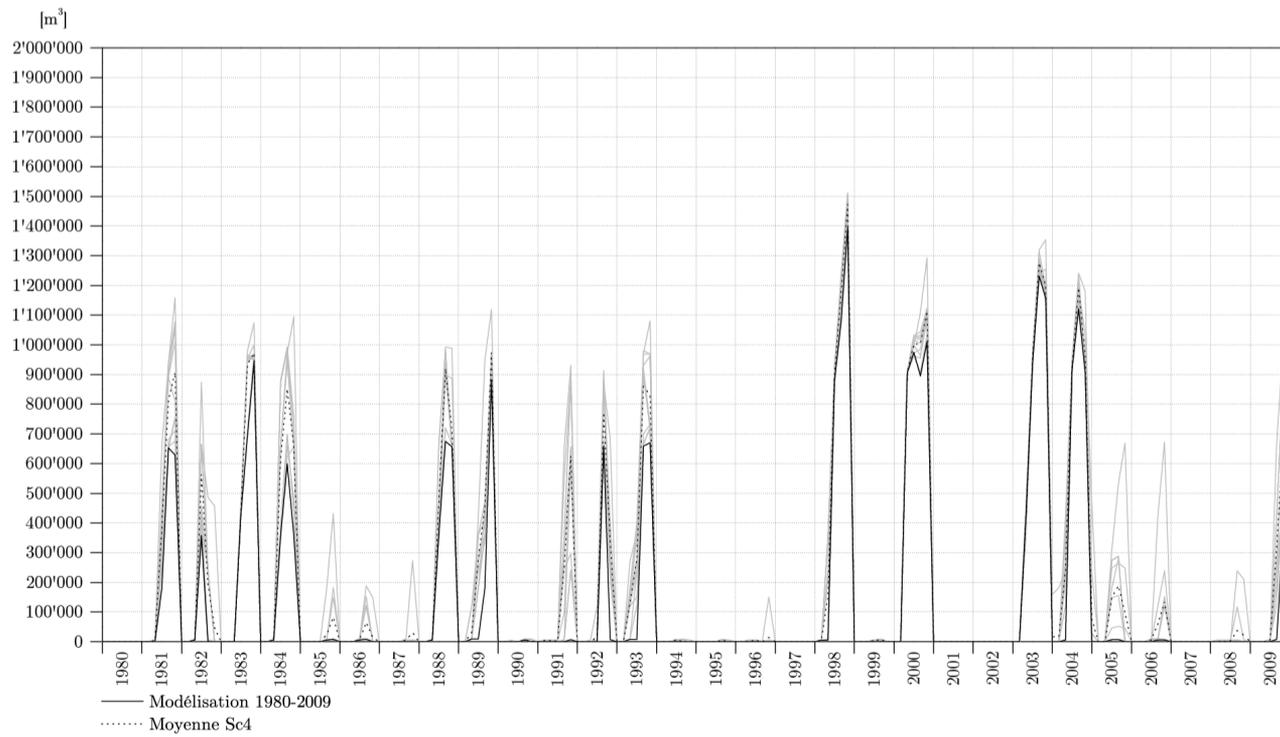


Fig. 5.12 – Estimation du besoin en eau des vignes pour le scénario 4.

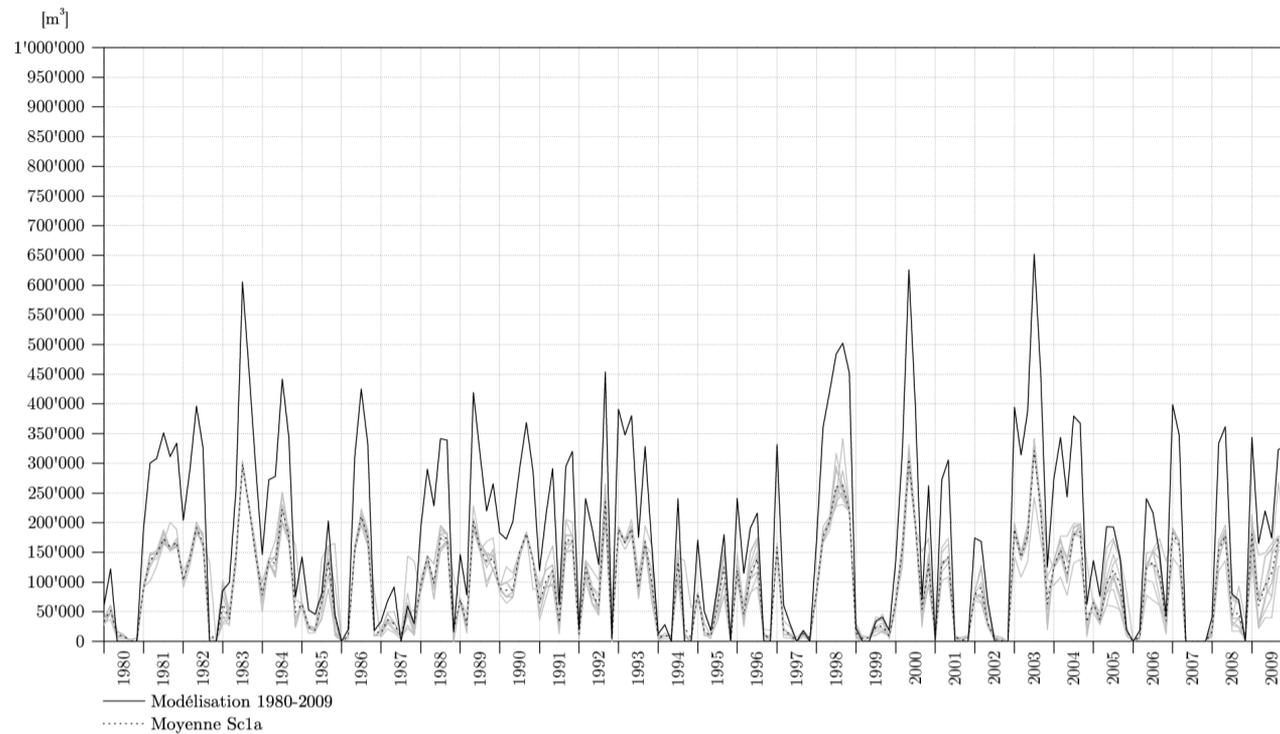


Fig. 5.13 – Estimation du besoin en eau des prairies pour le scénario 1a.

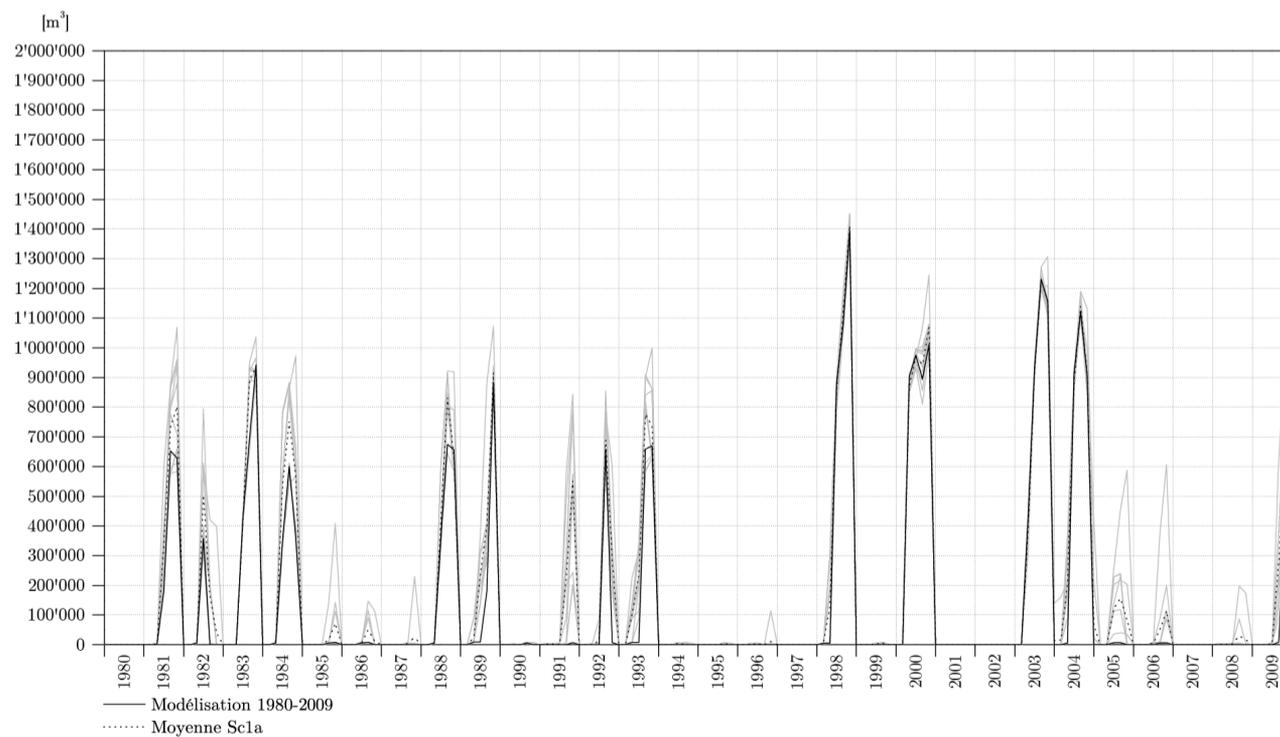


Fig. 5.14 – Estimation du besoin en eau des vignes pour le scénario 1a.

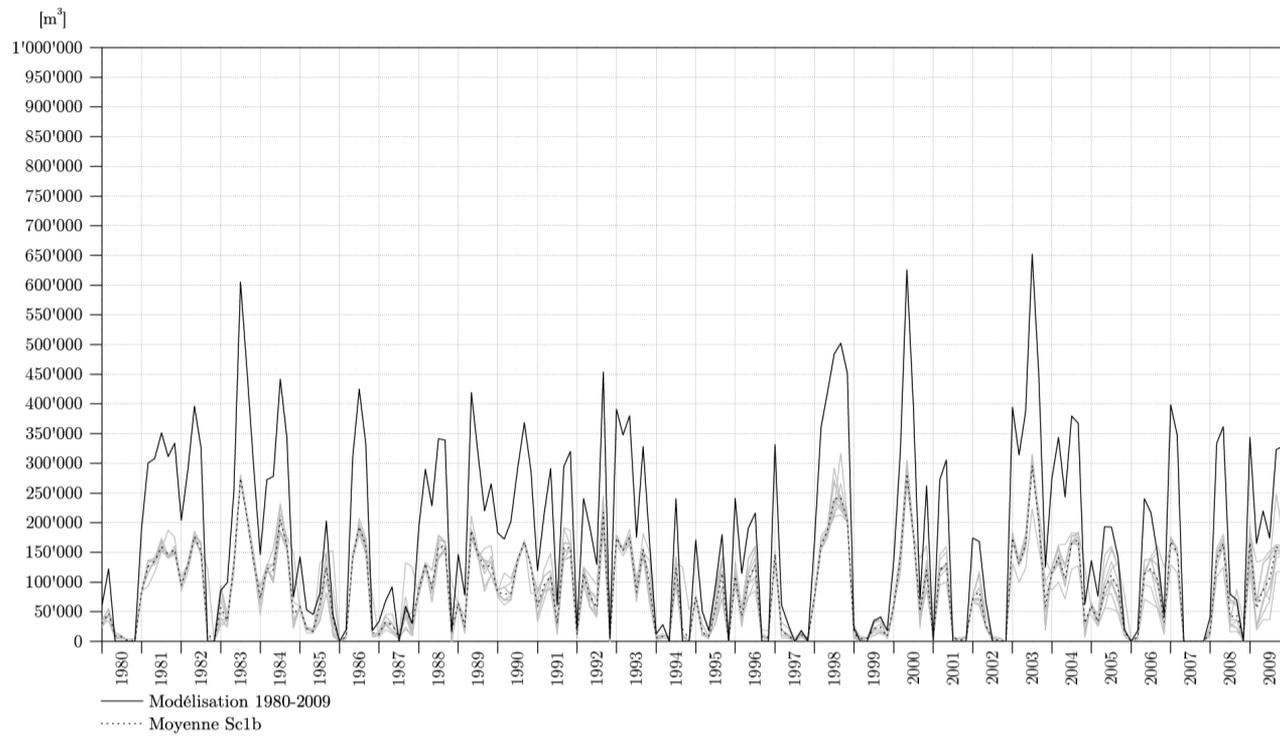


Fig. 5.15 – Estimation du besoin en eau des prairies pour le scénario 1b.

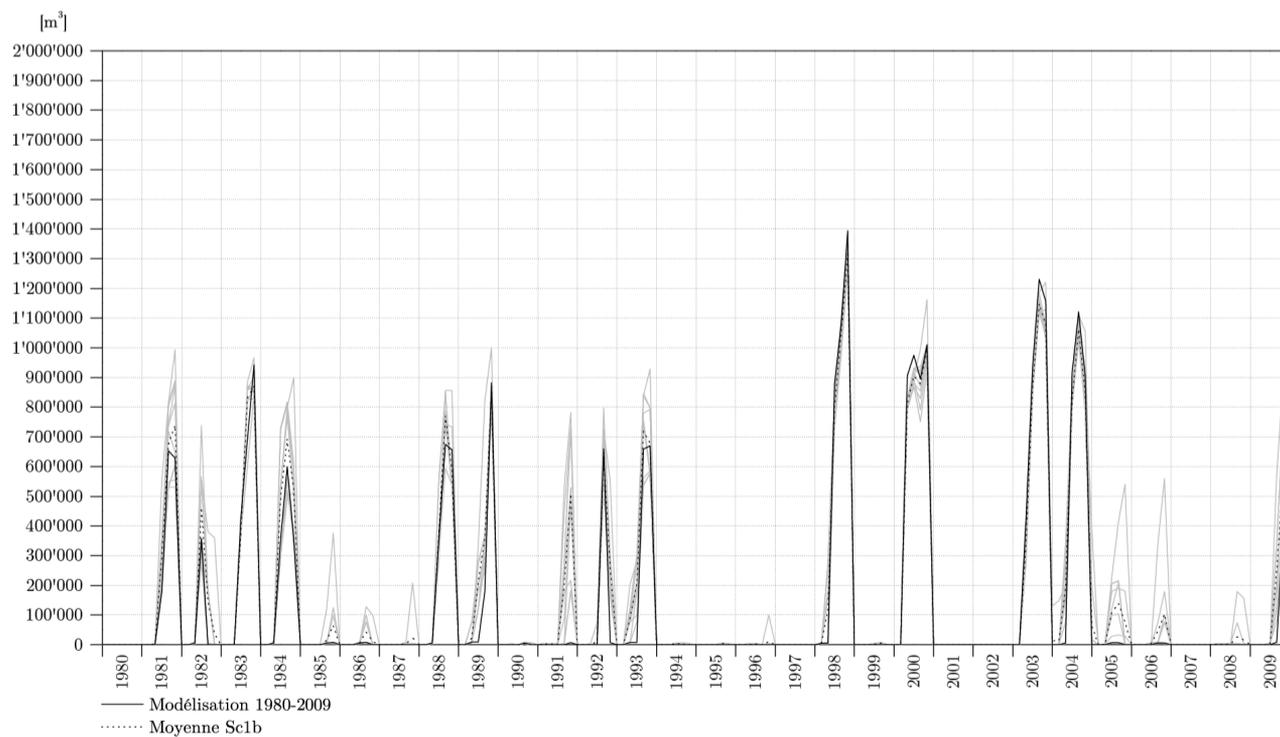


Fig. 5.16 – Estimation du besoin en eau des vignes pour le scénario 1b.

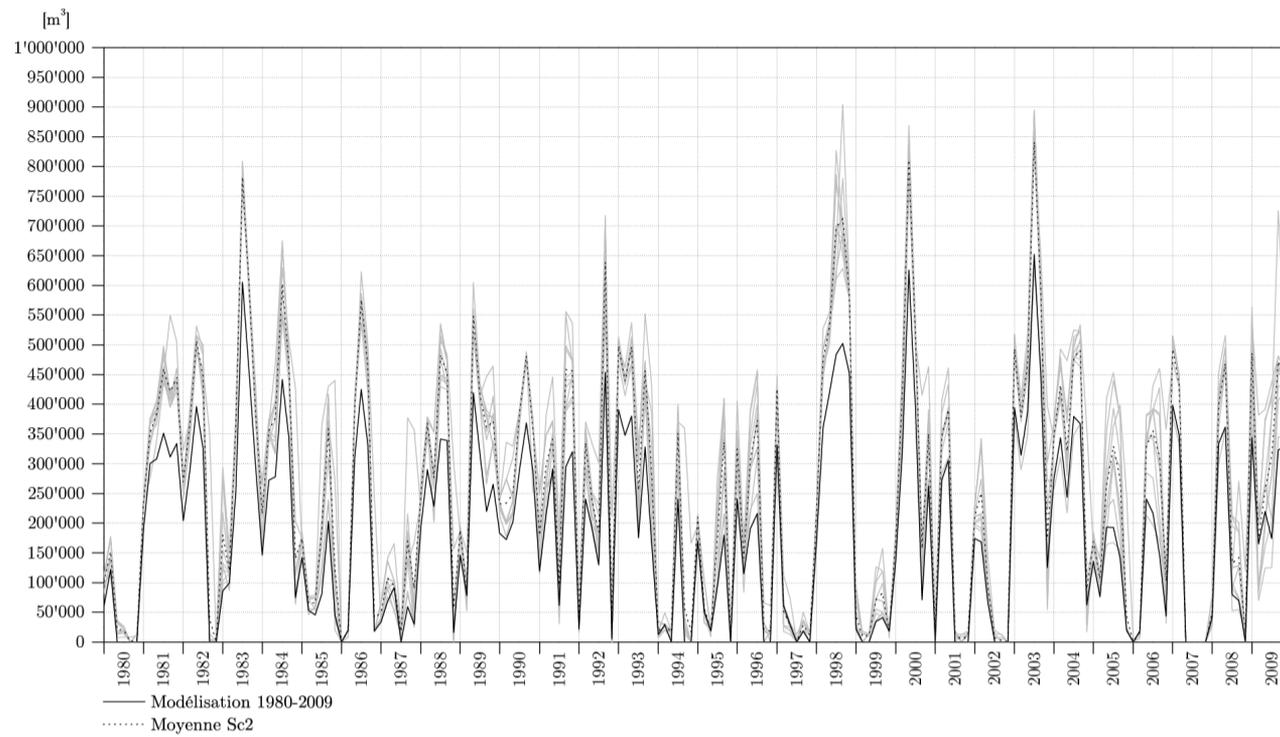


Fig. 5.17 – Estimation du besoin en eau des prairies pour le scénario 2.

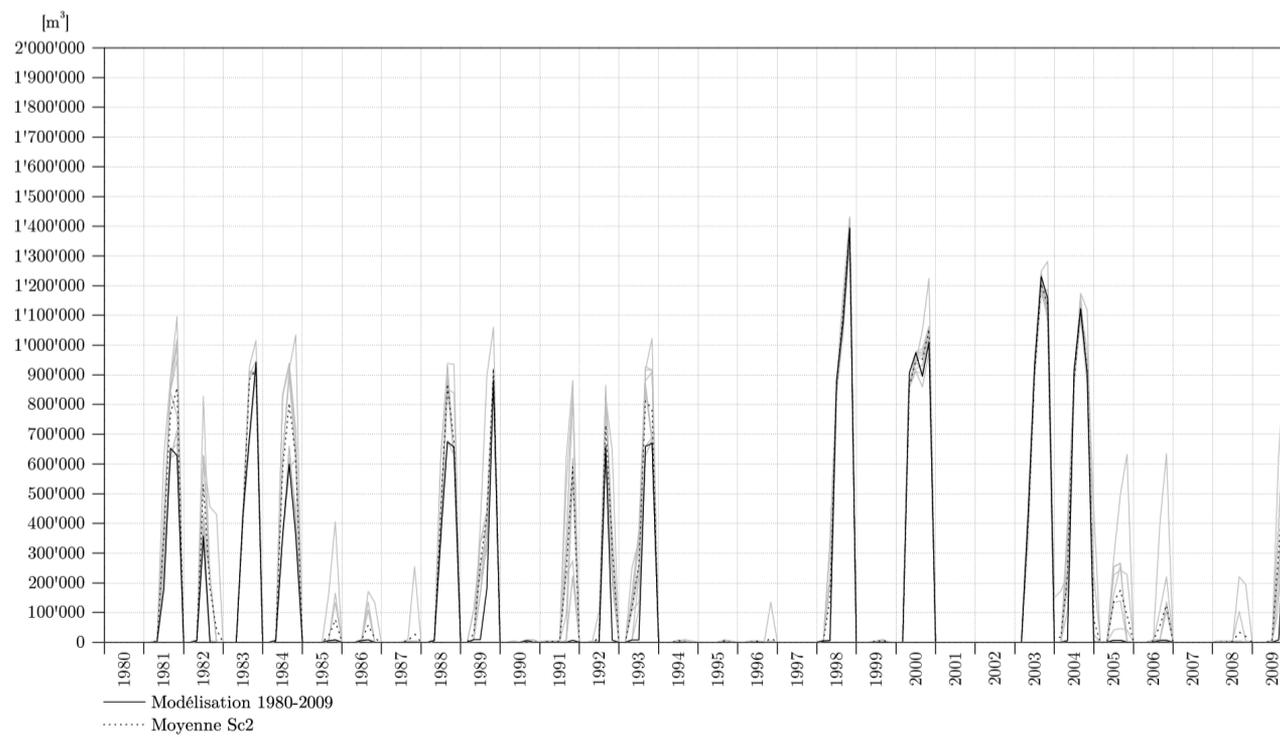


Fig. 5.18 – Estimation du besoin en eau des vignes pour le scénario 2.

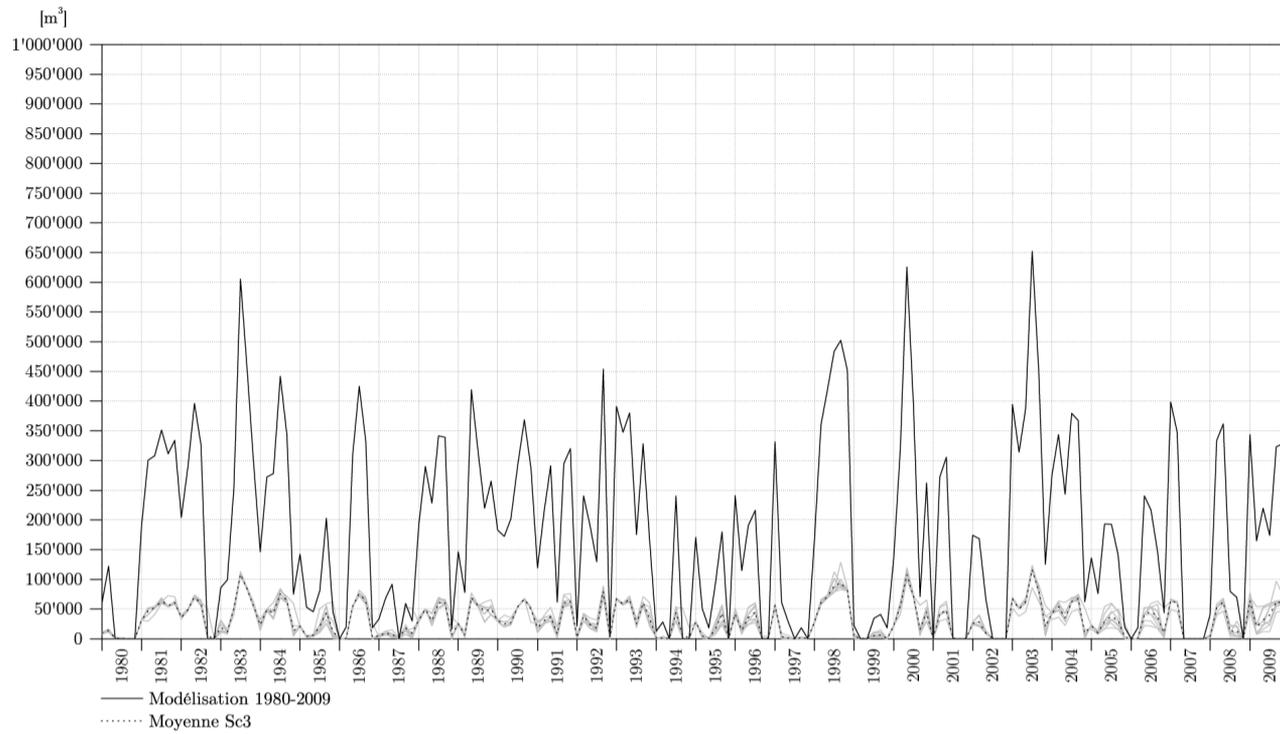


Fig. 5.19 – Estimation du besoin en eau des prairies pour le scénario 3.

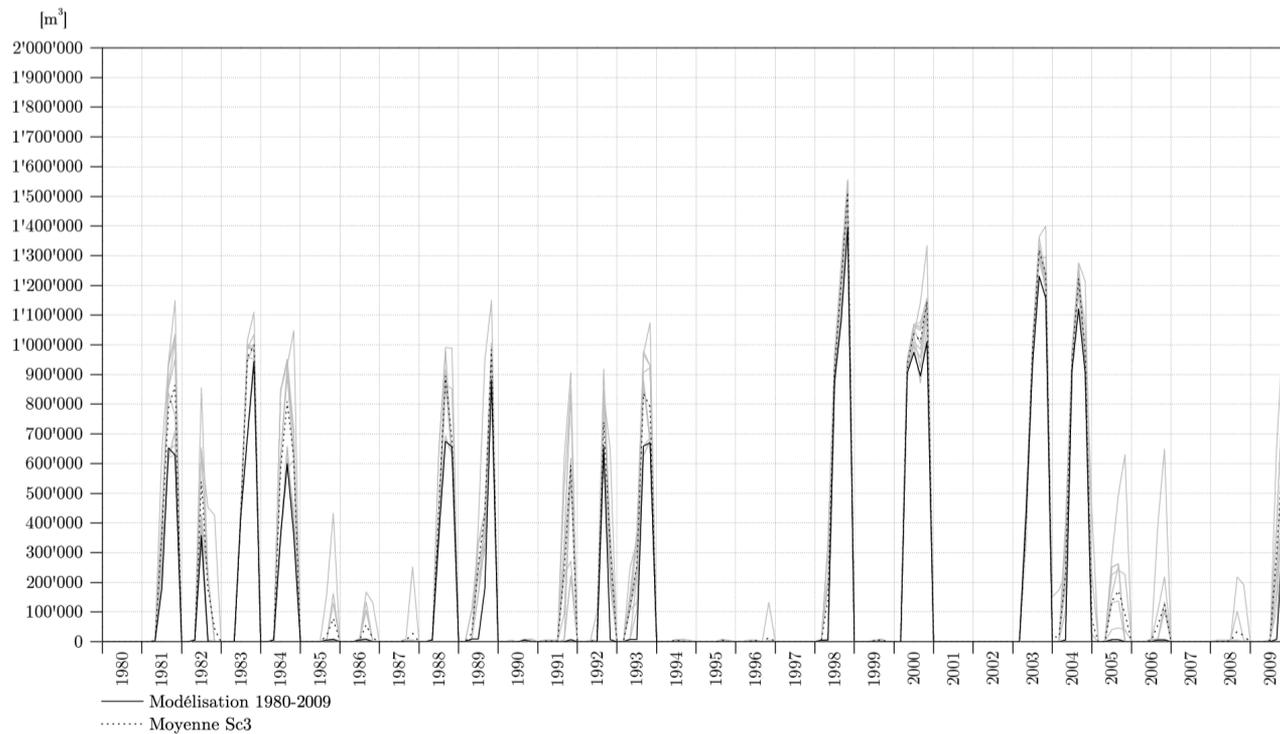


Fig. 5.20 – Estimation du besoin en eau des vignes pour le scénario 3.

5.4.3 Irrigation des parcours de golf du Haut-Plateau

Démarche

Les parcours de golf du Haut-Plateau sont les seules surfaces irriguées pour lesquelles la quantité d'eau utilisée est enregistrée systématiquement (cf. chapitre 4.39), ce qui a permis de calibrer minutieusement les paramètres de la modélisation faite avec WEAP/MABIA. Cette dernière a été faite en donnant une importance particulière à l'année 2011 pour deux raisons principales :

1. En 2011, le manque de précipitations a demandé un arrosage très soigneux des parcours, et ainsi la quantité d'eau utilisée devrait être très proche de la quantité théorique prévue par le modèle utilisé.
2. La méthode d'arrosage utilisée a changé au cours du temps, devenant de plus en plus efficace, ce qui a réduit la quantité d'eau nécessaire aux parcours (dans des conditions climatiques similaires).

Résultats

La quantité d'eau utilisée pour irriguer les parcours de golf du Haut-Plateau ressemble discrètement (la marge d'erreur est comprise entre -16% et +6 % à l'échelle annuelle) au besoin modélisé à l'aide de WEAP/MABIA (figure 5.21 et tableau 5.9). Les résultats obtenus montrent que selon la moyenne des scénarios climatiques CH2011, à l'avenir la demande en eau de ces parcours augmentera au maximum de 14.5 % (tableau 5.9).

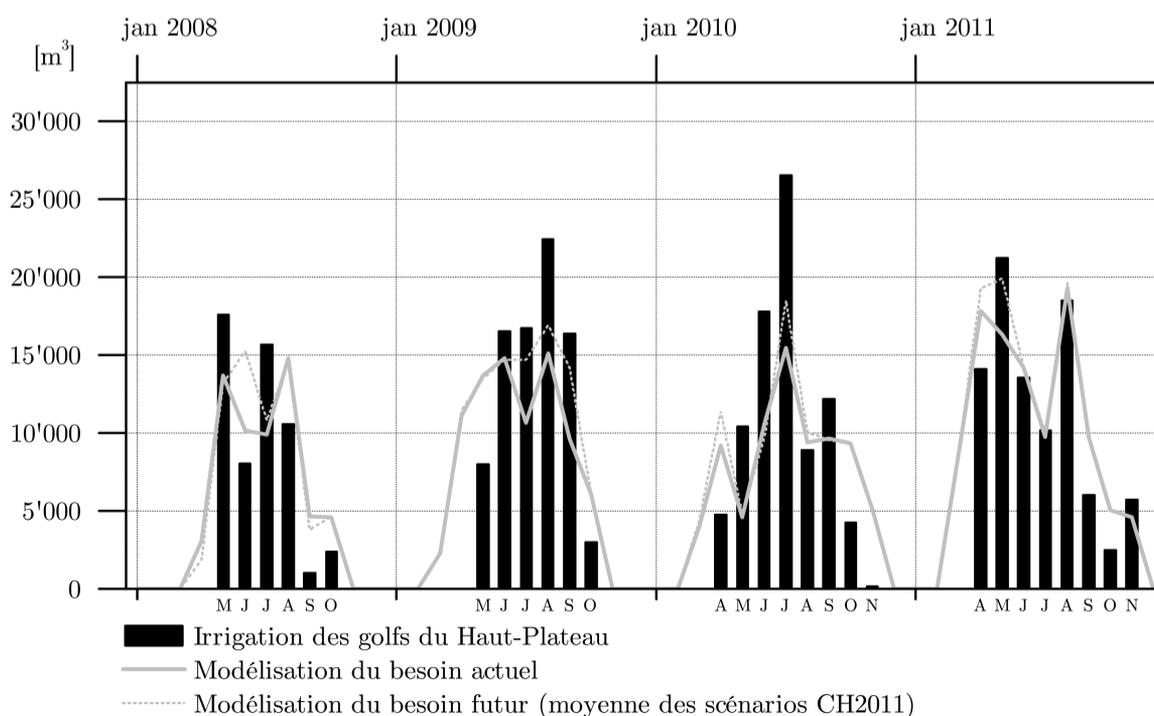


Fig. 5.21 – Estimation du besoin en eau des parcours de golf du Haut-Plateau.

	2008	2009	2010	2011
Quantité d'eau utilisée en m ³	55'300	83'000	85'000	91'700
Estimation du besoin actuel en eau en m ³	57'800	69'900	73'300	96'800
Estimation du besoin futur en eau en m ³	62'300	80'000	78'300	102'500
Variation entre le besoin actuel et futur	+7.8 %	+14.5 %	+6.8 %	+5.8 %

Tab. 5.9 – Variation du besoin en eau des golfs par scénario socio-économique.

Discussion

Le besoin d'irrigation des parcours de golf du Haut-Plateau à l'horizon 2050 va donc rester pratiquement identique à l'actuel. À la faible variation engendrée par les changements climatiques, déterminée surtout par leur altitude, va s'ajouter l'amélioration technique des additifs qui aident à conserver l'humidité de la pelouse et qui limitent l'infiltration de l'eau dans le sol (cf. chapitre 3.4.8). Le perfectionnement de ces produits pourrait donc faire baisser ultérieurement la quantité d'eau nécessaire à l'entretien des golfs du Haut-Plateau. Il faut par contre également réfléchir à propos du fait que les scénarios climatiques s'appliquent aux températures et aux précipitations, en ne modifiant pas l'humidité relative. Celle-ci s'avère être extrêmement importante pour une surface « délicate » comme un parcours de golf, et sa diminution pourrait comporter une hausse significative du besoin en eau, mais s'exprimer sur cette thématique reste difficile. La seule évolution qui engendrerait sûrement une augmentation importante du besoin en eau des golfs du Haut-Plateau est la construction de nouveaux parcours ou l'agrandissement du parcours Jack Nicklaus, qui compte actuellement 9 trous, contre les 18 du parcours Ballesteros. Il faut également constater que seuls les scénarios d'expansion (1a et 1b) prévoient la réalisation de nouveaux greens arrosés, tandis que les autres ne prévoient pas cette possibilité. Globalement, il semble qu'à l'avenir la consommation d'eau des parcours de golfs de la région de Crans-Montana-Sierre risque d'être affectée de manière plus importante par la réalisation de nouveaux parcours que par l'impact des changements climatiques.

5.4.4 Enneigement artificiel

Démarche

La méthodologie choisie pour estimer la quantité d'eau nécessaire à la satisfaction du besoin en eau de l'enneigement artificiel du domaine de Crans-Montana se base sur plusieurs facteurs : la quantité de ressource utilisée actuellement, l'élévation de l'altitude inférieure pour l'enneigement artificiel (Abegg, 1996) causée par les changements

climatiques (augmentation de la température), les conditions météorologiques idéales pour fabriquer de la neige artificielle et, enfin, la fréquence avec laquelle ces conditions se présentent.

Analyse des données météorologiques passées

Traditionnellement, le domaine de Crans-Montana ouvre au public, au moins partiellement, le troisième week-end de novembre. Les conditions qui permettent d'enneiger artificiellement varient aussi dans le temps et leur évolution donne une idée plus précise sur le futur du domaine skiable. A ce propos, nous avons analysé tous les hivers qui disposaient de données enregistrées chaque 10 minutes, c'est-à-dire à partir de l'hiver 1981-1982. À cause de la grande quantité de données à traiter, cette analyse a été faite en utilisant le logiciel Matlab (script consultable à l'annexe 25), qui permet la manipulation de matrices de grande taille. L'altitude de la station de mesure a été artificiellement élevée en tenant compte des gradients de température indiqués par Bouët (1978), ce qui a permis de calculer les heures potentielles d'enneigement artificiel entre 1600 et 2000 m. L'altitude de 1600 m a été choisie car elle représente avec une bonne approximation la partie la plus basse du domaine skiable de CMA et elle est considérée par Abegg (1996) comme l'altitude inférieure pour l'enneigement artificiel ; l'altitude de 2000 m, par contre, a été choisie car elle représente la limite inférieure de la partie haute du domaine skiable.

Les conditions idéales d'enneigement

Les conditions idéales pour l'enneigement sont une température de l'air $< -2^{\circ}$ et une humidité relative $< 80\%$ ⁵⁰. La figure 5.22 montre que la somme des heures d'enneigement artificiel potentielles consécutives dans les années 1990 ne diffère pas énormément des années précédant les trois hivers très pauvres en neige 1987-1988, 1988-1989 et 1989-1990. Le mois de novembre montre de loin la plus grande variabilité de conditions avec un écart-type très proche de la moyenne. À partir de l'hiver 1998-1999, on assiste à une augmentation des conditions favorables à l'enneigement artificiel avec sept hivers dépassant 750 heures. Les hivers compris entre 2004 et 2006 ont été de loin les meilleurs, avec des valeurs proches de 1500 heures chacun.

Le fait que les hivers avec une pénurie de neige (voir figure 3.27) comme 1987-1988, 1988-1989, 1997-1998⁵¹, 2002-2003⁵² et 2006-2007⁵³ totalisent tous des valeurs très

50. Valeurs indiquées par Bertrand Cassignol, responsable des pistes de CMA, comme étant des seuils de conditions optimales pour l'enneigement artificiel.

51. Lors des finales de la Coupe du monde de ski 1998, qui ont eu lieu à Crans-Montana entre le 13 et le 15 mars, les conditions d'enneigement étaient à peine suffisantes pour garantir le déroulement régulier de la compétition (Rai 3, 2008).

52. Données Météosuisse, Station de Montana.

53. Michel Crettol, vice-président de CMA, lors de la conférence publique de l'APACH, le 25 août

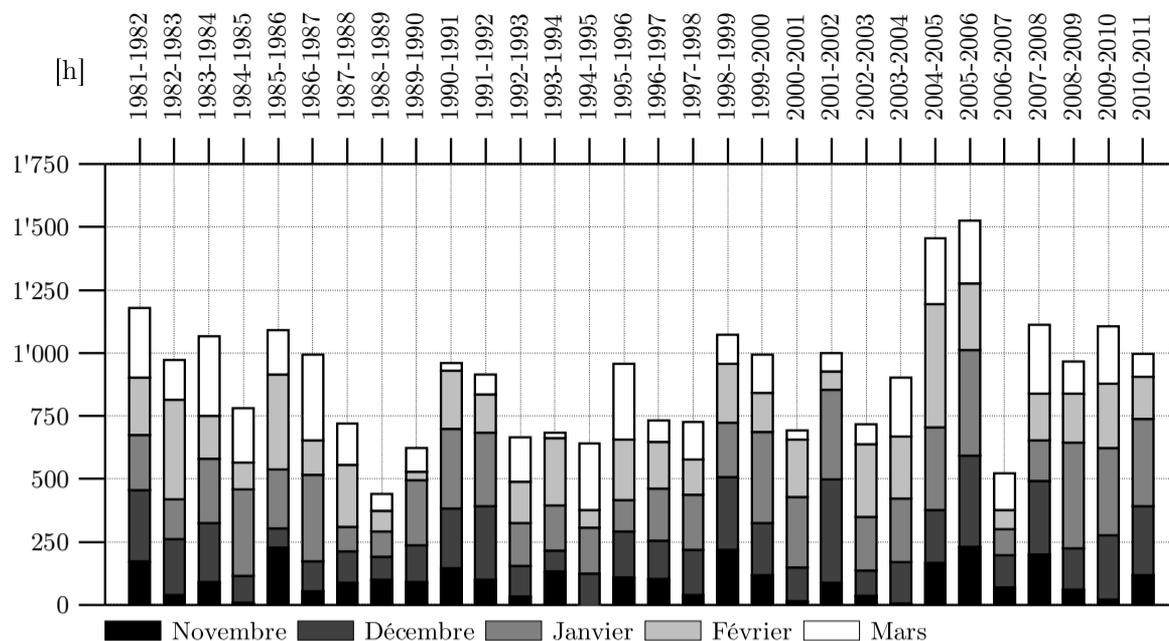


Fig. 5.22 – Heures potentielles d’enneigement artificiel à 1600 m (conditions idéales).

Valeurs calculées à partir des données de la station Météosuisse de Montana.

proches ou inférieures à 500 heures de conditions idéales pour l’enneigement artificiel à 1600 m d’altitude, permet d’aboutir au constat que les hivers qui manquent de neige naturelle posent également des problèmes pour en produire artificiellement. Les conditions climatiques et l’exposition du domaine skiable de Crans-Montana posent des difficultés à l’entretien des pistes en fin de saison (c’est-à-dire après la fin du mois de février). La thématique de la vulnérabilité du domaine skiable sera approfondie juste après l’analyse des données météorologiques issues des scénarios climatiques.

Les conditions limites d’enneigement

Afin d’identifier l’altitude au-dessous de laquelle il s’avère impossible d’enneiger artificiellement systématiquement avec succès, la même démarche a été faite avec les conditions suivantes : température comprise entre -2 et 0° et humidité relative comprise entre 65 et 80% (Olefs et al. 2009). L’analyse avec Matlab, en addition aux critères ci-dessus, a tenu compte seulement des données satisfaisant aux critères de l’équation 5.13.

$$HR = -7.5T + 65 \quad (5.13)$$

La figure 5.23 montre que les heures d’enneigement sous des conditions limites sont nettement inférieures par rapport à celles idéales et leur impact sur la production potentielle de neige artificielle semble être très limité. Dans ce sens, la saison 2006-2007 représente l’exemple parfait : caractérisée par 522 heures d’enneigement artificiel tout

2012 a dit « à cause du manque de neige et des conditions pour en fabriquer, en 2007 on a skié sur les cailloux ».

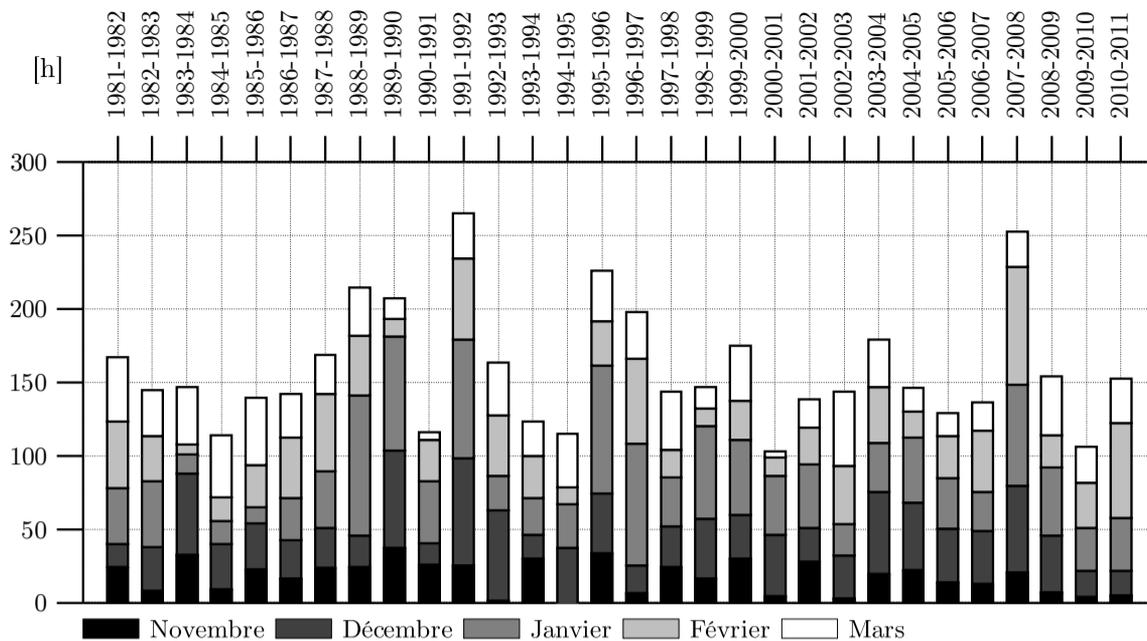


Fig. 5.23 – Heures potentielles d’enneigement artificiel à 1600 m (conditions limites)

Valeurs calculées à partir des données de la station Météosuisse de Montana.

le long de la saison, les 136 heures sous conditions limites, pour un total de 658 n’ont pas suffi à sauver la saison.

La vulnérabilité du domaine skiable

Afin de mieux comprendre quelles sont les zones les plus vulnérables du domaine skiable, pour la plupart exposées au sud-est, sud et sud-ouest, un indice de vulnérabilité a été développé. Cet indice se base principalement sur un modèle numérique du terrain (MNT) avec une résolution de 2 m. Premièrement, des cartes raster de la pente et de l’exposition ont été produites. La pente a ensuite été classée selon les déciles : la valeur 1 a été attribuée au premier décile, la valeur 2 au deuxième et ainsi de suite jusqu’au dixième décile. Une démarche similaire a été appliquée à l’exposition ; elle diffère légèrement de la précédente car le cinquième et le sixième décile, avec une valeur de 5 (correspondant au sud), représentent le sommet de la courbe des valeurs attribuées (1, 2, 3, 4, 5, 5, 4, 3, 2 et 1). Une analyse spatiale (multiplication) a permis d’identifier les zones les plus vulnérables des pistes de Crans-Montana-Aminona (figures 5.24 et 5.25). Bien que très simple, cette démarche est efficace. ce qui est mis en évidence par la présence des canons à neige dans les zones sensibles (figures 5.24 et 5.25). L’indice obtenu nommé Ski Area Vulnerability indice version 0.1 (SAVI v0.1) se caractérise par une échelle qui va de 1 (zone plate et non exposée au sud) à 50 (zone $\geq 50^\circ$ et exposée au sud).

Les résultats (figures 5.25 et 5.24) suggèrent que les pistes caractérisées par des tranches raides exposées au sud et qui se trouvent entre 1600 et 1900 m devraient être graduellement substituée par des pistes plus plates et sinueuses. Dans la figure 5.24, la piste la plus à l'ouest offre déjà la possibilité de fermer les tranches les plus raides en cas d'enneigement insuffisant, atout indispensable dans le futur proche pour l'exploitation des domaines skiables. L'acronyme SAVI est suivi par « version 0.1 » pour laisser des possibilités d'amélioration de l'indice, qui pourrait être sensiblement perfectionné en ajoutant toute une série d'informations, comme par exemple le parcours des skieurs, l'épaisseur de la neige et l'influence de l'environnement (proximité de la forêt, direction et force du vent, etc.). Cet indice est donc à considérer comme le point de départ pour la réalisation d'une méthode plus complexe prenant en considération, par exemple, les variables de la liste susmentionnée. Afin d'obtenir des résultats complètement satisfaisants, l'utilisation de méthodes avancées comme les machines à vecteurs de support (SVM) ou les réseaux de neurones, se révèle nécessaire. Ces méthodes ne seront pas utilisées dans ce travail car elles nécessitent un trop grand nombre de données.

Selon Gonseth et Vielle (2011), économistes à l'EPFL, l'enneigement artificiel des domaines skiables dans les Alpes suisses sera probablement possible à l'horizon 2050 ; ce qui reste à calculer est la marge de profit générée par cette pratique. En considérant que les limites physiques de la production de neige sont infranchissables, l'efficacité des canons à neige a encore une marge d'amélioration considérable. À la lumière des résultats obtenus, quelle est la démarche à suivre pour la station touristique de Crans-Montana-Aminona à l'horizon 2050 ? La plupart des clients (88%) des stations touristiques hivernales jugent un enneigement impeccable comme « très important », en associant la qualité de l'enneigement avec toute une série de facteurs qui ne le sont pas (Pütz et al. 2011). La fonction de l'enneigement artificiel va donc bien au delà de l'entretien des pistes de ski, influençant l'image de l'ensemble de la station. La perception de l'enneigement artificiel a évolué durant les 20 dernières années en perdant l'image négative qu'il avait dans les années 1990. Les skieurs interrogés par Pütz et al. (2011) ont exprimé un désintérêt par rapport à la présence des canons à neige, réputés comme moyen indispensable pour l'entretien des pistes. L'enneigement artificiel deviendra de plus en plus important entre 1600 et 2000 m d'altitude à cause des changements climatiques en cours. Afin de garantir la survie de la station, l'enneigement artificiel ne devrait pas cesser pour autant qu'il reste économiquement viable.

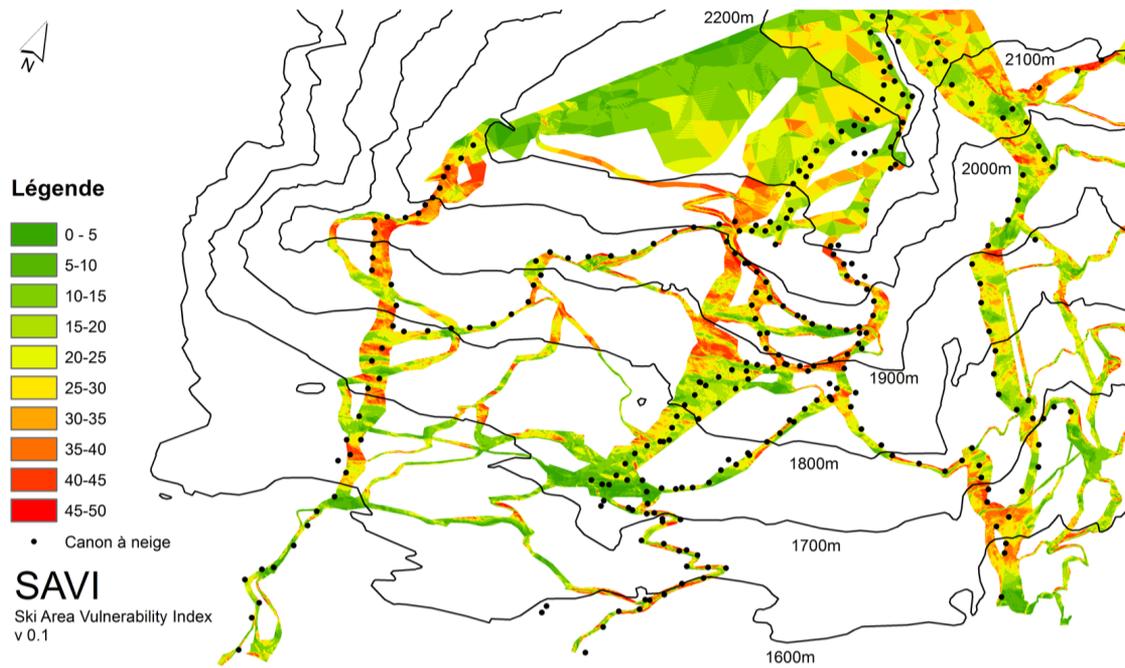


Fig. 5.24 – Vulnérabilité de la partie ouest du domaine skiable de CMA SA.

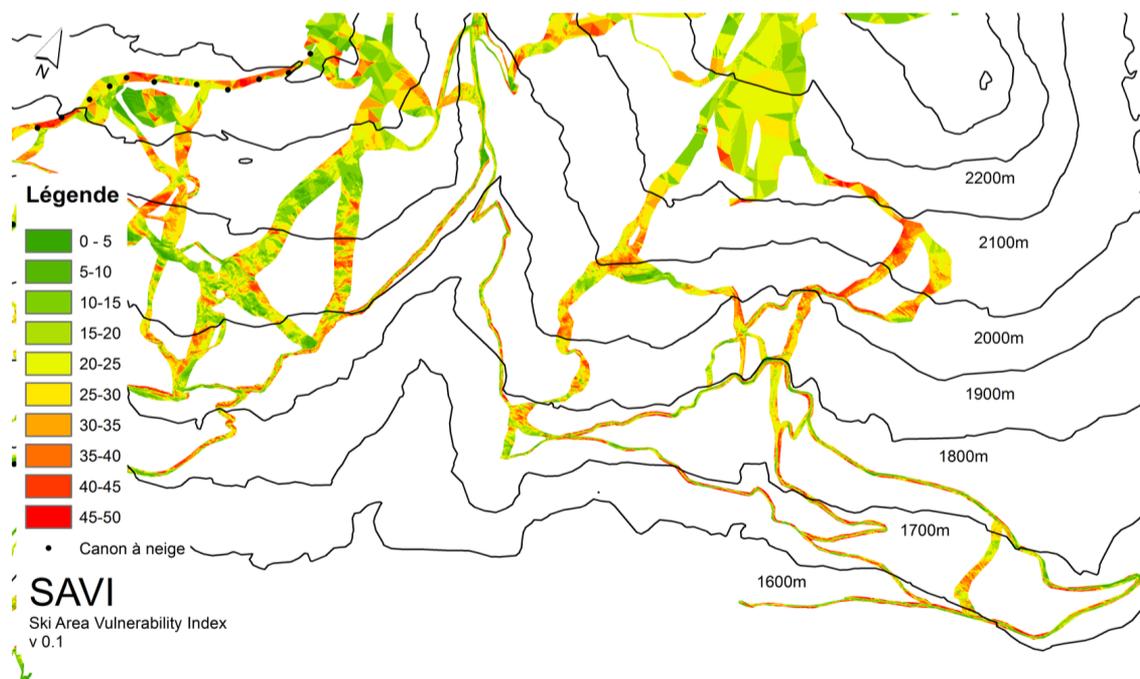


Fig. 5.25 – Vulnérabilité de la partie est du domaine skiable de CMA SA.

Analyse des données météorologiques futures

Les scénarios climatiques CH2011 ont été appliqués aux données enregistrées pendant la période 1981-2009 par la station météorologique de Montana. Le reste de la démarche est la même que celle utilisée pour les données actuelles. Les résultats indiquent que, en moyenne, les conditions idéales d'enneigement diminueront de 41% à 1600 m et de 27% à 2000 m, ce qui représente une bonne partie du domaine skiable de CMA. La figure 5.26 montre la diminution des conditions idéales d'enneigement causées par l'impact des changements climatiques par saison hivernale, c'est-à-dire de novembre à mars. Les hivers problématiques comme celui de 2006-2007 ont pu compter sur plus de 500 heures de conditions idéales pour l'enneigement artificiel. Selon les scénarios CH2011, un tiers des hivers futurs ne garantira pas de conditions satisfaisantes pour l'enneigement artificiel et, par conséquent, pour la clientèle (figure 5.26). L'impact des changements climatiques n'affecte pas de façon homogène chaque période de l'année, même si le mois de novembre semble être la période la plus touchée.

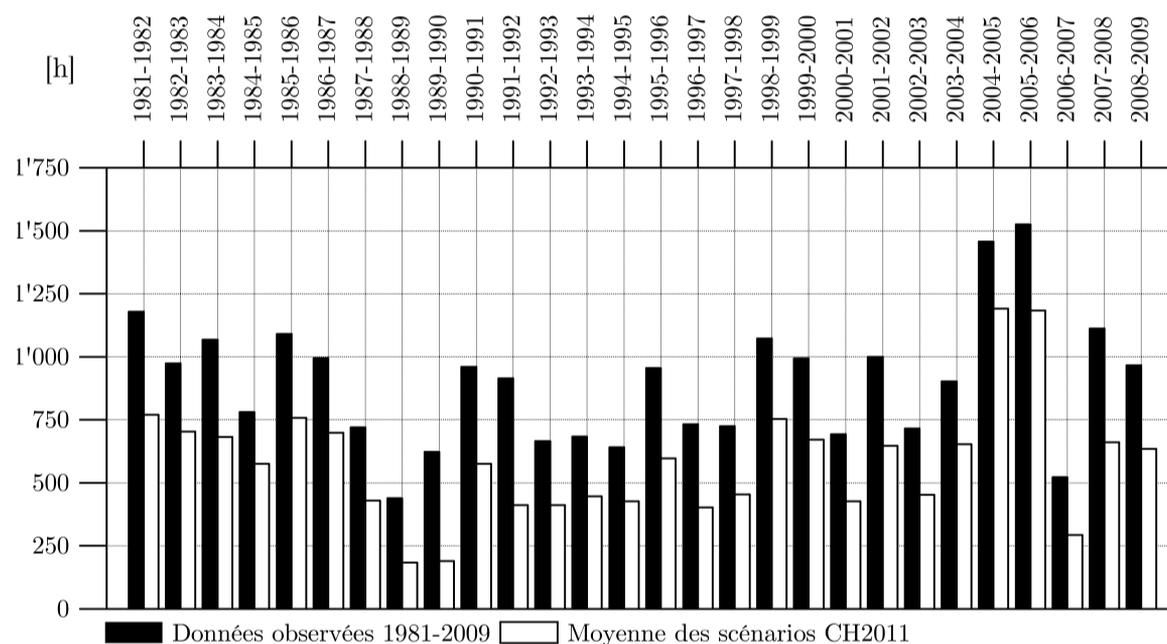


Fig. 5.26 – Heures potentielles d'enneigement artificiel à 1600 m (conditions idéales)

Valeurs calculées à partir des données de la station Météosuisse de Montana.

Le domaine skiable selon les scénarios socio-économiques

L'analyse des conditions idéales et des limites pour l'enneigement artificiel actuel et futur a porté à la détermination de la limite inférieure pour l'enneigement artificiel à l'horizon 2050. Les heures potentielles d'enneigement artificiel sous conditions idéales à 1600 m pour la période 1981-2009 ont été additionnées. Le résultat a ensuite été comparé avec les produits de la même démarche obtenus en utilisant les scénarios climatiques à différentes altitudes. Cette démarche a porté à la détermination de l'altitude qui, selon la moyenne des scénarios climatiques CH2011, aura la même quantité d'heures potentielles d'enneigement artificiel qui actuellement caractérisent la limite inférieure du domaine skiable : c'est-à-dire environ 2025 m d'altitude, arrondis vers le

bas à 2000 m, contre les actuels 1600 m. Les conséquences des changements climatiques pour l'enneigement artificiel du domaine skiable de Crans-Montana semblent donc être importantes, ce qui représente un défi pour les gestionnaires des remontées mécaniques et pour la station entière. Actuellement, la surface du domaine skiable enneigée artificiellement est de 49.55 ha ; 30.67 ha se trouvent entre 1600 m et 2000 m d'altitude, les 18.87 ha restants entre 2000 m et 2280 m. La contrainte climatique n'est pas le seul facteur à influencer la taille de la future surface enneigée artificiellement du domaine skiable de Crans-Montana. En effet, les facteurs socio-économiques influencent également l'évolution du domaine skiable. Les trois scénarios socio-économiques élaborés en collaboration avec le groupe RégiEau proposent chacun une taille différente de la surface enneigée artificiellement du domaine skiable (tableau 5.10).

	Actuellement	Expansion	Stabilisation	Modération
Surface enneigée artificiellement	49.55 ha	87.79 ha + 77%	57.16 ha + 17%	0 ha - 100%

Tab. 5.10 – Domaine skiable : surface enneigée artificiellement selon les scénarios socio-économiques.

Le scénario d'expansion (figure 5.27) prévoit que l'ensemble du domaine, à une altitude au-dessus de 2000 mètres, sera enneigé artificiellement (87.79 ha), y-compris le domaine d'Aminona, non enneigé actuellement. Le scénario de stabilisation (figure 5.27), par contre, prévoit que seuls les domaines de Cry d'Er et des Violettes seront enneigés artificiellement, pour une surface totale de 57.16 ha. Ce scénario inclut également une réduction de 30% de la quantité d'eau utilisée, résultat de l'adoption de canons à neige plus performants, comme par exemple le « Dendrite Generator » (Breiling et Sokratov, 2012). Le scénario de modération envisage l'abandon de l'utilisation des canons à neige, ce qui réduit la surface concernée à zéro.

Résultats

Les surfaces enneigées artificiellement obtenues en tenant compte des scénarios climatiques et socio-économiques ont permis, sur la base des indications de la consommation en eau actuelle, d'estimer la consommation en eau minimale et maximale pour chaque scénario (tableau 5.11). Les résultats illustrés dans le tableau 5.11 mettent en évidence l'ampleur considérable de la fourchette de la consommation d'eau nécessaire à la production de la neige artificielle : qui va de 0 à presque 800'000 m³.

Discussion

Les résultats mettent en évidence le fait que les caractéristiques de la surface enneigée artificiellement, notamment son extension, affectent énormément la quantité d'eau

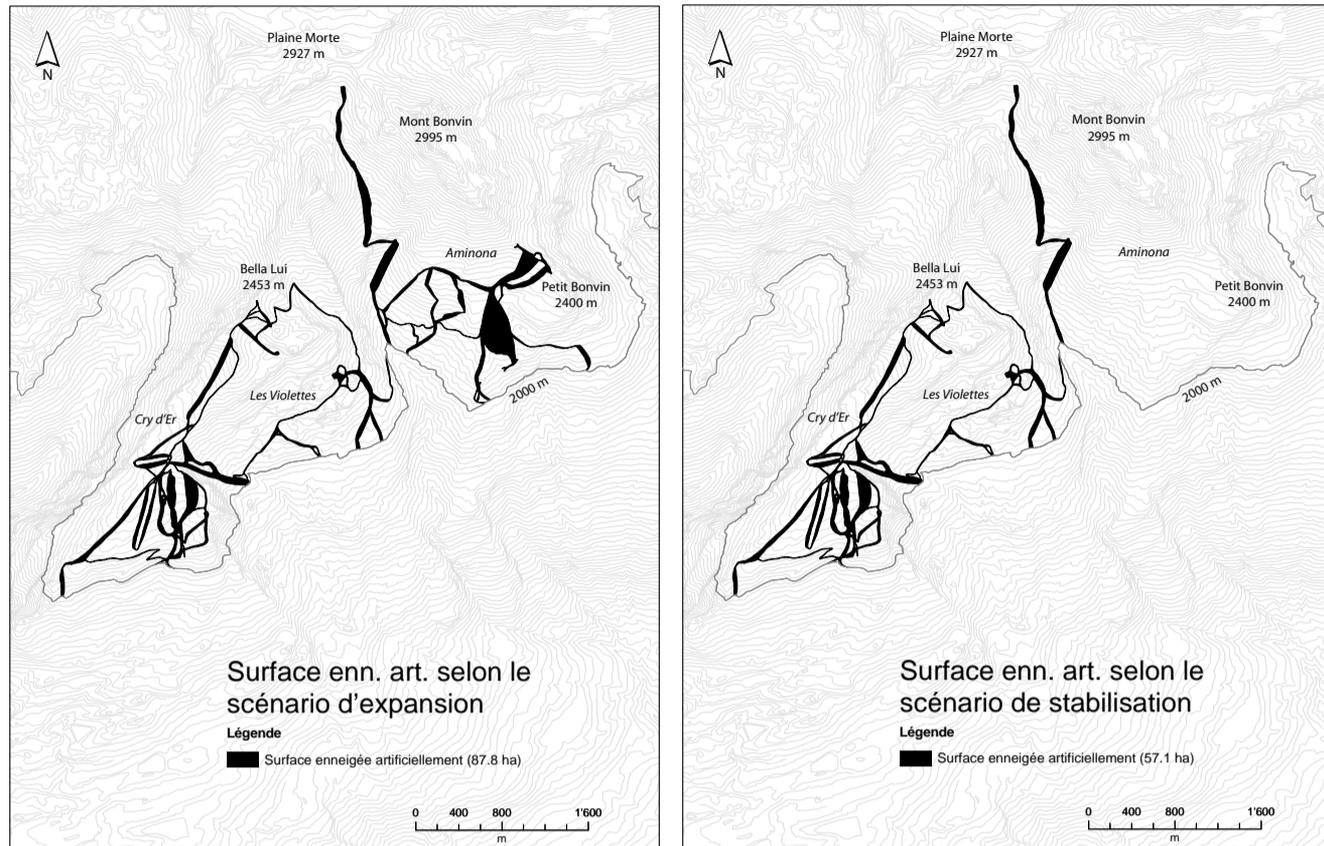


Fig. 5.27 – Surface du domaine skiable selon le scénario d’expansion et de stabilisation.

Quantité d'eau	Actuellement	Expansion	Stabilisation	Modération
Min	260'000 [m ³]	461'000 [m ³]	210'000 [m ³]	0 [m ³]
Max	450'000 [m ³]	797'000 [m ³]	363'000 [m ³]	0 [m ³]
Variation		+77%	-19%	-100%

Tab. 5.11 – Domaine skiable : quantité d’eau selon les scénarios socio-économiques.

utilisée pour produire de la neige artificielle. L’analyse des données météorologiques nous a fourni une estimation de la limite inférieure sous laquelle il ne sera pas possible d’utiliser les canons à neige, mais toute une série de variables, sur lesquelles n’existent pas de données, ont été ignorées. Cela été le cas, par exemple, de la profondeur de la neige gisante sur l’ensemble du domaine, de sa qualité ou du transport mécanique de la neige d’une zone à l’autre du domaine skiable.

Cette démarche a démontré que où cas où CMA SA suit le scénario de stabilisation, celui pour lequel les membre du groupe RégiEau ont exprimé leur préférence, la quantité d’eau utilisée pour l’enneigement artificiel diminuerait de 19%. Par contre, si la pratique de l’enneigement artificiel sera étendue à l’est sur le domaine d’Aminona sans opter pour des canons à neige performants (Breiling et Sokratov, 2012), la quantité d’eau nécessaire pourrait augmenter de 77%, ce qui se traduirait par une consommation annuelle maximale de presque 800'000 m³.

5.4.5 Hydroélectricité

Démarche

La production hydroélectrique adaptera sa production à la disponibilité de ressource en entrée dans le barrage de Tseuzier. Cette disponibilité est fortement liée à la fonte du glacier de la Plaine Morte. Dans le cadre du projet MontanAqua, cette thématique quantitative complexe est traitée par Martina Kauzlaric, doctorante à l'Université de Berne.

En ce qui concerne l'aspect qualitatif, les scénarios socio-économiques ont été caractérisés de la façon suivante.

- Scénario d'expansion ; l'infrastructure de Lienne SA est complétée par un système de pompage-turbinage destiné à repomper l'eau dans le barrage de Tseuzier. Fort développement des mini- et micro-centrales hydroélectriques et débits résiduels légaux inférieurs à ceux en vigueur aujourd'hui (modification de la LEaux).
- Scénario de stabilisation ; l'infrastructure de Lienne SA est complétée par un système de pompage-turbinage destiné à repomper l'eau dans le barrage de Tseuzier. Fort développement des mini- et micro-centrales hydroélectriques et débits résiduels identiques à ceux en vigueur aujourd'hui.
- Scénario de modération ; fort développement des mini- et micro-centrales hydroélectriques et débits résiduels légaux supérieurs à ceux en vigueur aujourd'hui (modification de la LEaux).

Résultats

En termes de scénarios socio-économiques qualitatifs, le tableau 5.12 résume la quantité d'eau qui arrivera dans le barrage de Tseuzier sans tenir compte des changements climatiques.

	Expansion	Stabilisation	Modération
Système de pompage-turbinage	Oui	Oui	Non
Débits résiduels légaux par rapport à ceux en vigueur aujourd'hui	Inférieures	Invariés	Supérieurs
Usage de l'eau pour l'hydroélectricité	++	+	-

Tab. 5.12 – Eau en sortie du barrage de Tseuzier à l'horizon 2050.

Discussion

À l'avenir, le barrage de Tseuzier va vraisemblablement jouer un rôle encore plus important qu'actuellement (scénario d'expansion et de stabilisation), principalement à cause de l'abandon progressif de l'énergie nucléaire, de la probable construction de l'« arc d'alimentation » conçu par l'ingénieur Yves Rey et de la possible réalisation d'un système de pompage-turbinage. La plupart des ressources hydriques de la région passera donc dans le lac artificiel de Tseuzier, pour être ensuite utilisée dans les manières illustrées dans la figure 5.28. Face aux changements climatiques et socio-économiques, les usages de l'eau stockée à Tseuzier pourraient changer considérablement. Si la production d'hydroélectricité va certainement garder un rôle de premier plan, les usages « mineurs » comme l'eau potable, l'eau d'irrigation et celle destinée à la production de neige artificielle pourraient gagner considérablement en importance (figure 5.28).

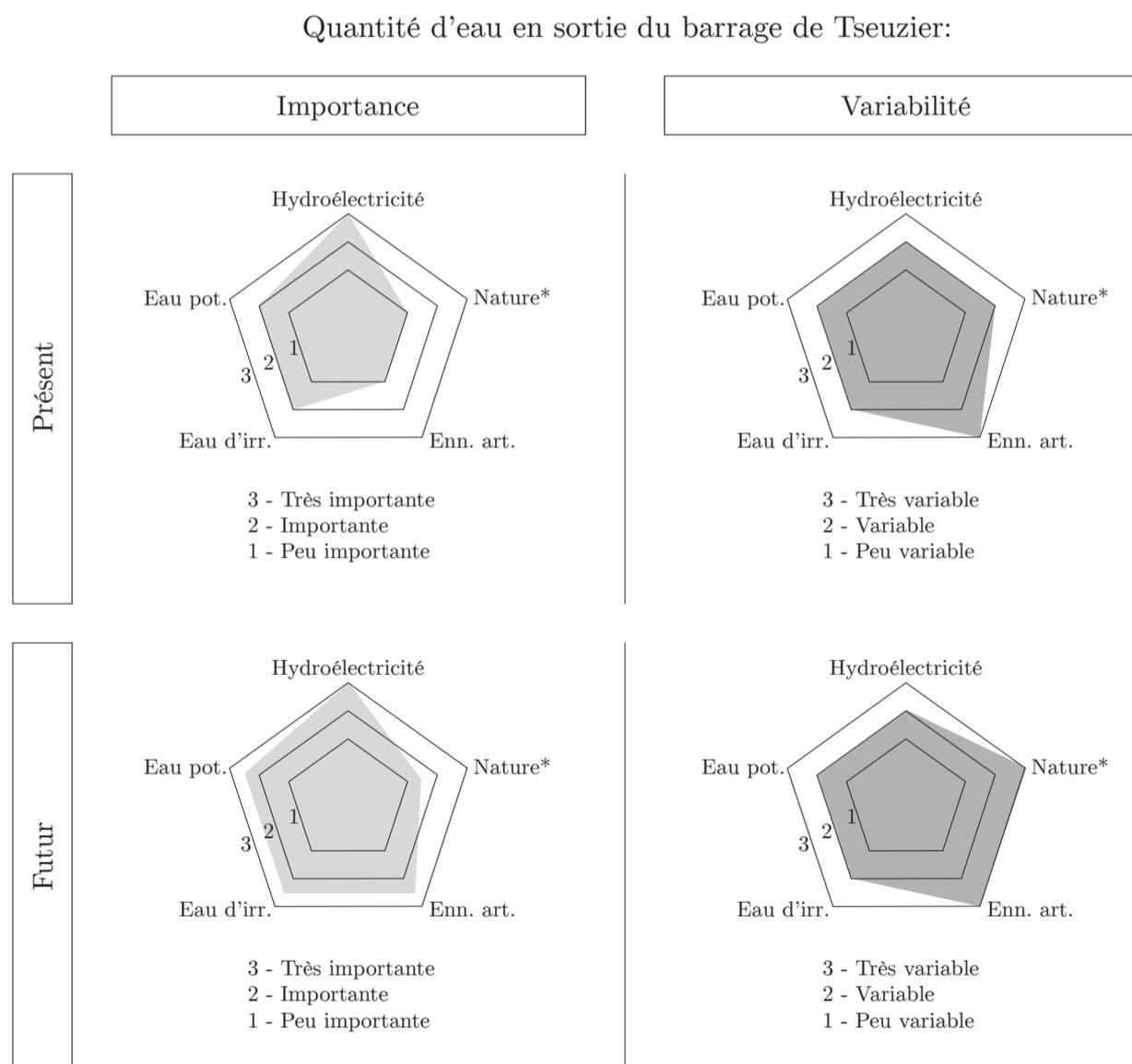


Fig. 5.28 – L'évolution du bassin multifonctionnel de Tseuzier.

* Débits résiduels

5.5 Conclusions

Ce chapitre avait pour but de donner un aperçu sur l'ensemble des méthodes utilisées et des estimations faites dans la partie de ce travail dédiée aux usages futurs de l'eau dans la région de Crans-Montana-Sierre. Le tableau 5.13 montre les particularités des approches utilisées pour chaque usage de l'eau.

Usage de l'eau	Méthode(s) utilisée(s) pour l'estimation des usages futurs
Eau potable	Estimation de la demande sur la base des données de 2010 et 2011 ; Intégration de variations liées à l'évolution démographique, la fréquentation touristique et à l'amélioration technologique prévue.
Irrigation	Modélisation du besoin en eau des cultures réalisée à l'aide de WEAP/MABIA ; Variation de surfaces sur la base de la modélisation de Rey et al. (2013) par rapport aux scénarios socio-économiques ; utilisation des scénarios climatiques CH2011.
Hydroélectricité	Estimation qualitative sur la base des scénarios socio-économiques.
Enneigement art.	Estimation de l'eau nécessaire par rapport aux nombre d'heures se caractérisant par des conditions d'enneigement idéales et les scénarios climatiques CH2011.

Tab. 5.13 – Méthode(s) utilisée(s) pour l'estimation des usages futurs.

Le chapitre 4, concernant la quantification des usages actuels, était déjà caractérisée par des approximations et des simplifications. L'estimation des usages futurs hérite inévitablement de ces caractéristiques, en ajoutant des incertitudes supplémentaires, qui font augmenter la marge d'erreur de manière significative. La seule façon de réduire l'incidence des approximations serait la mise en place d'un réseau de mesure régional pour les différents usages de l'eau et la collecte systématique d'informations telles que la fréquentation touristique, le développement de la zone bâtie, l'efficacité des appareils électroménagers (machines à laver, lave-vaisselle, etc.). Lorsque les séries de données seront suffisamment longues, c'est-à-dire pas avant une dizaine d'années après le début de l'étude, des analyses détaillées pourront être conduites (cf. chapitre 6.5). En revenant à la récapitulation des estimations des usages futurs, la figure 5.29 montre la variation mensuelle de chaque usage de l'eau pour les scénarios socio-économiques élaborés au sein du projet MontanAqua. D'après les figures 5.29 et 5.32, les scénarios d'expansion 1a et 1b se caractérisent par une demande totale en eau similaire. En fait, la diminution de surface agricole, qui se fait au détriment de la zone bâtie, qui caractérise les scénarios d'expansion, est compensée par la plus forte croissance démographique. Le scénario 2, qui prévoit une croissance démographique modérée et plus généralement le maintien du statu quo, se caractérise par une demande en eau potable plus importante qu'actuellement, mais pas au niveau des scénarios d'expansion. Par contre, le besoin en eau des cultures est plus important par rapport à l'actuel, à cause du « choix » d'irriguer toutes les prairies dans la région, ce qui en fait le scénario socio-économique avec le besoin en eau des cultures le plus élevé. Le scénario 3, celui de modération (voir chapitre 5.4.1), se caractérise par une décroissance démographique qui se traduit dans une diminution significative de la demande en eau potable. Le scénario 4, ou scénario

RégiEau, voit la demande en eau potable augmenter comme le scénario 2, alors que le besoin en eau est le plus faible de tous les scénarios précédemment conçus. En ce qui concerne l'enneigement artificiel, la figure 5.29 ne montre que les mois concernés par cette pratique et met bien en évidence les conséquences des politiques d'expansion, de stabilisation et de modération. L'impact quantitatif de cette pratique est limité par rapport à la demande en eau potable, l'irrigation ou l'hydroélectricité, mais le fait que la neige soit produite artificiellement pendant la période d'étiage, oblige à y porter une attention particulière, surtout par rapport à la disponibilité de la ressource hydrique.

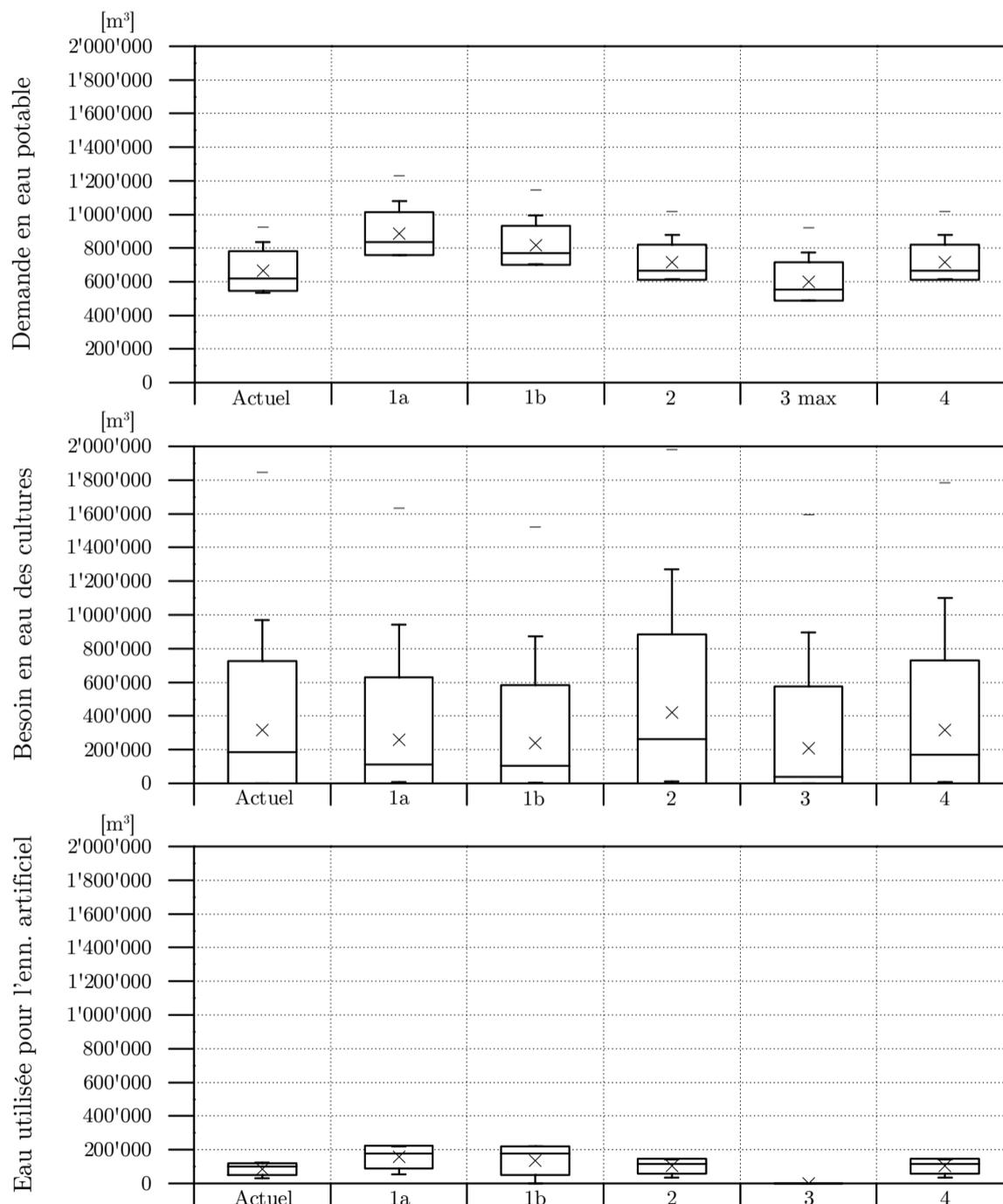


Fig. 5.29 – Variations mensuelles des usages de l'eau par scénario socio-économique.

Considéré comme improbable, le scénario 3 min n'a pas été inclue dans cette figure (voir chapitre 5.4.1)

Les figures 5.30, 5.31, 5.32, 5.33 et 5.34 et le tableau 5.14 montrent les moyennes mensuelles pour l'ensemble des scénarios socio-économiques, en mettant en évidence plusieurs caractéristiques de ces derniers :

- La demande en eau de tous les scénarios socio-économiques est plus importante pendant les mois estivaux, en particulier les mois de juillet et août.
- La variation de la quantité minimale d'eau potable varie grosso modo entre 500'000 (scénarios 3 max et 4) et 800'000 m³ par mois (scénario 1a, figure 5.30), alors que la valeur maximale varie entre à peine plus de 800'000 (figures 5.33 et 5.34) et 1'300'000 m³ par mois (scénario 1a, figure 5.30). Cela veut dire que la quantité minimale d'eau potable pour un scénario, dans ce cas le scénario 1a, est très proche à la quantité maximale pour d'autres scénarios (en l'occurrence, les scénarios 3 et 4).
- Sauf pour le scénario 3 (figure 5.33 et chapitre 5.4.1), l'ensemble des scénarios concorde sur le fait que les deux mois les moins demandeurs en eau sont celui de mars et celui d'octobre.
- La demande totale en eau est fortement influencée par l'évolution démographique, par la fréquentation touristique et par le besoin en eau des cultures modélisé à l'aide de WEAP/MABIA, qui est lui-même fortement influencé par la variation des surfaces agricoles intrinsèque aux scénarios socio-économiques établis.

En termes de quantité annuelle, la demande moyenne en eau des scénarios socio-économiques varie entre 9 et 14 millions de m³. La comparaison entre ces résultats et les valeurs calculées pour 2010 (10.5 millions de m³) et 2011 (13.25 millions de m³) (cf. figure 4.44), met en évidence le fait que la variation interannuelle actuelle de la demande en eau (influencée surtout par le climat) a une envergure similaire à celle de la demande en eau moyenne des scénarios socio-économiques.

Cette similarité fait penser que l'infrastructure actuelle peut satisfaire la demande en eau moyenne générée par les scénarios socio-économiques (tableau 5.14) sans rencontrer de problèmes particuliers. L'état actuel des connaissances ne permet pas, par contre, de s'exprimer à propos de l'adéquation de l'infrastructure en cas de sécheresse, c'est-à-dire que dans cette éventualité, des difficultés d'ordre technique ne sont pas à exclure. Améliorer le degré d'efficacité des infrastructures consacrées à l'approvisionnement hydrique permettrait de réduire au moins partiellement l'impact de phénomènes engendrant une demande en eau accrue et l'évolution prévue des ressources hydriques disponibles.

Année	Demande annuelle estimée en m ³
2010	10'453'978
2011	13'218'530
Scénario	Demande annuelle moyenne estimée en m ³
1a	13'005'589
1b	12'959'447
2	12'484'371
3 max	9'119'936
4	10'186'925

Tab. 5.14 – Variation de la demande en eau annuelle par scénario socio-économique.

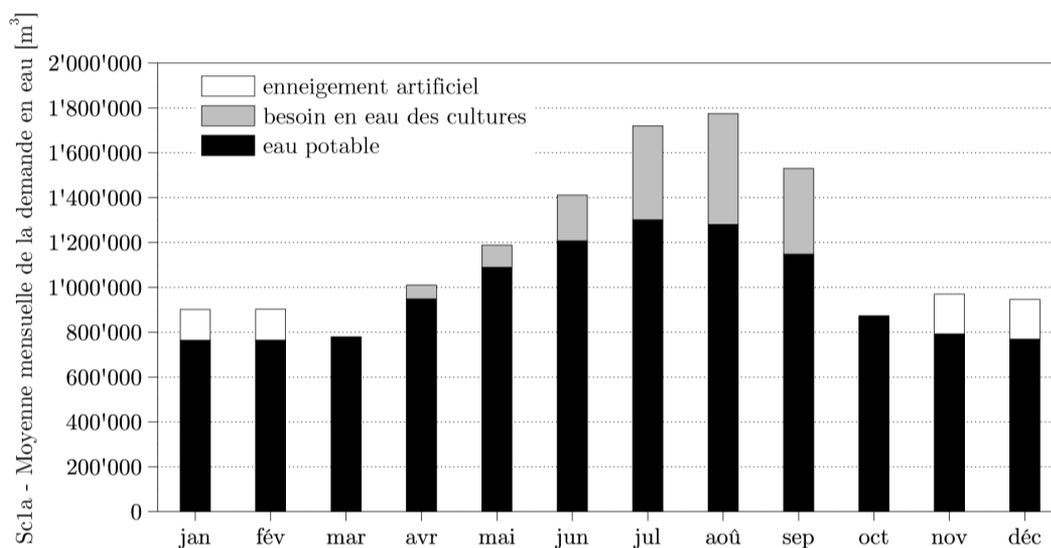


Fig. 5.30 – Demande en eau du Sc1a à l'échelle mensuelle (sans l'hydroélectricité).

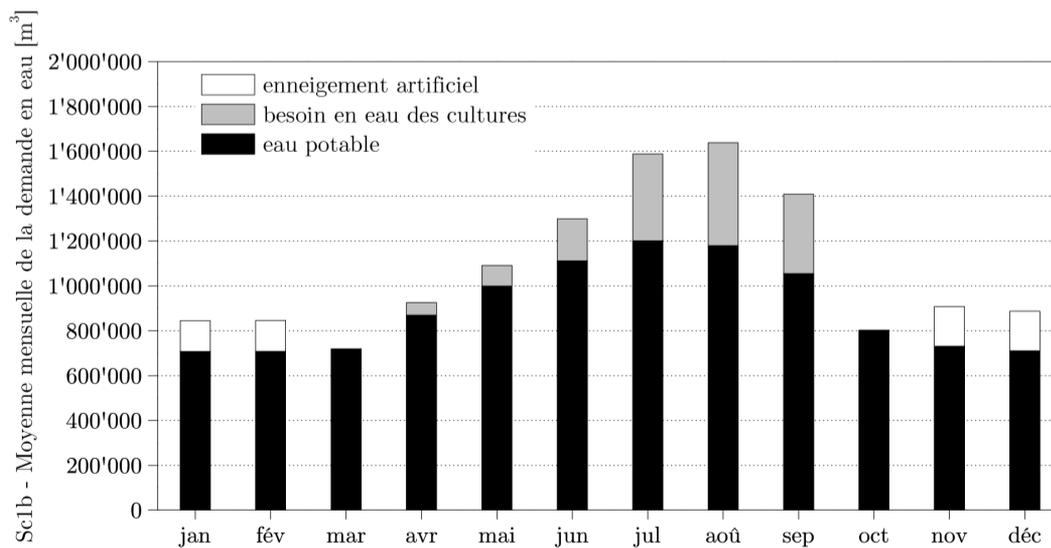


Fig. 5.31 – Demande en eau du Sc1b à l'échelle mensuelle (sans l'hydroélectricité).

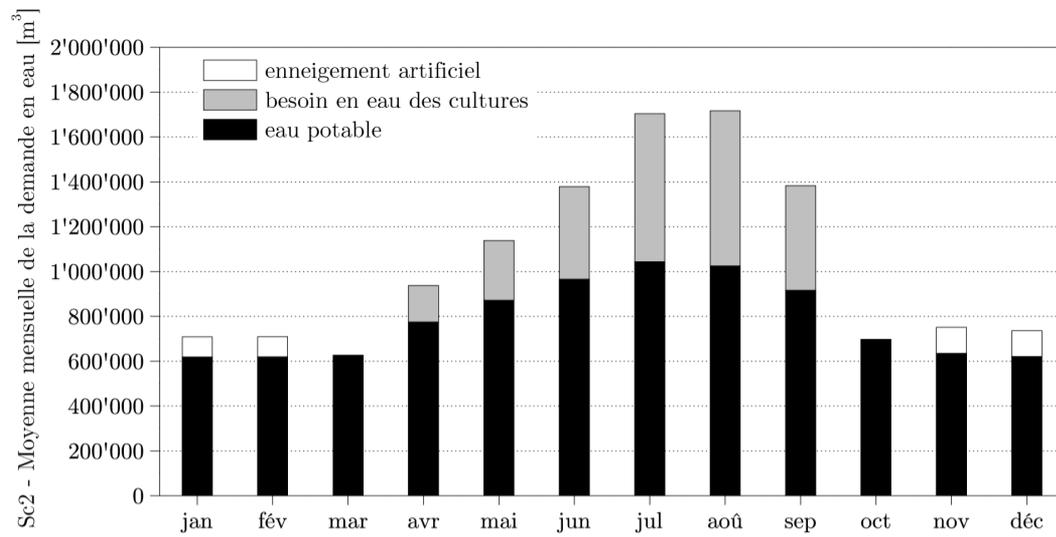


Fig. 5.32 – Demande en eau du Sc2 à l'échelle mensuelle (sans l'hydroélectricité).

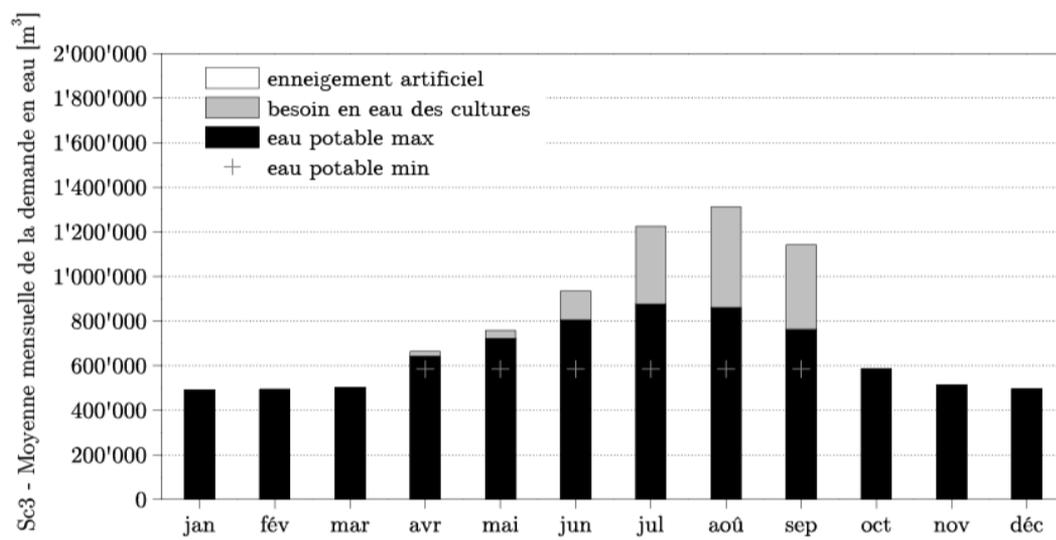


Fig. 5.33 – Demande en eau du Sc3 à l'échelle mensuelle (sans l'hydroélectricité).

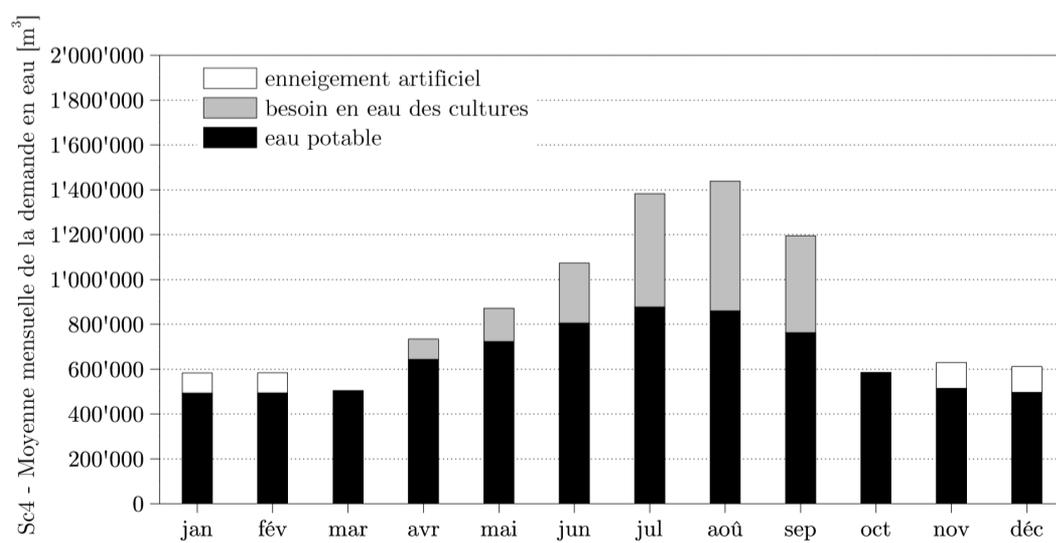


Fig. 5.34 – Demande en eau du Sc4 à l'échelle mensuelle (sans l'hydroélectricité).

Sixième chapitre

Conclusions

6.1 Ressources hydriques disponibles

Tout au long de ce travail l'accent a été mis sur les usages anthropiques de l'eau, c'est-à-dire sur la soustraction de la ressource à l'écosystème naturel. Ici, par contre, c'est l'estimation des ressources hydriques dans la zone d'étude du projet MontanAqua qui est traitée (figure 6.1).

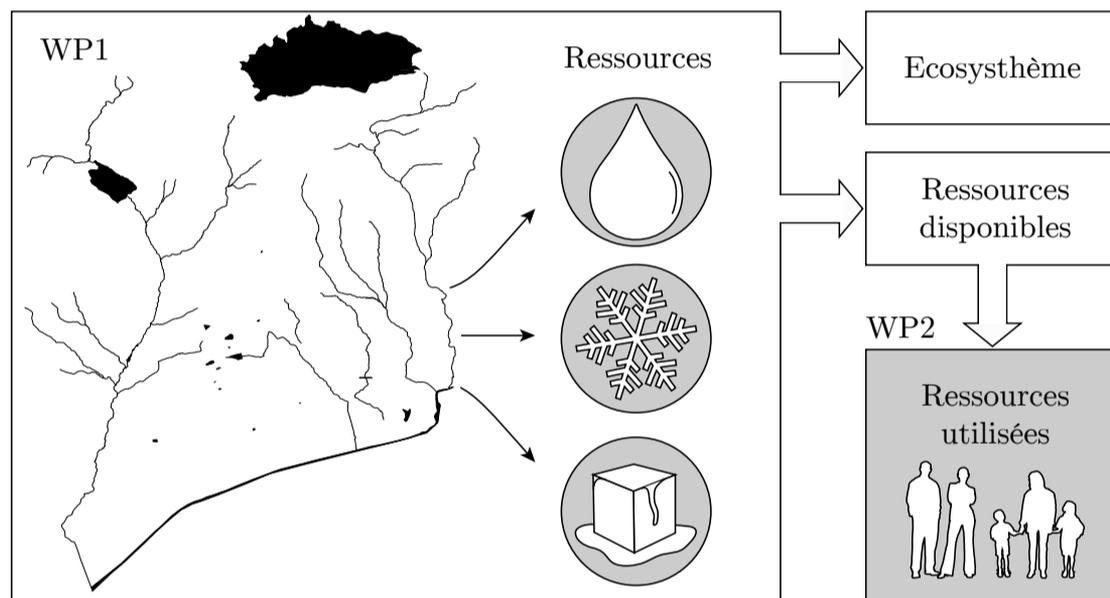


Fig. 6.1 – Liaison entre ressources hydriques disponibles et usages de l'eau.

Source : Service des registres fonciers et de la géomatique du canton du Valais (modifié).

La comparaison entre les usages de l'eau futurs - déterminés par les scénarios socio-économiques et climatiques - et l'évolution des ressources en eau disponibles⁵⁴, permet d'avoir une vue d'ensemble plus complète du « système eau » et d'en tirer donc des conclusions plus cohérentes. Sans rentrer dans les détails techniques (Finger et al., 2013), la démarche utilisée pour l'estimation des ressources hydriques a dû se concentrer, inévitablement, sur le rôle du glacier de la Plaine Morte (cf. chapitre 6.5) et sur le milieu karstique sur lequel il repose. L'étude des ressources hydriques a impliqué la densification du réseau de mesures climatologiques existant⁵⁵, la pose d'un lysimètre⁵⁶ et plusieurs expériences de traçages à l'aide de colorants organiques concentrés sur le glacier (Finger et al., 2013).

54. Modélisées par Martina Kauzlaric (WP1).

55. Sous la responsabilité d'Emmanuel Rey (WP1).

56. *Idem*.

La modélisation qui a permis d'obtenir l'estimation des ressources hydriques futures dans la zone d'étude a été réalisée avec ce qui a été modélisé pour la période 2007-2011 (tableau 6.1), en y ajoutant toute une longue série de variables climatiques, comme par exemple la variation de la température et des précipitations selon les scénarios CH2011, la fonte du glacier de la Plaine Morte (Hüss et al., 2013) et la relative évolution du ruissellement souterrain dans le milieu karstique (Finger et al., 2013). Dans le cadre du projet MontanAqua, c'est Martina Kauzlaric (WP1), doctorante à l'Université de Berne, qui s'est particulièrement occupée de ce domaine de recherche complexe.

Mois	Ressource 2037	Ressource 2038	Ressource 2039	Ressource 2040	Ressource 2041	Moyenne
jan	n.d.	1'550'170	763'721	791'184	1'067'900	* 1'043'244
fév	n.d.	1'708'520	645'529	610'593	1'106'000	* 1'017'661
mar	n.d.	1'612'790	687'203	830'020	956'073	* 1'021'521
avr	8'231'110	2'143'600	1'857'210	2'864'420	6'206'590	4'260'586
mai	18'028'300	15'259'700	20'925'800	13'765'400	6'125'250	14'820'890
jun	17'357'600	16'136'100	13'611'300	15'372'000	9'367'910	14'368'982
jul	21'382'900	10'365'500	12'438'700	11'511'000	5'733'890	12'286'398
août	12'380'400	6'154'490	3'732'460	6'805'840	1'998'240	6'214'286
sep	3'550'070	4'603'250	2'258'180	2'819'800	3'026'430	3'251'546
oct	3'596'680	1'484'610	1'940'030	2'374'580	4'718'070	2'822'794
nov	1'714'590	1'940'180	3'385'930	2'994'520	986'747	2'204'393
déc	1'456'750	979'192	1'481'110	1'410'220	741'407	1'213'736
TOT	> 87'698'400	59'066'622	61'630'720	59'917'780	38'904'535	> 54'879'914

Tab. 6.1 – Estimation des ressources hydriques disponibles à l'avenir (en m³).

Source des données : Bruno Schädler, Martina Kauzlaric, Simone Knecht et Thomas Ammann.

* Le calcul ne prend pas en compte les données pour 2037, qui ne sont pas disponibles.

Le tableau 6.1 montre qu'entre décembre et mars les ressources hydriques seront réduites à environ 1'000'000 de m³. Pendant le mois d'avril les ressources seront modérées à importantes; ces dernières deviendront très importantes pendant les mois de mai, juin, juillet et août, pour ensuite redevenir plus modestes après la fin de l'été (figure 6.1). L'évolution future de la ressource disponible et celle de la demande en eau de la région de Crans-Montana-Sierre sont deux facteurs qui doivent être surveillés avec attention (figure 6.2). À l'avenir, comme le montre la figure 6.2, les ressources hydriques seront en moyenne légèrement insuffisantes pour satisfaire la demande maximale d'eau engendrée par les usages associés aux scénarios d'expansion pendant les mois de janvier et février. La variation autour de la moyenne est très importante, en accentuant la pénurie hivernale et en causant des problèmes supplémentaires en août et septembre (figure 6.2 et tableau 6.2). Si ces derniers sont évitables en limitant des pratiques comme l'irrigation et en minimisant le gaspillage de l'eau, les problèmes qui surviennent pendant l'étiage ne sont pas si faciles à résoudre. La réalisation d'un « arc d'alimentation », comme celui conçu par Rey (2009), représente une solution technique qui peut potentiellement éloigner le danger d'une pénurie d'eau de la région; ceci à condition que toutes les communes de Crans-Montana-Sierre puissent en bénéficier.

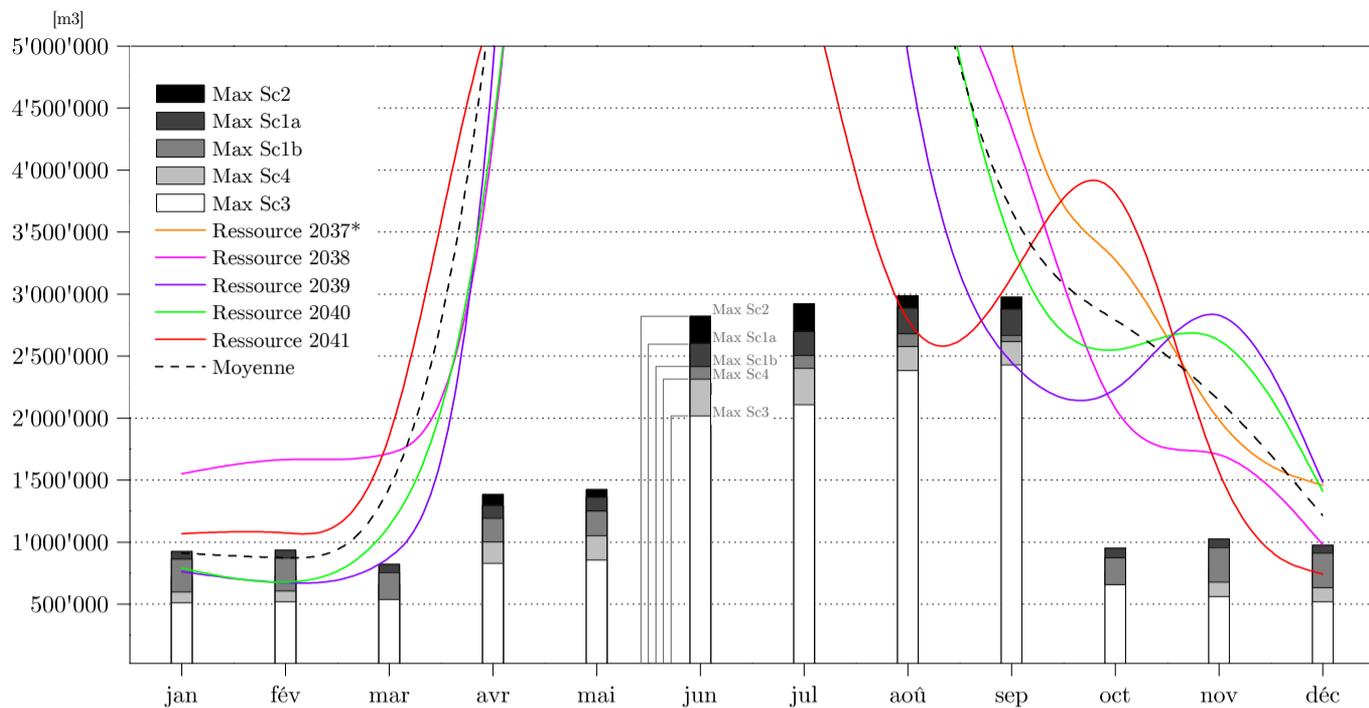


Fig. 6.2 – Estimation des ressources hydriques disponibles et des besoins en eau (en m³).

Source des données concernant la ressource : Bruno Schädler, Martina Kauzlaric, Simone Knecht et Thomas Ammann. Source des données concernant les usages : Mariano Bonriposi.
L'eau amenée dans le lac d'accumulation de Tseuzier n'y figure pas.
* Les données pour janvier, février et mars ne sont pas disponibles.

Mois	Ressource *	Max Sc1a	Max Sc1b	Max Sc2	Max Sc3	Max Sc4
jan	1'043'244	925'024	863'037	720'793	509'872	599'275
fév	1'017'661	934'494	871'266	727'061	517'798	607'201
mar	1'021'521	821'171	755'285	655'763	538'487	538'487
avr	4'260'586	1'296'790	1'191'910	1'382'860	830'291	1'000'680
mai	14'820'890	1'361'240	1'252'210	1'422'640	856'881	1'051'410
jun	14'368'982	2'603'360	2'415'770	2'822'970	2'017'080	2'316'010
juil	12'286'398	2'698'630	2'504'830	2'921'660	2'109'150	2'401'480
août	6'214'286	2'888'590	2'682'290	2'986'220	2'385'140	2'578'750
sep	3'251'546	2'879'270	2'669'070	2'976'440	2'428'780	2'616'950
oct	2'822'794	950'583	875'062	763'818	655'907	655'907
nov	2'204'393	1'024'850	956'522	792'204	561'941	677'300
déc	1'213'736	974'499	911'255	753'118	517'916	633'275
TOT	54'879'914	16'677'812	15'458'919	16'821'930	12'363'087	15'676'724

Tab. 6.2 – Ressources hydriques disponibles à l'avenir et usages maximaux (en m³).

Source des données concernant la ressource : Bruno Schädler, Martina Kauzlaric, Simone Knecht et Thomas Ammann. Source des données concernant les usages : Mariano Bonriposi.
* Moyenne mensuelle calculée au tableau 6.1.

Rolf Weingartner, chef du projet MontanAqua, souligne dans les colonnes de la Berner Zeitung du 23 mars 2013 l'importance de la région de Tseuzier pour l'approvisionnement en eau de la région de Crans-Montana-Sierre et celle de la multifonctionnalité du barrage homonyme (Petroni, 2013). Il s'avère donc fondamental d'élaborer des stratégies visant à anticiper et atténuer les effets d'une pénurie d'eau : en évitant le gaspillage, en améliorant l'efficacité des réseaux de distribution et, plus en général, en rationalisant l'usage de la ressource hydrique.

6.2 Discussion des résultats

En donnant une interprétation alternative à la célèbre phrase attribuée à Niels Bohr⁵⁷, faire des prédictions pour l'avenir est extrêmement simple. Ce qui s'avère être compliqué est prédire correctement l'évolution du phénomène concerné. Bien que la recherche de propriétés statistiques dans les séries temporelles permette de décrire un futur probable (Albran, 1973), la marge d'erreur impliquée reste toujours significative. Dans certains cas, cette marge d'erreur va s'ajouter à celle engendrée par l'estimation actuelle du besoin en eau, comme dans le cas de la demande en eau non satisfaite des cultures ou l'enneigement artificiel. Les résultats obtenus doivent donc être considérés comme des estimations et non comme des valeurs absolues. Afin d'encadrer les changements socio-économiques, quatre stratégies de développement impliquant des variables complémentaires ont été élaborées (scénario d'expansion, stabilisation, modération et RégiEau) ; la demande en eau pour chaque scénario a été ensuite évaluée sur la base des données à disposition. En règle générale, les différentes approches adoptées ont montré que les changements socio-économiques peuvent engendrer des variations beaucoup plus importantes par rapport aux changements climatiques sur la demande en eau de la région d'étude, ce qui met en évidence l'importance de la démarche interdisciplinaire que ce travail a suivi. L'estimation de l'impact des changements socio-économiques se révèle donc fondamentale pour estimer l'évolution des usages de l'eau à l'échelle régionale et dans ce sens la collaboration avec le groupe de suivi RégiEau a constitué un avantage significatif. La combinaison entre l'expérience des acteurs locaux et les données récoltées et analysées en suivant une démarche scientifique ont porté à l'obtention de résultats, à notre connaissance, uniques dans leur genre. Les résultats constituent une aide pour les acteurs locaux, qui ont désormais la possibilité de prendre des mesures politiques en faisant référence à des données pour l'ensemble de la zone d'étude et non seulement relatives à leur commune, en leur donnant une perspective plus large et cohérente en ce qui concerne la gestion de l'eau dans la région de Crans-Montana-Sierre. Dans ce chapitre, les hypothèses de travail sont tout d'abord vérifiées individuellement ; dans un deuxième temps, les enseignements qui en dérivent sont traités de manière à donner une vue d'ensemble sur ce que cette recherche nous a appris.

57. « Prediction is very difficult, especially about the future ».

6.2.1 Vérification des hypothèses de travail

Cette partie du travail s'articule autour des hypothèses de travail formulées au chapitre 1.6, qui sont reportées ici dans leur intégralité.

Hypothèse n°1 : l'impact des changements climatiques à l'horizon 2050

Les changements climatiques auront une incidence importante sur les usages de l'eau dans la région en 2050. De ce fait, les habitudes des acteurs locaux devront changer. La dissolution du glacier de la Plaine Morte engendre des problèmes d'approvisionnement en eau pendant les mois chauds de l'année d'une manière systématique, problème qui devient encore plus important dans le cas où des sécheresses similaires à celles de 1947 ou 2003 se reproduisent.

■ Malgré la fonte d'environ la moitié du volume du glacier de la Plaine Morte, les ressources hydriques restent largement suffisantes - à l'échelle annuelle - pour satisfaire le besoin en eau de la région de Crans-Montana-Sierre. La réduction des écoulements provoque une diminution des ressources hydriques disponibles en deuxième partie d'été. Celles-ci ne sont par contre pas toujours suffisantes pour répondre à la demande maximale de la zone d'étude, comme par exemple lors d'une sécheresse. Dans le cas de sécheresses d'une portée similaires à celles de 1947 ou 2003 (qui deviendront plus fréquentes selon les modélisations climatiques), le besoin en eau de la région d'étude sera vraisemblablement plus important par rapport à celui causé par la sécheresse de mars/avril 2011.

Hypothèse n°2 : les changements socio-économiques

Les changements socio-économiques ont un impact important sur la demande en eau régionale. Si le développement régional reste inchangé, garantir l'approvisionnement en eau devient de plus en plus important, surtout à la lumière d'une quantité de ressources en eau disponibles en constante diminution (cf. hypothèse 1).

■ Les changements socio-économiques ont un impact très important sur la demande en eau de la région de Crans-Montana-Sierre. La demande en eau annuelle moyenne varie entre 9 millions de m³ (Sc3) et 14 millions de m³ (Sc1a). Cette dernière dépend principalement de l'évolution démographique, de l'extension et de la typologie des surfaces irriguées. Le scénario socio-économique de stabilisation (Sc2) prévoit l'irrigation de toutes les prairies de la région de Crans-Montana-Sierre et se caractérise par une demande en eau maximale, en ne considérant que l'eau potable, l'irrigation et l'enneigement artificiel, d'environ 19 millions de m³ (très proche de celle du scénario Sc1a et à peine supérieure à celle du Sc1b). La variation de la demande en eau annuelle prévue

par les scénarios socio-économiques élaborés au sein du projet MontanAqua est donc très importante.

Hypothèse n°3 : l'importance de l'évolution démographique

L'évolution démographique est le facteur qui influence le plus la demande en eau des scénarios socio-économiques à l'horizon 2050. Ce facteur prépondérant génère une chaîne de conséquences qui touchent la plupart des aspects liés aux scénarios socio-économiques, comme par exemple la taille de la zone bâtie et sa densité, la surface destinée aux vignes ou encore celle destinée aux prairies; une série d'évolutions qui modifieront fortement la demande en eau dans le futur.

■ Le calcul de la demande en eau de chaque scénario a mis en évidence que, effectivement, l'évolution démographique a un impact important sur la demande en eau de la zone d'étude. Ainsi, la demande en eau des scénarios socio-économiques n'est pas proportionnelle au nombre de résidents. Le scénario 2, par exemple, a une demande en eau annuelle moyenne qui est très similaires à celle du Sc1b, tout en ayant une population inférieure de 7'500 individus. Celle-ci est dûe à l'utilisation du sol différente des deux scénarios, surtout en ce qui concerne les surfaces irriguées et la zone bâtie. D'un point de vue de la demande en eau, les scénarios 1a, 1b et 2 sont relativement similaires même en se caractérisant par une évolution démographique et une utilisation du sol assez différentes (cf. hypothèse précédente).

Hypothèse n°4 : conflits d'usage

L'eau potable est souvent utilisée pour l'irrigation de pelouses, de jardins et de gazons. Par conséquent, l'eau potable utilisée de cette façon représente une tranche importante de la consommation pendant la saison d'irrigation. Si pendant cette période, les précipitations sont moins fréquentes que d'habitude, la quantité d'eau potable utilisée augmente proportionnellement au phénomène climatique, favorisant des conflits d'usage.

■ La consommation d'eau potable des résidents dans la région et la température moyenne mensuelle sont fortement corrélées. Ceci, uni à l'observation de l'augmentation produite par le manque de précipitations lors de la sécheresse d'avril-mai 2011, fait présupposer que la quantité d'eau utilisée pour l'irrigation des jardins est très importante, autour d'un huitième de la consommation totale d'eau potable. La quantité d'eau potable consommée par les résidents augmente proportionnellement à la hausse des températures. En ce qui concerne les précipitations, par contre, leur absence (sécheresse) engendre un pic de consommation bien plus important (malheureusement, la quantité de données à notre disposition n'a pas permis un approfondissement de ce lien).

Des mesures d'augmentation de l'efficacité pourraient diminuer de manière importante la corrélation entre la température moyenne mensuelle et la consommation d'eau potable. La marge d'amélioration est proportionnelle à l'importance des mesures, politiques et infrastructurelles, prévues par les scénarios socio-économiques. Si les mesures politiques pour économiser l'eau sont relativement rapides à mettre en place, la modification et la réorganisation des infrastructures publiques existantes sont des processus lents et extrêmement coûteux. En ce qui concerne les bâtiments privés, il s'avère extrêmement difficile d'obliger les propriétaires à apporter des modifications pour économiser de l'eau potable. L'unique mesure réalisable semble être l'obligation de construire les nouvelles maisons selon un standard d'efficacité suivant le modèle du label Minergie (qui, toutefois, n'implique pas la consommation en eau potable).

Hypothèse n°5 : types d'habitations et consommation d'eau potable

Par rapport aux maisons individuelles et aux villas, la consommation d'eau potable par personne et par jour dans les immeubles est plus stable. Ici la consommation d'eau potable est plus influencée par la présence et l'absence des locataires, alors que la consommation d'eau potable des maisons individuelles est largement influencée par les conditions climatiques à cause de l'arrosage des jardins. Vue la structure de l'habitat dans la région (prédominance de l'habitat individuel), on doit s'attendre à un fort impact du changement climatique sur la demande en eau potable.

■ Cette hypothèse est difficilement vérifiable, car les données récoltées ne sont statistiquement pas représentatives. Globalement, les maisons individuelles semblent consommer beaucoup plus d'eau potable par jour et par personne que les immeubles. Cette différence semble être plutôt liée à la surface de gazon de la propriété et à sa fréquence d'arrosage (eau potable ou eau d'irrigation), qu'à la différence d'habitat (maison individuelle ou immeuble). L'impact des changements climatiques sur cet usage de l'eau est potentiellement important. Il serait pourtant possible de le réduire, par exemple, en séparant le réseau d'irrigation de celui de l'eau potable (comme à Venthône), ou en donnant la possibilité aux citoyens de se brancher sur une conduite communale (comme à Veyras), tout en décourageant la pratique de l'arrosage des gazons avec l'eau potable (interdiction, tarification proportionnelle au volume d'eau utilisé, etc.).

Hypothèse n°6 : évolution de la consommation d'eau d'irrigation

Les volumes d'eau amenés par le réseau d'irrigation mis à disposition de l'agriculture sont largement suffisants pendant les années ne présentant pas de phénomènes climatiques extraordinaires de sécheresse (printanière ou estivale). Ils sont par contre insuffisants lors d'années sèches. À l'avenir, la demande en eau de cet usage de l'eau sera influencée par les changements climatiques d'une manière importante, ce qui dé-

terminera une nette augmentation de la quantité d'eau nécessaire pour la satisfaire.

■ L'influence des changements climatiques sur les besoins en eau des cultures de la région de Crans-Montana-Sierre est quantifiable à +37% pour la vigne et +17% pour les prairies irriguées par rapport au besoin en eau estimé pour la période de référence 1980-2009. À l'avenir, donc, cet usage de l'eau sera influencé par les changements climatiques. L'augmentation de la quantité d'eau engendrée par ces derniers sera (sauf en ce qui concerne le scénario socio-économique 2, qui sera traité séparément) largement compensée par la diminution des surfaces agricoles. Cette grande influence comporte la diminution du besoin en eau des cultures dans un intervalle qui va de -34% pour le scénario de modération (3) à -0.2% pour le scénario RégiEau (où la diminution de surface agricole compense presque parfaitement les effets des changements climatiques). Le scénario 2 est en contraste avec les autres scénarios à cause du choix d'irriguer la totalité des prairies présentes dans la région, ce qui se traduit par une augmentation des besoins en eau des cultures de 32.6%. Effectivement, la quantité d'eau transportée par les bisses n'est pas suffisante pour la satisfaction du besoin en eau des cultures pendant les années les plus sèches ; mais il faut par ailleurs souligner que ce besoin théorique est rarement satisfait. Il est par contre évident que ces besoins augmentent nettement si la quantité de précipitations entre avril et septembre mesurée à Sierre est inférieure à 250 mm.

Hypothèse n°7 : la durabilité de la pratique de l'enneigement artificiel

L'altitude minimale de l'enneigement artificiel est influencée par les changements climatiques. De ce fait, la partie du domaine skiable équipée de canons à neige varie. Les besoins futurs d'eau pour l'enneigement artificiel resteront par conséquent dans la fourchette actuelle, en mettant en évidence la durabilité de la pratique.

■ Les changements climatiques font effectivement remonter l'altitude minimale de l'enneigement artificiel et, très probablement, le domaine skiable de Crans-Montana adaptera l'emplacement de ses canons à neige. Les scénarios socio-économiques font augmenter considérablement la fourchette actuelle des besoins en eau, surtout à cause de la variation de la surface enneigée artificiellement. Dans cette optique, une expansion de cette pratique sur le domaine d'Aminona peut avoir un impact significatif sur les besoins en eau pour la production de neige artificielle. Le scénario de stabilisation, qui ne prévoit aucune expansion du domaine de ski et est accompagné par une amélioration technologique des canons à neige capable d'économiser 30% d'eau, voit une consommation de 19% inférieure par rapport à l'actuel. Le scénario de modération, qui soutient l'hypothèse d'un domaine skiable caractérisé uniquement par un enneigement naturel, fait gagner de l'ampleur à la fourchette des besoins. L'évolution de la pratique de l'enneigement artificiel s'avère donc difficile à évaluer et dépendre fortement des

choix économiques faits pour les exploitants des domaines skiabiles.

Hypothèse n°8 : les mesures à prendre.

La gestion actuelle de la ressource hydrique est à revoir. La division politique de la zone d'étude implique une fragmentation de la gestion de l'eau qui pourrait être évitée en adoptant une gestion intégrée de la ressource. La rationalisation du réseau d'approvisionnement de l'eau potable et de l'infrastructure permettant l'irrigation dans la région est fondamentale pour réduire les pertes et économiser également de l'argent.

■ Le système de gestion de l'eau actuel est beaucoup moins performant que ce qu'il pourrait être; cependant, il arrive à satisfaire le besoin en eau de la région sans problèmes. Il serait à revoir dans la perspective du développement durable et de la gestion intégrée de la ressource, mais à cause de l'efficacité que le système actuel démontre et des coûts qu'une révision engendrerait, cette dernière ne sera vraisemblablement pas réalisée dans le court-moyen terme. Les divisions politiques de la région influencent clairement la gestion de l'eau, qui se base sur une multitude d'accords et conventions. Cette division représente donc également un obstacle à la gestion intégrée à l'échelle régionale, car les limites municipales et celles des ressources et des besoins ne correspondent pas.

L'efficacité du réseau d'approvisionnement de l'eau potable et celui permettant l'irrigation des cultures peuvent être améliorées de manière significative en limitant les pertes de l'infrastructure existante. Une réorganisation complète des infrastructures représenterait la solution qui permettrait d'économiser le plus d'eau; comme nous n'avons pas réalisé d'étude économique des pratiques actuelles, le rapport coûts-bénéfices d'une telle réorganisation ne peut toutefois pas être évalué.

6.2.2 Enseignements généraux

Les enseignements qui peuvent être tirés de cette recherche sont résumés ici afin d'en donner un aperçu général.

- Les changements climatiques prévus à l'horizon 2050 affectent la région de Crans-Montana-Sierre de façon modérée, avec une hausse moyenne et contenue des températures et une variation modeste des précipitations. Les visions catastrophistes que l'on retrouve dans les médias sont donc à rejeter. Notre étude n'a toutefois pas traité de l'horizon 2100 pour lequel les impacts des changements climatiques pourraient être plus importants.
- Sous l'influence des changements climatiques prévus et de ceux en cours, le volume du glacier de la Plaine Morte sera réduit de moitié (Hüss et al., 2011, 2013). Le temps de réponse du glacier implique un décalage entre l'augmentation des températures

et la fonte de la glace pour des raisons liées aux changements climatiques (Roe and O'Neal, 2005). Le manque d'eau de fonte déterminé par la réduction du volume du glacier est compensé par les précipitations et par la fonte de la neige (Finger et al., 2013).

- La recherche a permis de démystifier le rôle de l'enneigement artificiel en montrant que, par rapport aux autres usages (par exemple l'eau potable ou l'hydroélectricité), cette pratique n'utilise pas une quantité de ressource importante et extraordinaire, même si elle est utilisée pendant la période d'étiage. Cette pratique nécessite par contre la présence de réservoirs, afin de stocker les eaux de fonte. Le domaine skiable de CMA SA peut compter sur les réserves en eau du lac de Chermignon et, si nécessaire, sur celles du lac d'accumulation de Tseuzier. Dans le premier cas, cette pratique n'engendre que les coûts relatifs au pompage de l'eau vers les canons à neige. Dans le deuxième cas, par contre, CMA SA doit acheter l'eau stockée dans le lac de Tseuzier à Lienne SA. Le facteur limitant pour l'enneigement artificiel à l'heure actuelle est donc plus économique que climatique. Les besoins futurs pour cet usage dépendent essentiellement des choix économiques faits par les exploitants du domaine skiable.
- Les besoins quantitatifs de l'agriculture sont importants, mais la demande engendrée par cette pratique se manifeste pendant la période de l'année (entre avril et septembre) où les ressources hydriques à disposition sont importantes.
- Un des enseignements les plus marquants ressorti de cette recherche est sûrement l'importance du développement socio-économique d'une zone dynamique telle que celle que nous avons eu l'occasion d'étudier sur la demande en eau. Dans le futur, ce sont donc plus les choix socio-économiques réalisés à l'échelle régionale pour les changements climatiques qui détermineront l'évolution de la demande.
- Les usages de l'eau sont une conséquence directe du développement socio-économique d'une région. Il est donc évident, qu'à une région politiquement fragmentée, correspond un système de gestion de l'eau avec les mêmes caractéristiques.
- Les visions futures et les scénarios socio-économiques élaborés au sein du projet MontanAqua ont un impact très important sur le développement et les usages de l'eau de la région de Crans-Montana-Sierre. En fait, par rapport aux changements climatiques, l'évolution socio-économique de la région influence de façon beaucoup plus importante les usages de l'eau. Les autorités devraient dès lors mettre sur pied une stratégie de gestion à moyen terme fondée sur les choix de développement régionale. En d'autres termes, elles doivent évaluer les impacts d'options de développement régional (p. ex. développement d'Aminona, développement de la saison touristique estivale, etc.) sur les bassins en eau et en infrastructure (de stockage, de transport, etc.).

- L'importance de l'élaboration de ce genre de scénario est mise en évidence par le développement de la région (en particulier de la station de Crans-Montana, mais également de la ville de Sierre) après la deuxième guerre mondiale.

Si un projet similaire à MontanAqua avait été mené dans les années 1950 sans prendre en compte la possible évolution socio-économique de la région, ses résultats à l'horizon 1990 n'auraient eu plus aucun fondement, la station ayant changé radicalement sous plusieurs aspects (démographie, tourisme, utilisation du sol, etc.). Globalement, en ce qui concerne l'étude des usages de l'eau, travailler de façon interdisciplinaire est une exigence incontournable, quelle que soit la région d'étude choisie et l'horizon pour lequel nous voulons faire des estimations.

6.2.3 Le paradoxe d'un avenir très semblable à l'actuel

La collaboration avec le groupe de suivi RégiEau a porté à la réalisation d'un scénario socio-économique résumant la volonté politique des acteurs locaux. Ce dernier prévoit une très modeste modification de la situation actuelle, ce qui est franchement surprenant étant donné le dynamisme de la région de Crans-Montana-Sierre. La volonté du groupe RégiEau est donc à considérer comme paradoxale, en étant en claire contradiction avec l'évolution socio-économique actuelle. Dans les dernières années, la région a connu une forte croissance démographique, accompagnée d'une évolution de l'utilisation du sol (par exemple l'expansion de la zone bâtie) assez importante. Le décalage entre la volonté des acteurs locaux envers le développement régional et la réalité est, par conséquent, très accentué. Un futur comme celui imaginé par les membres du groupe RégiEau ne peut pas être obtenu sans prendre d'importantes mesures en matière d'aménagement du territoire et de toute une autre série de domaines en rapport avec ce dernier. L'entrée en vigueur de la modification de la Loi sur l'aménagement du territoire (LAT) et la modification de la Constitution fédérale résultant de la réussite de l'initiative populaire « Pour en finir avec les constructions envahissantes de résidences secondaires » imposeront probablement un frein à ce développement. Mais quelles peuvent être les raisons qui ont porté à cette vision de l'avenir de la région ?

Une explication possible est la suivante : le paysage satisfait des sentiments de familiarité, stabilité et sécurité (Meier et Buchecker, 2005), valeurs que les membres du groupe RégiEau ne veulent pas, peut-être même inconsciemment, mettre en danger. En étant en étroite interaction avec la réalité de la zone d'étude, il semble très improbable qu'ils ne soient pas conscients des changements qu'elle a subi dans le passé. Cette claire volonté de maintenir le *status quo* mais en ne proposant pas de mesures concrètes soulève donc plusieurs interrogations.

L'une d'elle concerne la méthodologie appliquée et la pertinence et la façon d'impliquer

des acteurs locaux dans notre démarche. En fait, les membres du groupe RégiEau ont pu participer à la démarche dès les premières phases de l'élaboration des scénarios socio-économiques, en leur faisant significativement de confiance (même après les difficultés initiales, qui ont porté à l'élaboration de trois différentes visions). A posteriori, il est évident que le groupe n'aurait dû être impliqué qu'après avoir obtenu un nombre considérable de résultats concernant le développement de la zone d'étude entre 1945 et 2010. Si, avant de débiter la démarche qui a porté à l'élaboration des scénarios socio-économiques, on aurait présenté des résultats montrant l'évolution de la région aux membres du groupe RégiEau, ces derniers n'auraient certainement pas exprimé une volonté politique autant conservatrice. On aurait par contre dû faire attention à ne pas influencer les intervenants en présentant les résultats obtenus précédemment. Ce qui est clair, c'est que chaque démarche impliquant la participation des acteurs locaux doit être conçue en se basant sur les caractéristiques de la composition du groupe de suivi et qu'il n'y a pas un chemin prédéterminé à suivre. En ne pouvant pas faire référence à une vaste bibliographie et en étant tous au notre premier projet interdisciplinaire d'une telle taille impliquant les acteurs locaux, nous avons probablement surestimé l'expérience et peut être même l'engagement de certains des membres du comité de suivi (que vous ne trouverez pas dans les remerciements). Ceci étant dit, l'équipe MontanAqua est très satisfaite de la qualité du travail interdisciplinaire que cette collaboration a permis de réaliser.

6.2.4 « The elephant in the room » où le rôle du barrage d'accumulation de Tseuzier en 2050.

Tout au long de ce travail, mais également de l'ensemble du projet, le rôle du lac d'accumulation de Tseuzier à l'avenir, surtout au niveau de la quantité d'eau consacrée à la production d'électricité, n'a pas été approfondi. Son importance n'a certainement pas été oubliée, mais plusieurs facteurs locaux, comme la possible réalisation d'un système de pompage-turbinage, ont empêché de traiter l'argument de la manière souhaitée. De plus, même si ce barrage rend un service important à la région et géographiquement il en fait partie, il va certainement subir l'influence de la politique énergétique nationale et internationale, tout comme celle du marché international de l'énergie, désormais libre.

L'usage de l'eau de Tseuzier pour l'irrigation, la production de neige artificielle et l'approvisionnement d'eau potable ne représente qu'un pourcentage très limité de l'eau en sortie du barrage et, en théorie, l'eau stockée dans le lac d'accumulation pourrait aisément satisfaire tous les besoins de la région de Crans-Montana-Sierre. La réalité se caractérise par contre par la concession de l'exploitation du barrage de Tseuzier à

Lienne SA, qui va arriver à échéance en 2038.

Au vu de l'évolution des besoins, et particulièrement des risques accrus de pénurie temporaire, notamment en deuxième partie d'été, les autorités communales concernées sont encouragées à prendre en compte les besoins autres qu'énergétiques, lors de la négociation de la nouvelle concession. La formalisation de la valeur multifonctionnelle de cet ouvrage est à encourager et l'horizon temporel concerné permet de l'envisager.

6.3 Réflexions finales

6.3.1 Contextualisation à l'échelle alpine

Le 2 mars 2012, le Conseil fédéral a posé les bases de la stratégie d'adaptation aux changements climatiques en Suisse, qui trouvera sa forme définitive à la fin de 2013 (OFEV, 2012a). En ce qui concerne directement la stratégie sectorielle de la gestion des eaux, trente sujets ont été classés par rapport à l'influence des changements climatiques et l'importance relative des changements. Dans la liste suivante sont indiqués cinq des usages qui subiront le plus, selon l'OFEV (2012a), l'influence des changements climatiques : hydroélectricité (lacs d'accumulation), irrigation, débits résiduels, eau potable et production de neige artificielle.

Les usages de l'eau extraits de la liste de l'OFEV (2012a) correspondent aux usages principaux présents dans la région de Crans-Montana-Sierre, et tous, à l'exception de l'enneigement artificiel, sont caractérisés par une grande nécessité d'intervention (OFEV, 2012a). Ce fait justifie pleinement le choix de la région d'étude, mais souligne également qu'un pourcentage important de régions sèches dans les Alpes sont vulnérables aux changements climatiques. À la lumière des résultats obtenus dans le cadre de ce travail, les changements socio-économiques représentent un facteur capable d'affecter significativement les usages de l'eau d'une région, et peuvent atténuer ou, ce qui semble plus probable, accentuer les effets des changements climatiques. Afin de pouvoir anticiper le stress hydrique dans ces régions, il s'avère donc nécessaire de prendre en compte autant les changements climatiques que l'évolution socio-économique prévue. De cette manière, d'éventuelles sources de conflit peuvent être identifiées avant l'aggravation de la situation, et en appliquant des mesures préventives ciblées, il est possible d'éviter des conflits d'usage (PNR61, 2010). Il faut également mettre en évidence que, de manière générale, plus une mesure est prise à l'avance et plus son rapport efficacité/coût est favorable.

6.3.2 Recommandations à l'échelle régionale

À l'avenir, les ressources en eau ne pourront pas toujours satisfaire la demande en eau maximale de la région de Crans-Montana-Sierre (au moins en ce qui concerne les scénarios d'expansion), ce qui rend tout à fait appropriée la réalisation d'infrastructures de stockage de l'eau supplémentaires. En même temps, le gaspillage de l'eau et, respectivement l'arrosage avec l'eau potable, doivent être limités. L'installation de compteurs d'eau potable et l'établissement d'un système de tarification proportionnel à la quantité d'eau utilisée, sont plus qu'envisageables dans toutes les communes de la région. À l'échelle communale, il faut prendre toute une série de mesures secondaires, comme l'encouragement à la récolte et à l'utilisation des eaux de pluie, l'application à la robinetterie de filtres qui permettent d'économiser l'eau ou, encore, la réalisation de systèmes « goutte-à-goutte » pour les viticulteurs. Les solutions techniques (comme la création d'un réseau séparé pour l'irrigation des pelouses ou l'amélioration des infrastructures existantes) doivent être accompagnés par des moyens politico-administratifs appropriés. Il est fortement souhaitable qu'une association de communes ciblée sur l'application des principes de l'Agenda 21, comprenant toutes les municipalités de la région de Crans-Montana-Sierre, soit constituée. De cette manière, la collaboration et la transparence entre les unités administratives et les acteurs impliqués dans la gestion de l'eau pourrait s'améliorer radicalement. Le développement de nouvelles stratégies d'adaptation aux changements climatiques et socio-économiques dans le domaine de la gestion de l'eau pourraient y être conçues. L'importance d'une démarche participative visant à l'implication du citoyen (publication régulière de rapports, conférences publiques, etc.) aux stratégies d'adaptation aux changements climatiques et socio-économiques à l'échelle régionale ne doit pas être négligée. La mise en pratique de ces recommandations dépend fortement de l'impact que la stratégie d'adaptation aux changements climatiques aura à l'échelle cantonale et régionale, mais aussi des futures sécheresses, et « last but not least », de la volonté de collaboration des élus politiques. Pour conclure ce chapitre, je me permets de m'approprier les mots utilisés par Reynard (2000a) pour terminer sa thèse, ce qui montre que 13 ans plus tard les questionnements sont toujours les mêmes :

Sauront-ils (les élus politiques) laisser tomber les considérations d'ordre partisan, historique et culturel pour passer à une véritable politique de gestion des eaux, rationnelle et efficace ? La balle est dans leur camp !

6.4 Difficultés rencontrées et limites du travail

Étape obligatoire de toute démarche scientifique, une saine autocritique permet de faire le bilan des difficultés rencontrées et des limites de son propre travail. Il s'agit d'une contribution au développement du domaine de recherche concerné, dans le but d'aider les futurs chercheurs. Un des plus grands obstacles rencontrés tout au long de la recherche a été le manque de données et la difficulté à en obtenir ; ceci a engendré une limitation des résultats obtenus et, par conséquent, il a fallu développer de nouvelles pistes d'étude. Les démarches alternatives qui ont été utilisées ont compensé l'absence d'informations, mais l'accès aux données manquantes aurait évidemment été préférable. Idéalement, pour effectuer une recherche qui vise à prévoir l'évolution de la situation actuelle, il faudrait pouvoir compter sur des séries temporelles de données considérablement plus longues. Afin de pallier à ce manque, l'ensemble des chercheurs du groupe MontanAqua a dû sacrifier temps, énergie et ressources économiques pour la collecte des données nécessaires au travail de recherche. Le temps consacré à l'analyse des données a ainsi été limité. Vu la taille et la complexité de la zone d'étude, des simplifications ont été nécessaires. Comme documenté dans les chapitres précédents, lorsque l'analyse de l'ensemble de la région n'était pas possible, on a procédé à des études de cas. Les résultats obtenus par ces dernières ont ensuite été généralisés sur le modèle de l'étude sur l'arrosage de la zone résidentielle irriguée conduit sur les communes de Montana et Veyras (cf. chapitre 4.5.6). Comme toute production scientifique, ce travail se base sur l'observation de phénomènes à l'état actuel et passé. Des hypothèses sont ensuite posées afin de prévoir l'évolution de ces derniers. Ainsi, et n'ayant pas à disposition des informations supplémentaires regardant l'évolution future de la zone d'étude, la relation de cause à effet est souvent considérée comme immuable dans le temps. Ce genre de compromis est inévitable et fait partie intégrante de l'évaluation de l'évolution de phénomènes complexes impliquant les scénarios climatiques et socio-économiques. Cependant, il est important d'admettre que la marge d'erreur des prévisions est proportionnelle à la distance temporelle entre les observations effectuées et le moment considéré dans le futur. La plus grande limite de ce travail se révèle ainsi être un atout : l'interdisciplinarité, outil indispensable pour la compréhension d'un phénomène complexe comme les usages de l'eau et pour l'élaboration de prévisions à l'horizon 2050.

6.5 Perspectives de recherche

Dans l'idéal, la suite logique de cette recherche serait la constitution de plusieurs zones d'étude de référence représentatives du territoire suisse. Afin d'avoir un panorama complet des usages de l'eau en Suisse, il s'avère nécessaire d'établir au moins une zone d'étude pour les catégories suivantes de régions : urbaine, péri-urbaine, agricole et alpestre. Sur la base de l'expérience acquise pendant le temps passé à travailler sur le projet MontanAqua, le choix de cette zone doit suivre quatre critères fondamentaux :

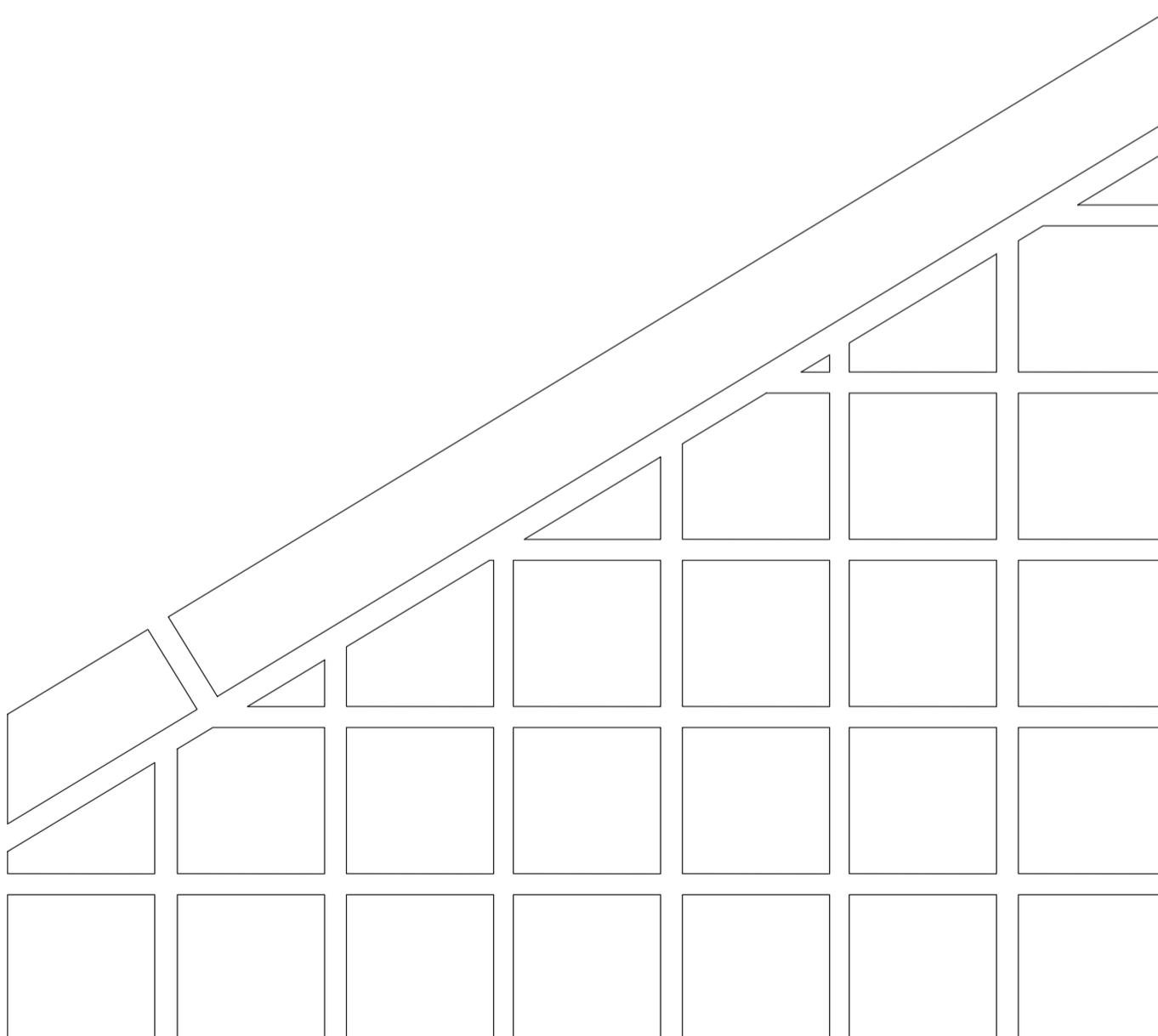
1. La préexistence de données et d'infrastructures adaptées à l'étude des usages de l'eau (compteurs, données SIG, etc.) ;
2. une faible fragmentation politico-administrative ;
3. un intérêt à la collaboration des acteurs des zones intéressées et
4. la possibilité de surveiller les ressources hydriques potentiellement disponibles.

Un tel projet engendrerait un effort économique considérable, mais permettrait d'étudier la demande en eau des acteurs des zones concernées et d'anticiper les situations de stress hydrique qui pourraient se manifester à l'avenir. Les résultats de cette étude pourront ensuite être généralisés pour l'ensemble du territoire suisse, qui, de cette manière, pourrait devenir un des pays les plus avancés en ce qui concerne la gestion des ressources hydriques. Une attention particulière devra être donnée à l'approche interdisciplinaire de la recherche en prenant, par exemple, le projet MontanAqua comme modèle, ce qui permettrait de mieux comprendre les causes de la variation de la demande en eau. La faible fragmentation politico-administrative facilitera la collaboration avec les acteurs locaux, qui devront être impliqués le plus possible et qui ne devraient possiblement pas avoir des intérêts économiques divergents. Les acteurs devront être motivés à collaborer avec le projet, par exemple en créant un label témoignant leur engagement dans le projet (cf. « Cité de l'énergie »⁵⁸ ou avec « Eco-cities »⁵⁹), et réaliser des campagnes de sensibilisation, qui pousseront aussi la population à s'engager (par exemple en donnant la disponibilité d'installer des compteurs supplémentaires dans leurs ménages). De cette manière, les facteurs socio-économiques et climatiques influençant la demande en eau des régions d'étude seront identifiés et d'éventuelles mesures visant à limiter leur impact pourront être élaborées. Les mesures adoptées dans les régions d'étude pourront ensuite faire partie d'un paquet de mesures à prendre dans toute la Suisse en cas de nécessité.

58. Plus d'informations à l'adresse <http://www.citedelenergie.ch> (consulté le 18 mars 2013).

59. Plus d'informations à l'adresse <http://www.eco-cities.net> (consulté le 18 mars 2013).

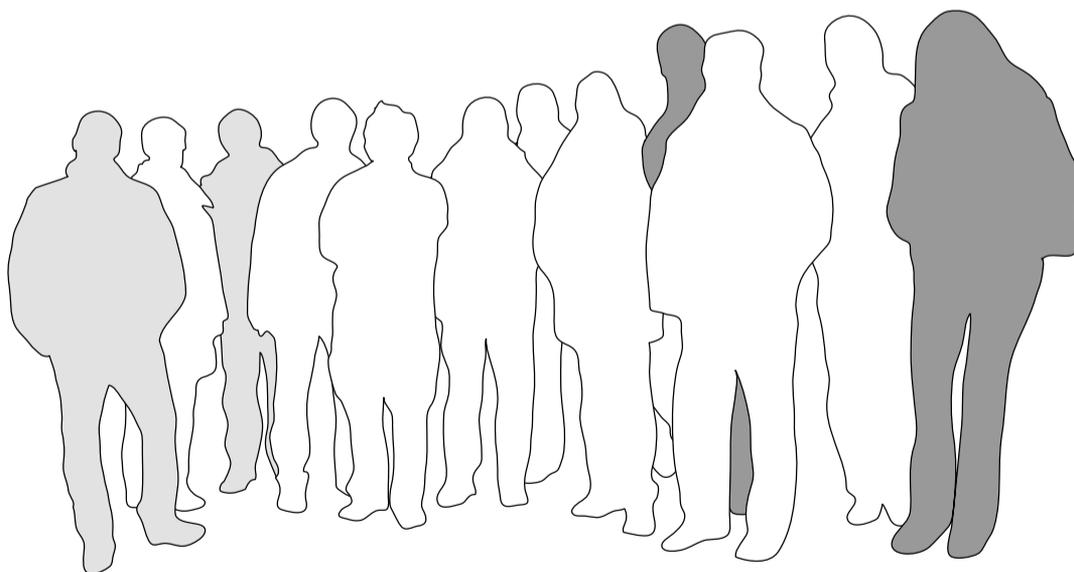
Annexes,
bibliographie
et cartes



Annexe 0 : Photo d'équipe

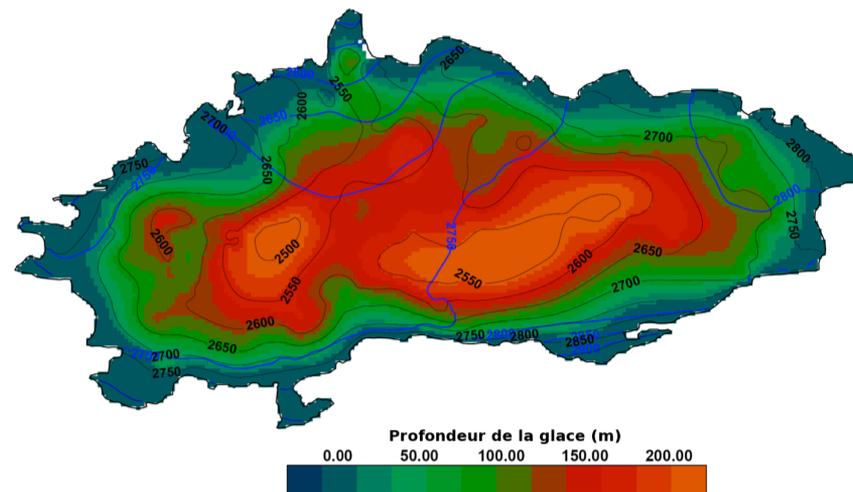


L'équipe du projet MontanAqua réunie lors du Kickoff Meeting du 10 février 2010 à Sierre.
De gauche à droite : Mariano Bonriposi, Martina Kauzlaric, Emmanuel Reynard, Hanspeter Liniger,
Emmanuel Rey, Stephan Rist, Karl Herweg, Rolf Weingartner, Olivier Graefe, Bruno Schädler,
Flurina Schneider et Christine Homewood. Absents : Martin Hoelzle et Martin Hüss.



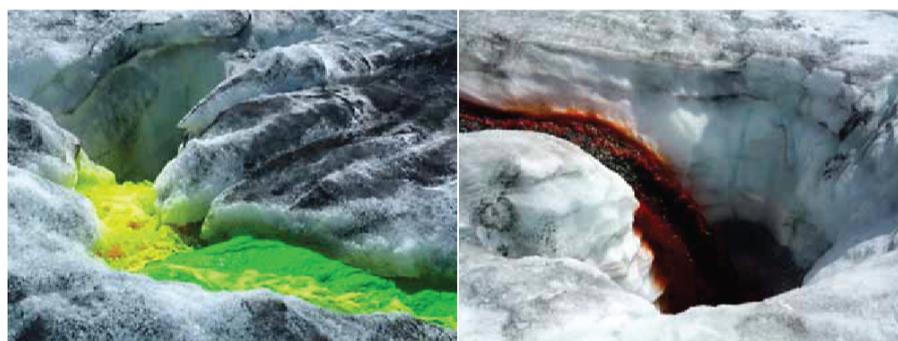
En blanc les chercheurs de l'Université de Berne,
en gris clair ceux de l'Université de Lausanne et
en gris foncé ceux de l'Université de Fribourg.

Annexe 1 : glacier de la Plaine Morte



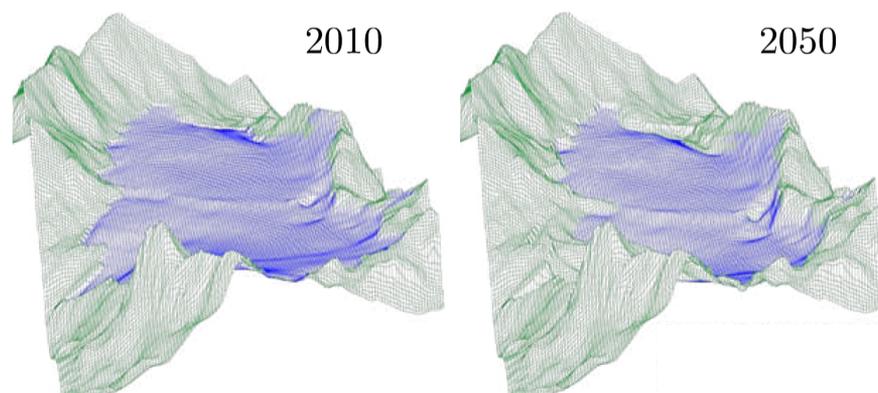
Prospection géophysique du glacier de la Plaine Morte.

Source : Hüß et al., in prep.



Injection des traceurs dans le glacier.

Photos : Matthias Hüß.



Modélisation du glacier en 2010 et en 2050.

Volume en 2010 : 0.86 km^3 / Volume en 2050 : 0.42 km^3

Source : Hüß et al., in prep.

Annexe 2 : Formulaire envoyé aux communes

Questionnaire destiné à la commune de [...]

Question 1 : approvisionnement

« Description des structures liées à l’approvisionnement de la commune »

Est-ce que cette description correspond à la réalité?

Oui

Non

Place pour les commentaires/observations.

Question 2 : fonctionnement

« Description du fonctionnement de l’approvisionnement de la commune »

Est-ce que cette description correspond à la réalité?

Oui

Non

Place pour les commentaires/observations.

Question 3 : quelles sont les méthodes utilisées dans votre commune? (UV, ozone, etc.)

Question 4 : comment fonctionne l’irrigation dans votre commune?

Est-ce qu’un schéma du réseau communal d’irrigation existe?

Si oui, je vous prie de joindre une copie à votre réponse.

Question 5 : compteurs eau potable

Une partie des communes de votre région a mis en place un système de compteurs afin d’éviter le gaspillage de l’eau potable :

Est-ce que vous avez mis également en place ce système?

Oui

Non

Est-ce que vous pensez que ce système est efficace?

Oui

Non

Place pour les commentaires/observations.

Question 6 : usage récréatif

Combien de piscines (publiques et privées) existent sur votre territoire?

Quelle est leur taille moyenne? (estimation)

Est-ce qu’il existe un règlement communal pour le remplissage des piscines?

Si oui, je vous prie de joindre une copie à votre réponse.

Question 7 : usages industriels

Est-ce que dans votre commune existent des problèmes liés à des pics de consommation en eau par l’industrie pendant certaines périodes de l’année?

Question 8 : une partie de mon travail consiste à créer un schéma du réseau hydraulique principal de l’eau potable de la région de Crans-Montana-Sierre (schéma ci-joint, cf. figure 3.6) [...]. Je vous demande donc de contrôler mon travail et éventuellement d’apporter des corrections directement sur le schéma.

Question 9 : une partie des ouvrages du réseau de l’eau potable et de l’irrigation de votre région n’est pas située dans la commune qui en est propriétaire. Je vous demande donc de rédiger deux listes : la première avec les ouvrages qui se trouvent sur votre commune et qui ne vous n’appartiennent pas et la deuxième avec les ouvrages qui se trouvent sur une autre commune mais qui vous appartiennent.

Annexe 3 : réservoir de St-Léonard



Exemple d'intégration d'un réservoir dans le paysage viticole à St-Léonard.



Système de pompage à l'extérieur des chambres (commune de St-Léonard).

Annexe 4 : gaspillage et autres pratiques discutables



a) Gaspillage d'eau à Montana (propriété privée).



b) Tuyaux abandonnés dans un bisse.

Annexe 5 : consommation en eau potable (Sierre)

Mois	Consommation d'eau [m ³]							Moyenne
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Janvier	215'809	252'023	176'329	189'576	184'037	173'181	214'290	200'749
Février	190'408	190'933	152'180	167'524	161'762	166'460	195'460	174'961
Mars	196'905	194'373	184'247	178'042	175'118	201'181	223'576	193'349
Avril	213'355	191'554	274'880	209'107	221'865	229'351	281'405	231'645
Mai	301'771	279'637	280'029	288'991	245'910	242'712	313'226	278'897
Juin	368'772	332'759	251'142	299'680	314'649	282'183	286'651	305'119
Juillet	337'657	359'834	259'389	299'103	309'315	354'629	273'799	313'389
Août	285'604	267'866	224'273	233'842	303'192	260'516	342'933	274'032
Septembre	258'146	234'088	211'247	224'588	251'146	251'148	275'961	243'761
Octobre	213'160	223'153	222'941	220'075	215'925	224'833	233'074	221'880
Novembre	230'624	173'917	183'199	171'509	188'531	220'925	240'477	201'312
Décembre	216'331	154'062	151'176	193'026	168'924	198'027	197'305	182'693
Moyenne	252'379	237'850	214'253	222'922	228'365	233'762	256'513	
Total	3'028'542	2'854'199	2'571'032	2'675'063	2'740'374	2'805'146	3'078'157	
Max	368'772	359'834	280'029	299'680	314'649	354'629	342'933	
Min	190'408	154'062	151'176	167'524	161'762	166'460	195'460	
Ecart-type	55'891	60'765	43'512	46'649	53'988	49'035	44'532	

Mois	Consommation d'eau par rapport à la moyenne mensuelle [%]							Moyenne
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Janvier	8	26	-12	-6	-8	-14		200'749
Février	9	9	-13	-4	-8	-5	12	174'961
Mars	2	1	-5	-8	-9	4	16	193'349
Avril	-8	-17	19	-10	-4	-1	21	231'645
Mai	8	0	0	4	-12	-13	12	278'897
Juin	21	9	-18	-2	3	-8	-6	305'119
Juillet	8	15	-17	-5	-1	13	-13	313'389
Août	4	-2	-18	-15	11	-5	25	274'032
Septembre	6	-4	-13	-8	3	3	13	243'761
Octobre	-4	1	0	-1	-3	1	5	221'880
Novembre	15	-14	-9	-15	-6	10	19	201'312
Décembre	18	-16	-17	6	-8	8	8	182'693

Consommation en eau potable de Sierre.

Source des données : Sierre Energie SA.

Annexe 6 : consommation en eau potable (Montana)

Mois	Consommation d'eau [m ³]							Moyenne
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Janvier		63'394	53'243		68'321	54'505	52'505	58'394
Février		58'862	53'795		66'613	51'937	49'766	56'195
Mars		61'730	56'794		71'451	50'355	50'051	58'076
Avril		50'394	54'214		67'970	47'860	55'045	55'097
Mai		49'845	51'693		64'352	47'787	67'979	56'331
Juin		62'750	57'069		69'595	60'008	61'862	62'257
Juillet		84'023	60'706		76'907	77'686	63'882	72'641
Août		72'001	64'104		81'235	69'224	73'497	72'012
Septembre		59'392	55'487		63'744	57'224	63'126	59'795
Octobre		51'832	54'123		54'133	52'014	54'643	53'349
Novembre		45'042	51'162		46'066	36'164	51'930	46'073
Décembre		50'970	67'660		59'542	46'126	63'542	57'568
Moyenne		59'186	56'671		65'827	54'241		
Total		710'235	680'050		789'929	650'890		
Max		84'023	67'660		81'235	77'686		
Min		45'042	51'162		46'066	36'164		
Ecart-type		10'426	4'844		9'086	10'475		

Mois	Consommation d'eau par rapport à la moyenne mensuelle [%]							Moyenne
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Janvier		9	-9		17		-10	58'394
Février		5	-4		19	-8	-11	56'195
Mars		6	-2		23	-13	-14	58'076
Avril		-9	-2		23	-13	0	55'097
Mai		-12	-8		14	-15	21	56'331
Juin		1	-8		12	-4	-1	62'257
Juillet		16	-16		6		-12	72'641
Août		0	-11		13	-4	2	72'012
Septembre		-1				-4	6	59'795
Octobre		-3	1		1	-3	2	53'349
Novembre		-2	11		0	-22	13	46'073
Décembre		-11	18		3	-20	10	57'568

Consommation en eau potable de Montana.

Source des données : commune de Montana.

Annexe 7 : cons. en eau potable (Lens et Icogne)

Mois	Consommation d'eau [m ³]							Moyenne
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Janvier					107'221	108'569	102'188	105'993
Février					105'950	98'975	91'372	98'766
Mars					105'657	81'530	94'856	94'014
Avril					102'464	100'450	106'353	103'089
Mai					125'438	96'334	127'795	116'522
Juin					146'567	103'833	114'723	121'708
Juillet					145'513	159'800	118'134	141'149
Août					155'235	122'806	133'347	137'129
Septembre					113'009	100'000	102'714	105'241
Octobre					92'868	87'628	82'190	87'562
Novembre					68'135	74'671	67'165	69'990
Décembre					101'782	102'929	81'222	95'311
Moyenne					114'153	103'127	101'838	
Total					1'369'839	1'237'525	1'222'059	
Max					155'235	159'800	133'347	
Min					68'135	74'671	67'165	
Ecart-type					23'976	20'869	18'910	

Mois	Consommation d'eau par rapport à la moyenne mensuelle [%]							Moyenne
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Janvier					1	2	-4	105'993
Février						0		98'766
Mars					12	-13	1	94'014
Avril					-1	-3	3	103'089
Mai					8	-17	10	116'522
Juin					20	-15	-6	121'708
Juillet					3	13	-16	141'149
Août					13	-10	-3	137'129
Septembre						-5	-2	105'241
Octobre					6	0	-6	87'562
Novembre					-3		-4	69'990
Décembre						8	-15	95'311

Consommation en eau potable de Lens et Icogne.

Source des données : commune de Lens.

Annexe 8 : consommation en eau potable (Randogne)

Mois	Consommation d'eau [m ³]							Moyenne
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Janvier		95'029	92'261	69'290	84'004	80'763		84'269
Février		90'234	91'959	112'151	83'229	83'174		92'149
Mars		91'152	94'154	112'095	81'006	83'573		92'396
Avril		66'917	106'203	101'649	72'119	76'228		84'623
Mai		65'932	103'244	116'505	70'116	76'031		86'366
Juin		74'384	100'781	116'986	70'017	82'464		88'926
Juillet		61'248	115'209	135'686	81'648	114'674		101'693
Août		100'000	134'036	138'847	97'887	106'252		115'404
Septembre		85'460	127'499	113'294	100'000	70'526		99'356
Octobre		77'196	120'210	96'090	85'817	61'274		88'117
Novembre		77'305	119'337	91'517	64'579	56'996		81'947
Décembre		78'811	71'933	82'129	70'419			75'823
Moyenne		80'306	106'402	107'187	80'070	81'087		
Total		963'668	1'276'826	1'286'239	960'841			
Max		100'000	134'036	138'847	100'000	114'674		
Min		61'248	71'933	69'290	64'579	56'996		
Ecart-type		11'735	16'913	19'465	10'696	16'258		

Mois	Consommation d'eau par rapport à la moyenne mensuelle [%]							Moyenne
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Janvier		13	9	-18	0	-4		84'269
Février		-2	0	22	-10	-10		92'149
Mars		-1	2	21	-12	-10		92'396
Avril		-21	26	20	-15	-10		84'623
Mai		-24	20	35	-19	-12		86'366
Juin		-16	13	32	-21			88'926
Juillet		-40	13	33	-20	13		101'693
Août		-13	16	20	-15	-8		115'404
Septembre		-14	28	14	1	-29		99'356
Octobre		-12	36	9	-3	-30		88'117
Novembre		-6	46	12	-21	-30		81'947
Décembre		4	-5	8				75'823

Consommation et en eau potable de Randogne.

Source des données : commune de Randogne.

Annexe 9 : consommation en eau potable (St-Léonard)

Mois	Consommation d'eau [m ³]							Moyenne ⁰
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	
Janvier					24'308	43'650	29514	32'491
Février					24'390	40'087	24044	29'507
Mars					27'842	49'166	34105	37'038
Avril					33'939	52'730	34235	40'301
Mai					36'145	48'223	44512	42'960
Juin					35'759	45'901	47615	43'092
Juillet				37'972	45'547	45'106	46258	43'721
Août				41'543	36'704	49'075	45838	43'290
Septembre				32'859	36'808	46'477	37044	38'297
Octobre				29'988	45'195	30'845		35'343
Novembre				18'862	36'804	20'704		25'457
Décembre				21'098	30'674	18'159		23'310
Moyenne						40'844	38'129	
Totale						490'123	343'165	
Max						52'730	47'615	
Min						18'159	24'044	
Ecart-type						10'942	7'898	

Mois	Consommation d'eau par rapport à la moyenne mensuelle [%]							Moyenne
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	
Janvier					34	-34		32'491
Février					36	-36		29'507
Mars					33	-33		37'038
Avril					31	-31		40'301
Mai					12	-12		42'960
Juin					7	-7		43'092
Juillet					3	-3		43'721
Août					13	-13		43'290
Septembre					21	-21		38'297
Octobre					-13	13		35'343
Novembre					-19	19		25'457
Décembre					-22	22		23'310

Consommation en eau potable de St-Léonard.

Source des données : commune de St-Léonard.

Annexe 10 : consommation en eau potable (Miège)

Mois	Consommation d'eau [m ³]							Moyenne
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Janvier				18'341	19'523	18'278	18'642	18'696
Février				19'171	17'838	15'188	17'813	17'503
Mars				18'249	22'184	22'400	27'529	22'590
Avril				30'397	34'578	31'384	45'107	35'367
Mai				44'542	45'826	47'055	56'959	48'595
Juin				45'912	33'352	35'665	42'082	39'253
Juillet				42'615	34'380	29'102	37'749	35'962
Août				40'339	25'514	32'914	27'470	31'559
Septembre				28'615	26'815	32'761	32'870	30'265
Octobre				23'785	29'843	29'785	25'773	27'296
Novembre				16'393	23'366	25'703	21'967	21'857
Décembre				22'378	18'835	22'692	18'226	20'533
Moyenne				29'228	27'671	28'577	31'016	
Total				350'737	332'053	342'926	372'187	
Max				45'912	45'826	47'055	56'959	
Min				16'393	17'838	15'188	17'813	
Ecart-type				10'797	7'929	8'185	11'790	

Mois	Consommation d'eau par rapport à la moyenne mensuelle [%]							Moyenne
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Janvier				-2	4	-2	0	18'696
Février				10	2	-13	2	17'503
Mars				-19	-2	-1	22	22'590
Avril				-14	-2	-11	28	35'367
Mai				-8	-6	-3	17	48'595
Juin				17	-15	-9		39'253
Juillet				19	-4	-19	5	35'962
Août				28	-19	4	-13	31'559
Septembre				-5	-11	8	9	30'265
Octobre				-13	9	9	-6	27'296
Novembre				-25		18	1	21'857
Décembre				9	-8	11	-11	20'533

Consommation en eau potable de Miège.

Source des données : commune de Miège.

Annexe 11 : consommation en eau potable (Venthône)

Mois	Consommation d'eau [m ³]							Moyenne
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Janvier				11'486	7'634	8'754	8'244	9'030
Février				12'173	7'545	7'761	8'180	8'915
Mars				10'646	7'135	9'019	10'709	9'377
Avril				8'201	7'496	8'654	12'000	9'088
Mai				9'067	9'922	7'371	14'368	10'182
Juin				10'525	7'780	10'703	13'085	10'523
Juillet				9'524	9'602	12'002	13'557	11'171
Août				9'460	9'912	10'348	13'116	10'709
Septembre				9'453	11'606	10'142	9'687	10'222
Octobre				8'319	10'561	10'497	10'277	9'913
Novembre				9'625	11'826	8'437	8'725	9'653
Décembre				8'019	8'923	8'937	9'001	8'720
Moyenne				9'708	9'162	9'385	10'912	
Total				116'497	109'942	112'624	130'949	
Max				12'173	11'826	12'002	14'368	
Min				8'019	7'135	7'371	8'180	
Ecart-type				1'239	1'585	1'297	2'134	

Mois	Consommation d'eau par rapport à la moyenne mensuelle [%]							Moyenne
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Janvier				27	-15	-3	-9	9'030
Février				37	-15	-13	-8	8'915
Mars				14	-24	-4	14	9'377
Avril				-10	-18	-5	32	9'088
Mai				-11	-3	-28	41	10'182
Juin				0	-26	2	24	10'523
Juillet				-15	-14		21	11'171
Août				-12		-3	22	10'709
Septembre				-8	14	-1	-5	10'222
Octobre				-16		6	4	9'913
Novembre				0	23	-13	-10	9'653
Décembre				-8	2	2	3	8'720

Consommation en eau potable de Venthône.

Source des données : commune de Venthône.

Annexe 12 : consommation en eau potable (Veyras)

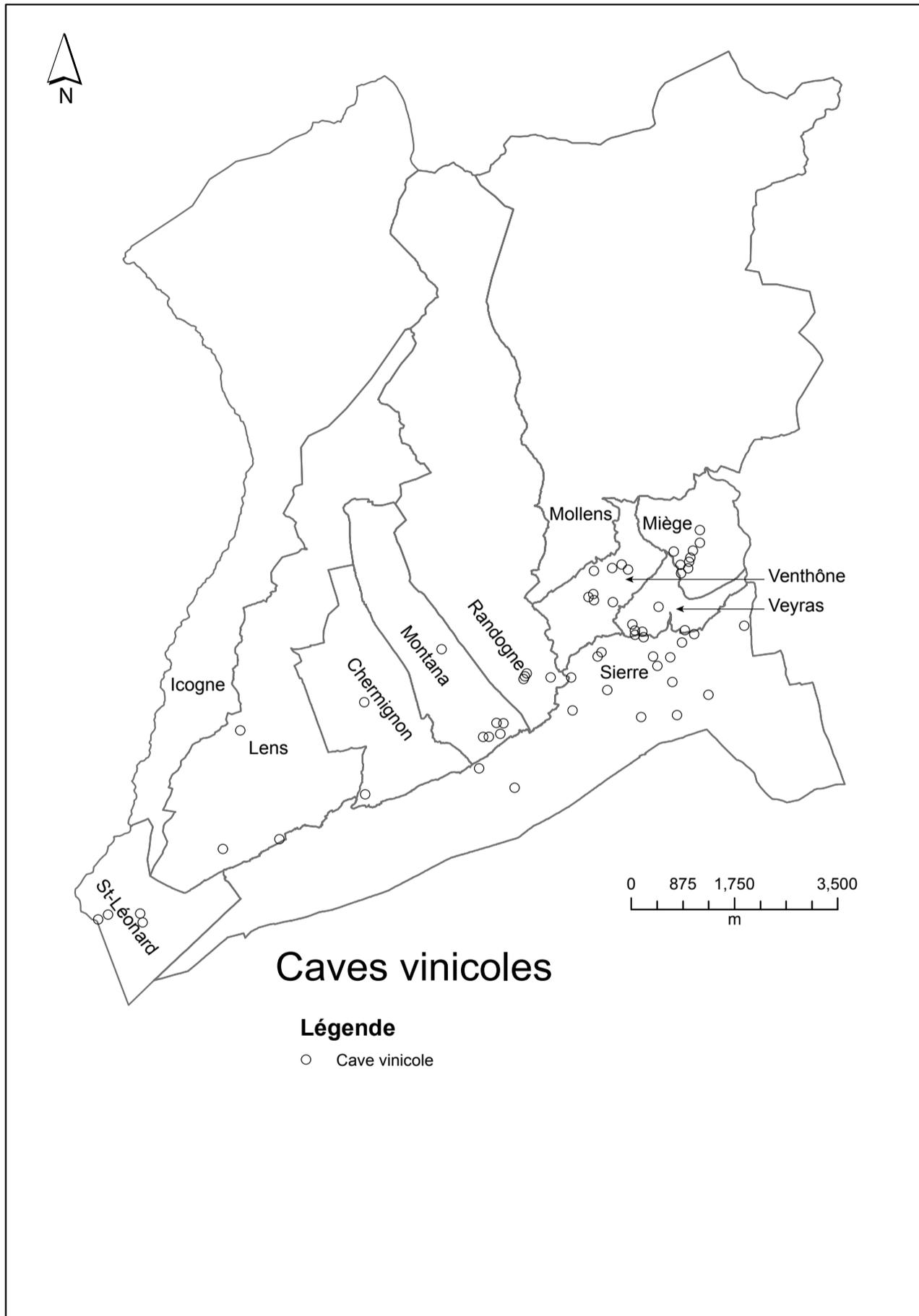
Mois	Consommation d'eau [m ³]							Moyenne
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Janvier				15'802	7'606	10'510	15'315	12'308
Février				15'417	9'567	9'689	14'732	12'351
Mars				16'395	22'473	11'288	23'191	18'337
Avril				18'953	25'834	27'641	23'874	24'076
Mai				23'625	27'346	27'778	21'621	25'093
Juin				24'408	13'382	28'019	15'908	20'429
Juillet				26'874	24'306	21'333	16'364	22'219
Août				25'850	17'268	29'045	17'567	22'432
Septembre				22'785	23'998	29'522	17'526	23'458
Octobre				24'606	25'479	25'578	9'426	21'272
Novembre				4'848	18'834	11'201	12'076	11'740
Décembre				3'778	9'836	6'310	14'634	8'640
Moyenne				18'612	18'827	19'826	16'853	
Total				223'340	225'928	237'914	202'233	
Max				26'874	27'346	29'522	23'874	
Min				3'778	7'606	6'310	9'426	
Ecart-type				7'446	6'835	8'781	4'124	

Mois	Consommation d'eau par rapport à la moyenne mensuelle [%]							Moyenne
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Janvier				28	-38	-15	24	12'308
Février				25	-23	-22	19	12'351
Mars				-11	23	-38	26	18'337
Avril				-21		15	-1	24'076
Mai				-6	9	11	-14	25'093
Juin				19	-34	37	-22	20'429
Juillet				21	9	-4	-26	22'219
Août				15	-23	29	-22	22'432
Septembre				-3	2	26	-25	23'458
Octobre				16	20	20	-56	21'272
Novembre				-59	60	-5	3	11'740
Décembre				-56	14	-27	69	8'640

Consommation en eau potable de Veyras.

Source des données : commune de Veyras.

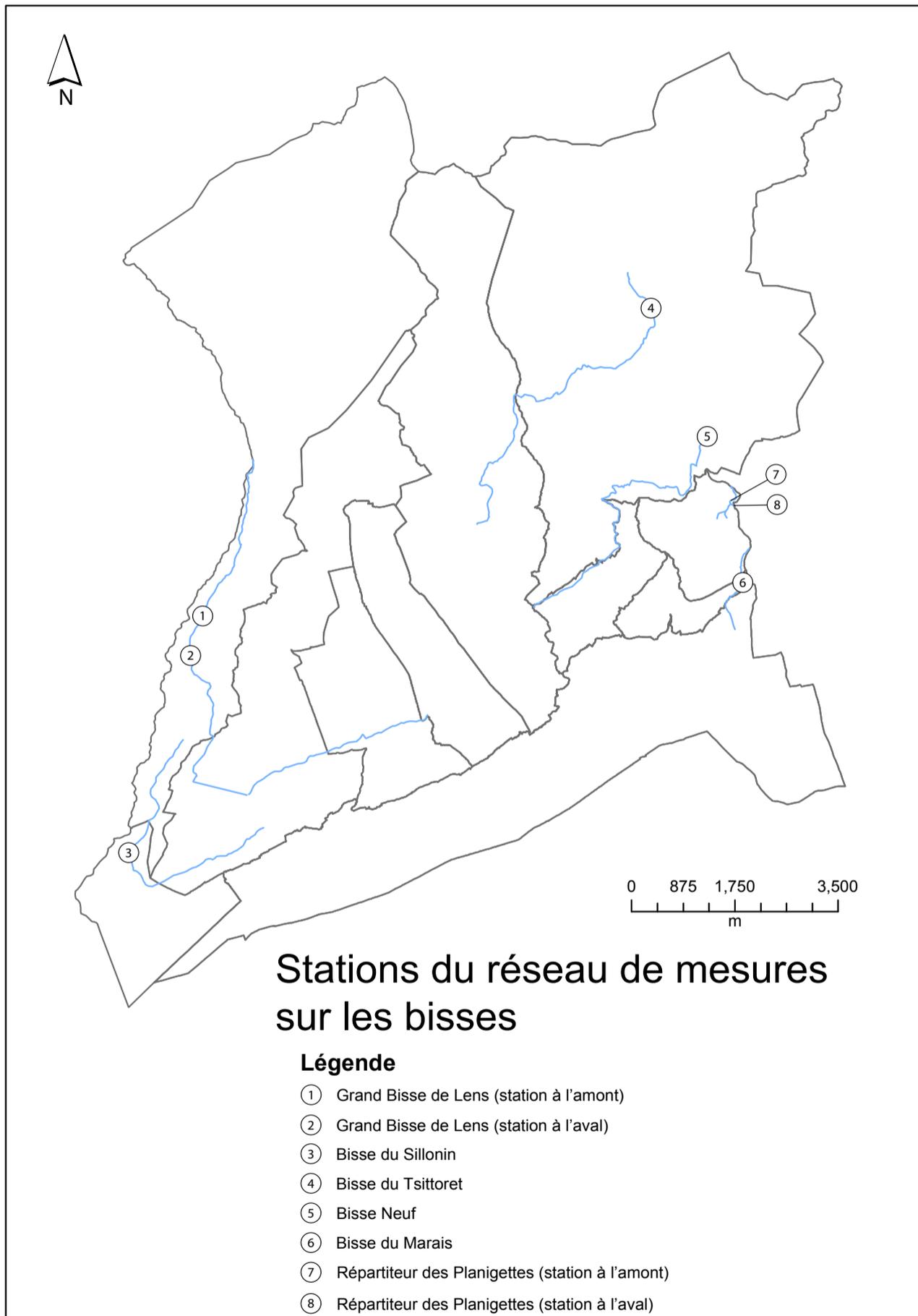
Annexe 13 : caves vinicoles



Caves vinicoles de la région de Crans-Montana-Sierre.

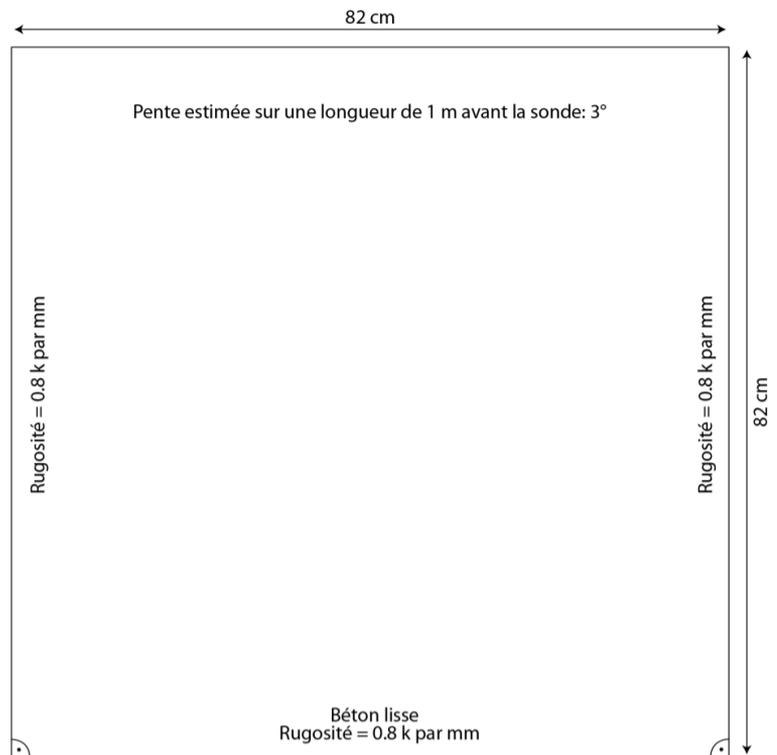
Source des données : Les vins du Valais, 2012.

Annexe 14 : stations de mesure sur les bisses

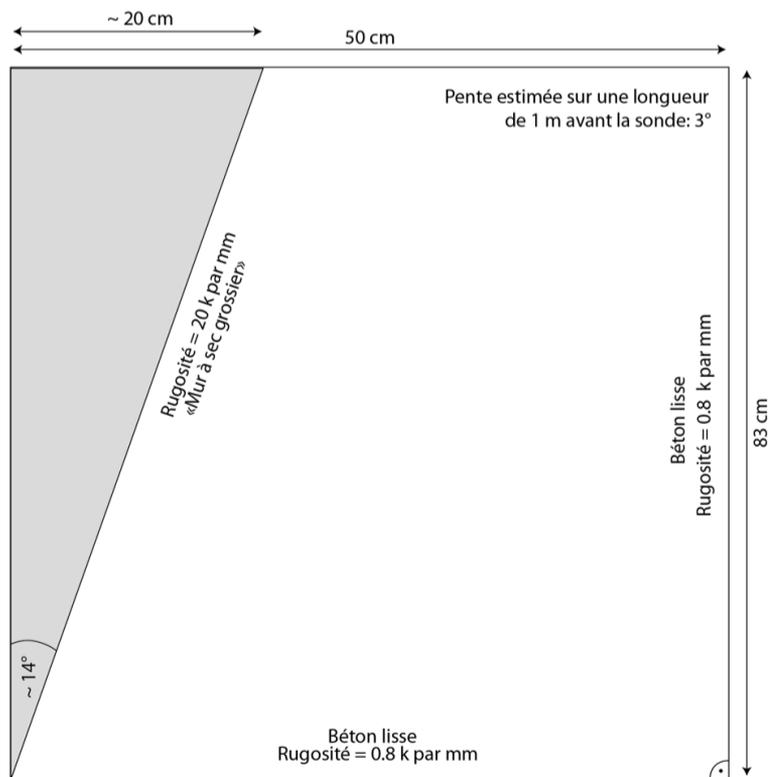


Stations du réseau de mesure sur les bisses.

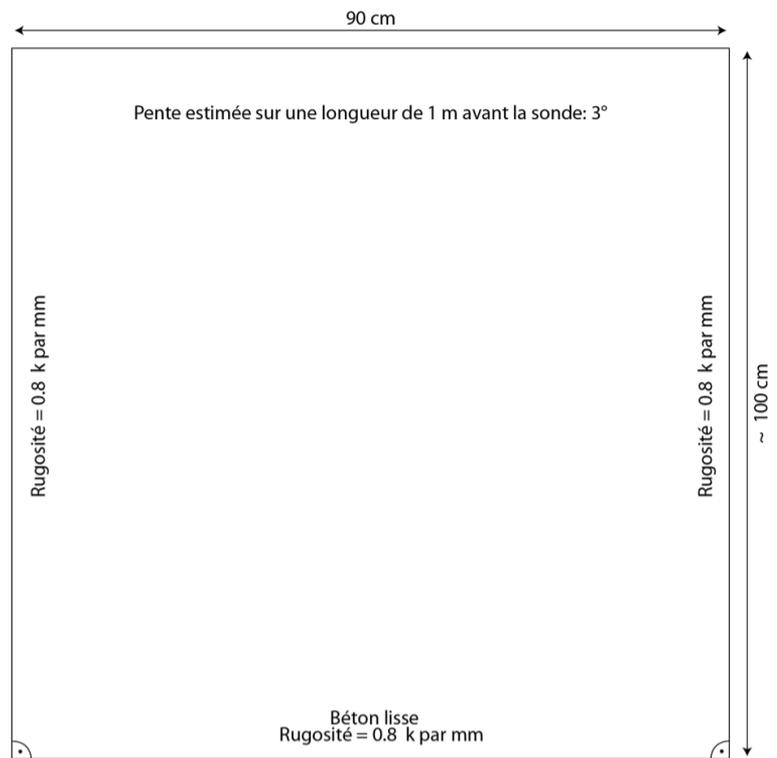
Source : Service des registres fonciers et de la géomatique du canton du Valais (modifié).



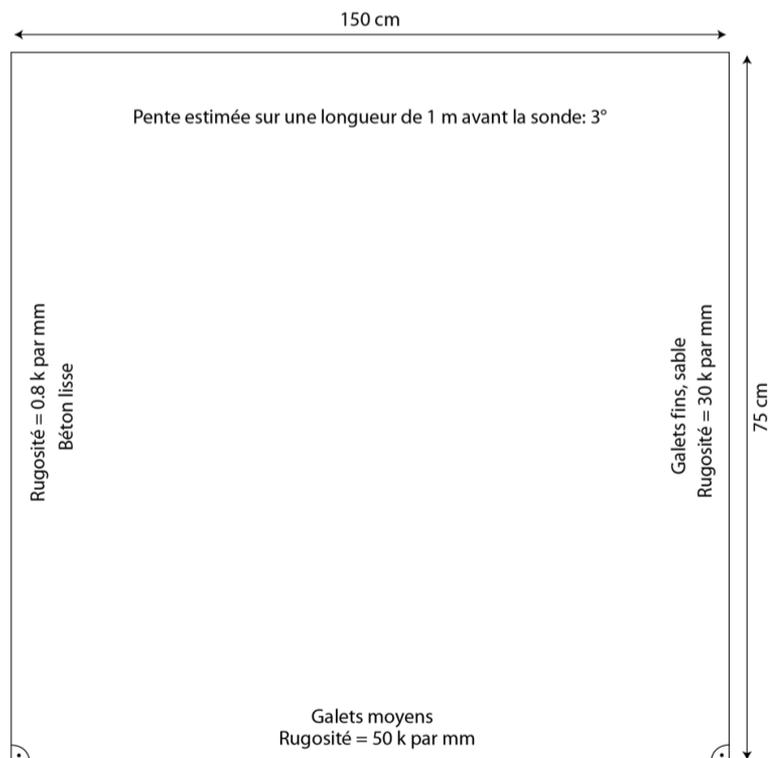
Paramètres physiques de la station de mesure amont du Grand Bisse de Lens.



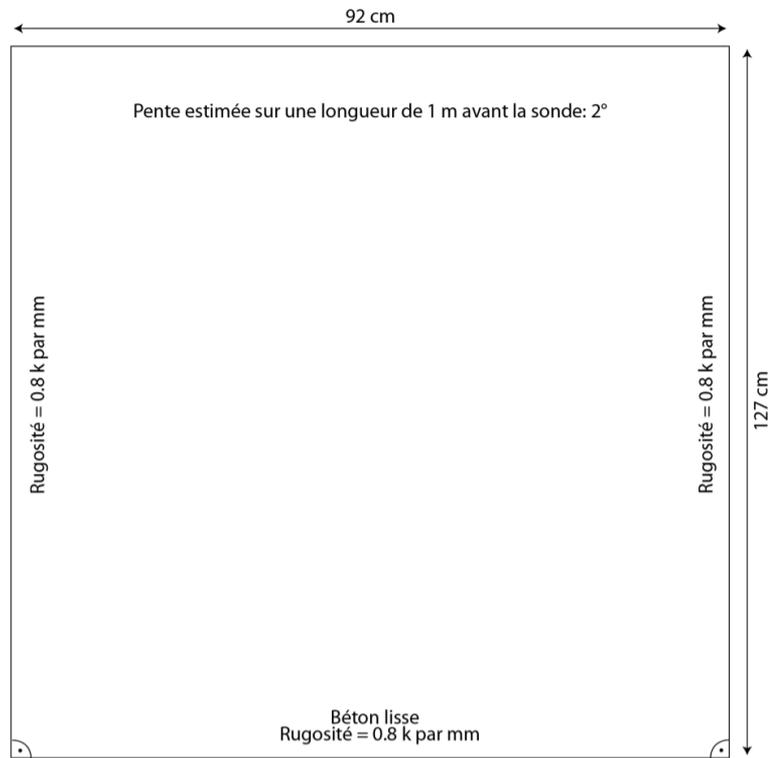
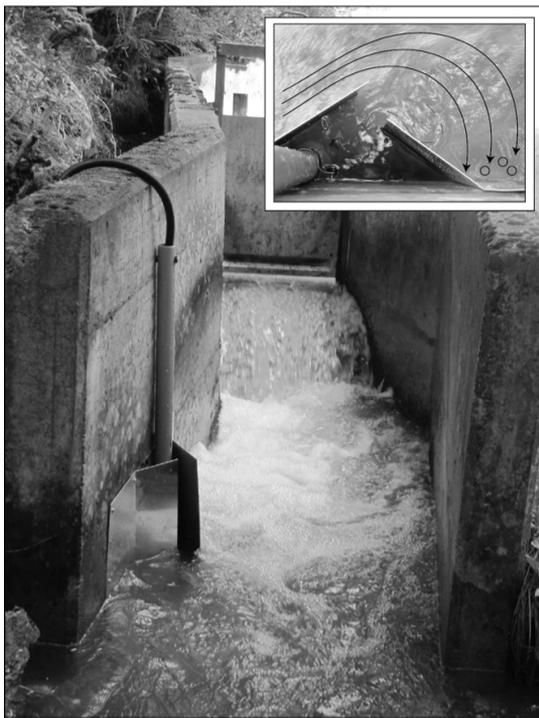
Paramètres physiques de la station de mesure aval du Grand Bisse de Lens.



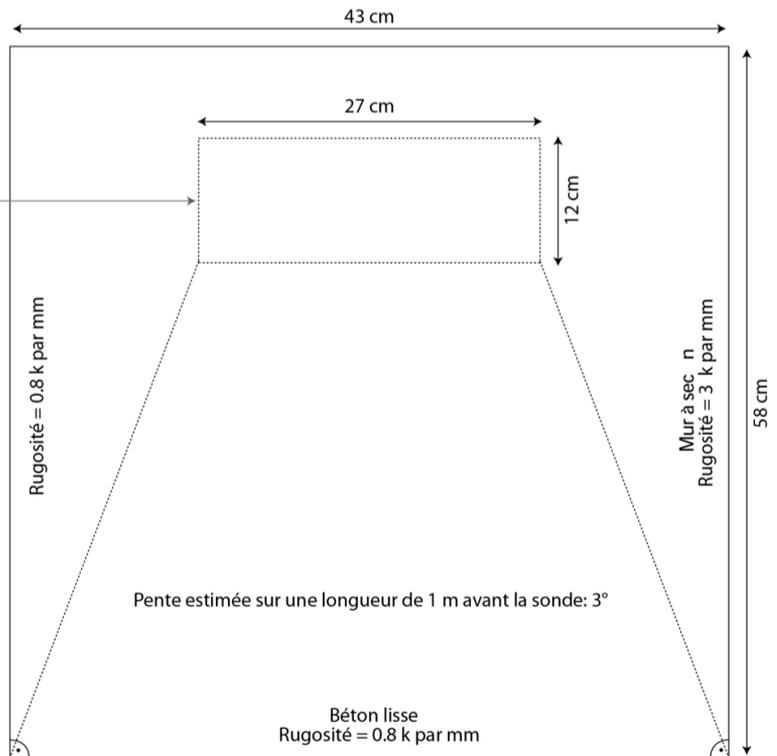
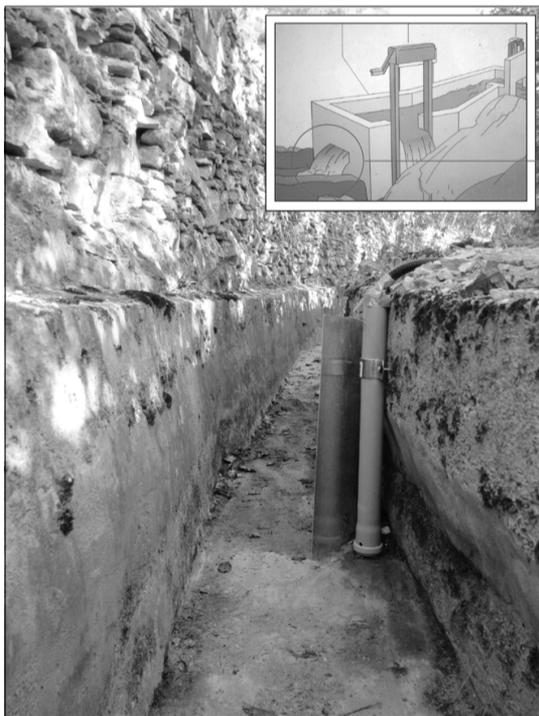
Paramètres physiques de la station de mesure du bisse du Sillonin.



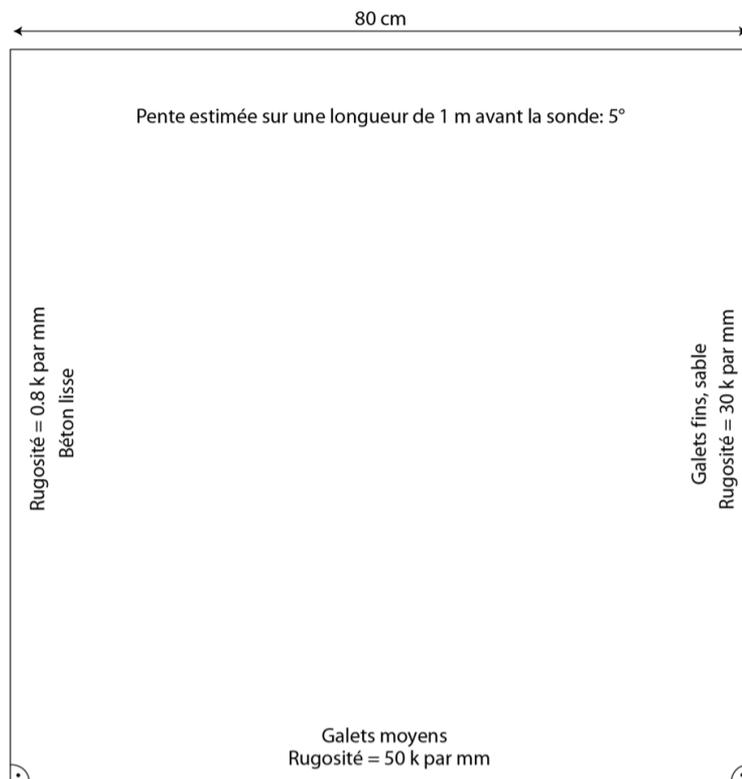
Paramètres physiques de la station de mesure du bisse du Tsittoret.



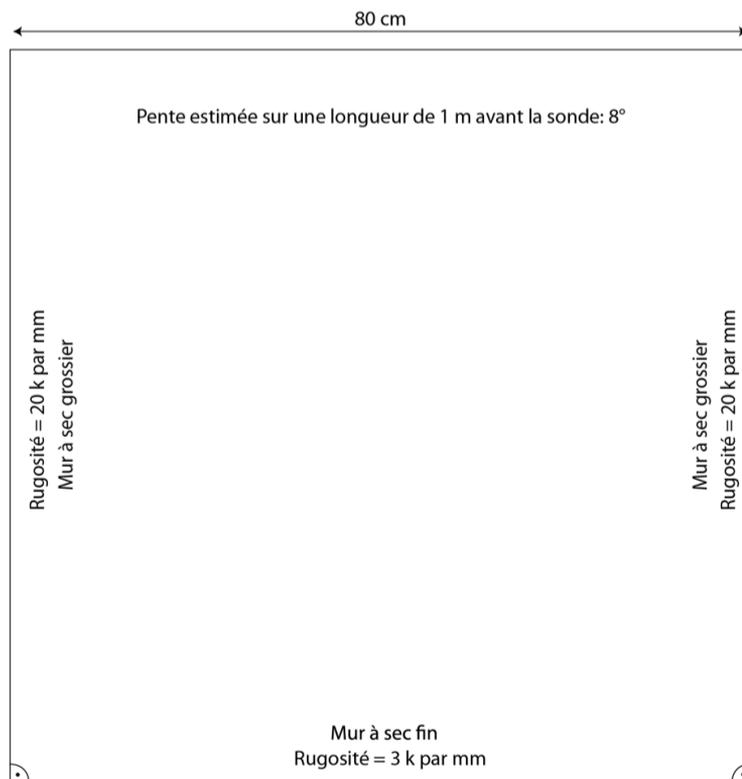
Paramètres physiques de la station de mesure du Bisce Neuf.



Paramètres physiques de la station de mesure du bisce du Marais.



Paramètres physiques de la station de mesure à l'entrée du répartiteur des Planigettes.



Paramètres physiques de la station de mesure à la sortie du répartiteur des Planigettes.

Annexe 15 : script pour les débits journaliers

```
01 clear all
02 load('exemple.txt')
03 data = exemple;
04 mean = [];
05 for i = data(1,1) :data(end,1)
06     [a b] = find(data(:,1)==i);
07     day = data(a,2);
08     daymean = sum(day)/size(day,1);
09     mean = [mean ; daymean];
10 end
11 dayindex = data(1,1) :data(end,1);
12 dayindex = dayindex(:);
13 results = [dayindex mean];
14 save exemplemoyenneparjour.txt results
```

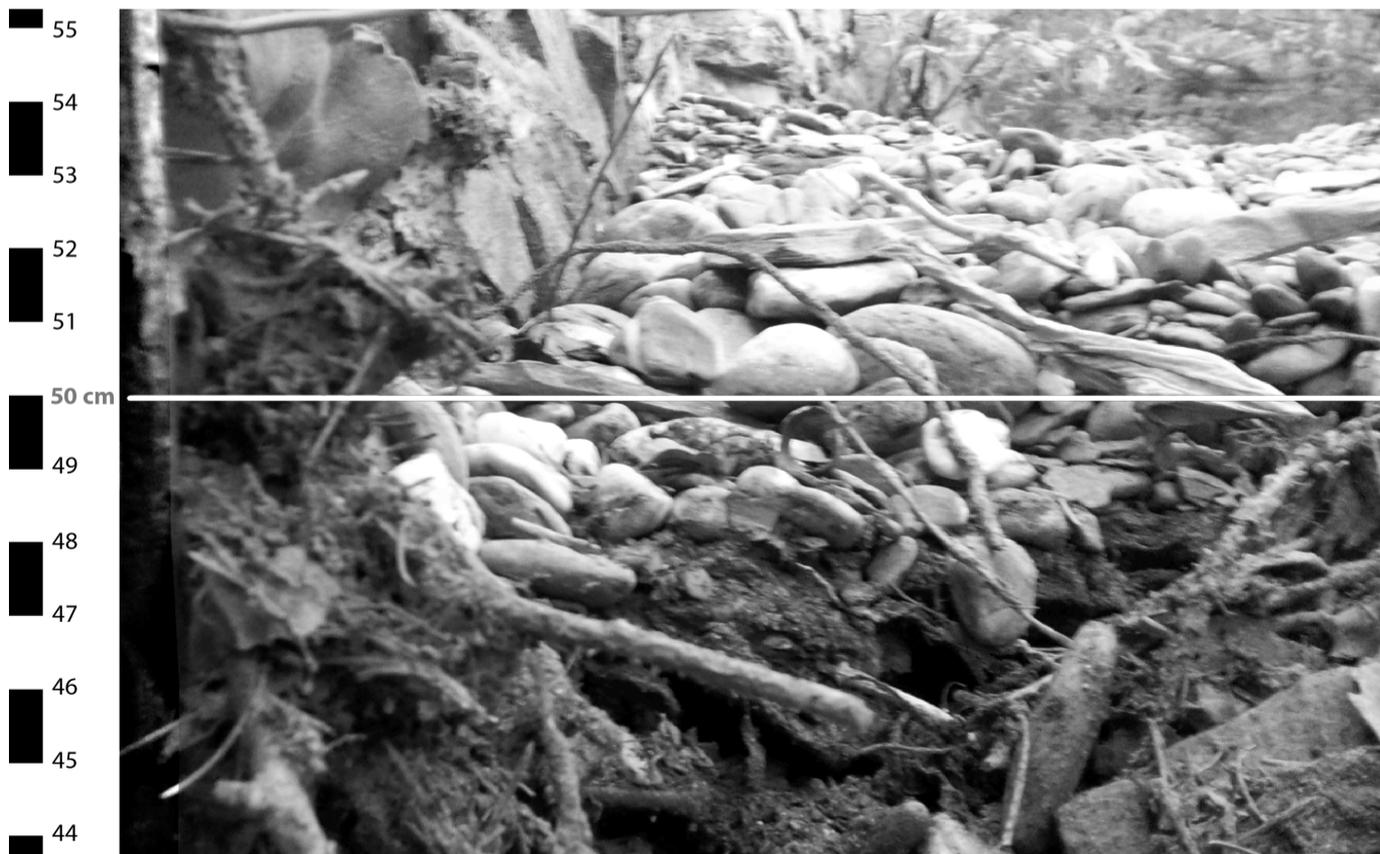
Script Matlab pour les débits journaliers

Auteur : Natan Micheletti.

Annexe 16 : obstruction du bisse des Planigettes



Obstruction du bisse du répartiteur des Planigettes (station à l'aval).



Obstruction du bisse du répartiteur des Planigettes (détail de la station à l'aval).

Annexe 17 : système d'irrigation secondaire



Apport d'eau dans le Tsittoret par un bisse secondaire.



Système de vannes sur le bisse du Tsittoret.

Annexe 18 : Une introduction synthétique à WEAP

Le texte suivant a été extrait du tutoriel en langue française disponible sur le Page Web de WEAP, librement téléchargeable à l'adresse <http://www.weap21.org>.

Introduction

Plusieurs régions font face à des défis redoutables de gestion des eaux douces. L'allocation des ressources en eau limitées, la qualité de l'environnement et les politiques soutenues d'utilisation de l'eau sont des enjeux d'intérêts croissants. Les modèles de simulation conventionnels orientés vers la ressource ne sont pas toujours adéquats. Durant la dernière décennie, une approche intégrée de la gestion de l'eau a émergé, qui a placé les projets de distribution d'eau dans le contexte des questions de la demande, de la qualité de l'eau et de la préservation des écosystèmes.

WEAP vise l'incorporation de ces valeurs dans un outil pratique pour la planification des ressources en eau. WEAP se distingue par son approche intégrée pour la simulation des systèmes d'eau et par l'orientation de sa politique. WEAP place le côté « demande » de l'équation – modulations de l'utilisation de l'eau, efficacités des équipements, réutilisation, prix et allocation – sur le même pied que le côté « ressource » – débit de rivière, eau souterraine, retenues et transferts d'eau. WEAP est un laboratoire pour examiner les alternatives de développement de l'eau et des stratégies de gestion.

Comme base de données, WEAP fournit un système de maintien de l'information de la demande et de la distribution. Comme outil de prévision, WEAP simule la demande en eau, l'offre, le débit, le stockage, la génération de pollution, le traitement et la distribution. Comme outil d'analyse des politiques, WEAP évalue une gamme complète d'options de développement et de gestion de l'eau, et considère les multiples usages compétitifs des systèmes d'eau.

L'approche

Opérant avec les principes de base du bilan hydrique, WEAP est applicable aux systèmes municipaux et agricoles, à des zones de planification uniques ou à des systèmes complexes de rivières d'étendue limitée. De plus, WEAP peut traiter une large gamme de questions : analyses sectorielles de la demande, préservation de l'eau, droit à l'eau et priorités d'allocation, simulation des

eaux souterraines et de surface, gestion des retenues, production d'énergie hydraulique, suivi des pollutions, exigences des écosystèmes, mesures de vulnérabilité et les analyses de bénéfice - coûts-bénéfices des projets.

L'analyse représente le système selon les diverses sources de fourniture d'eau (rivières, cours d'eau, eau souterraine, barrages et stations de dessalement), les retraits, les transferts et les possibilités de traitement des eaux usées, les exigences des écosystèmes, les demandes en eau et la génération de pollution. La structure des données et le niveau de détail peuvent être facilement personnalisés pour atteindre les exigences d'une analyse particulière et pour refléter les limites imposées par des données restreintes.

La méthode utilisée pour calculer l'évapotranspiration

Le texte suivant, librement traduit de l'anglais, a été extrait du chapitre « The Climate Options and Calculation Module » du tutoriel disponible sur le Page Web de la *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe* (Sahli et Jabloun, 2012), librement téléchargeable à l'adresse <http://www.bgr.bund.de>. Le but ici est de donner au lecteur des informations supplémentaires sur la méthode suivie par MABIA pour calculer l'évapotranspiration.

Description des variables climatiques nécessaires La méthode MABIA nécessite les données climatiques journalières suivantes :

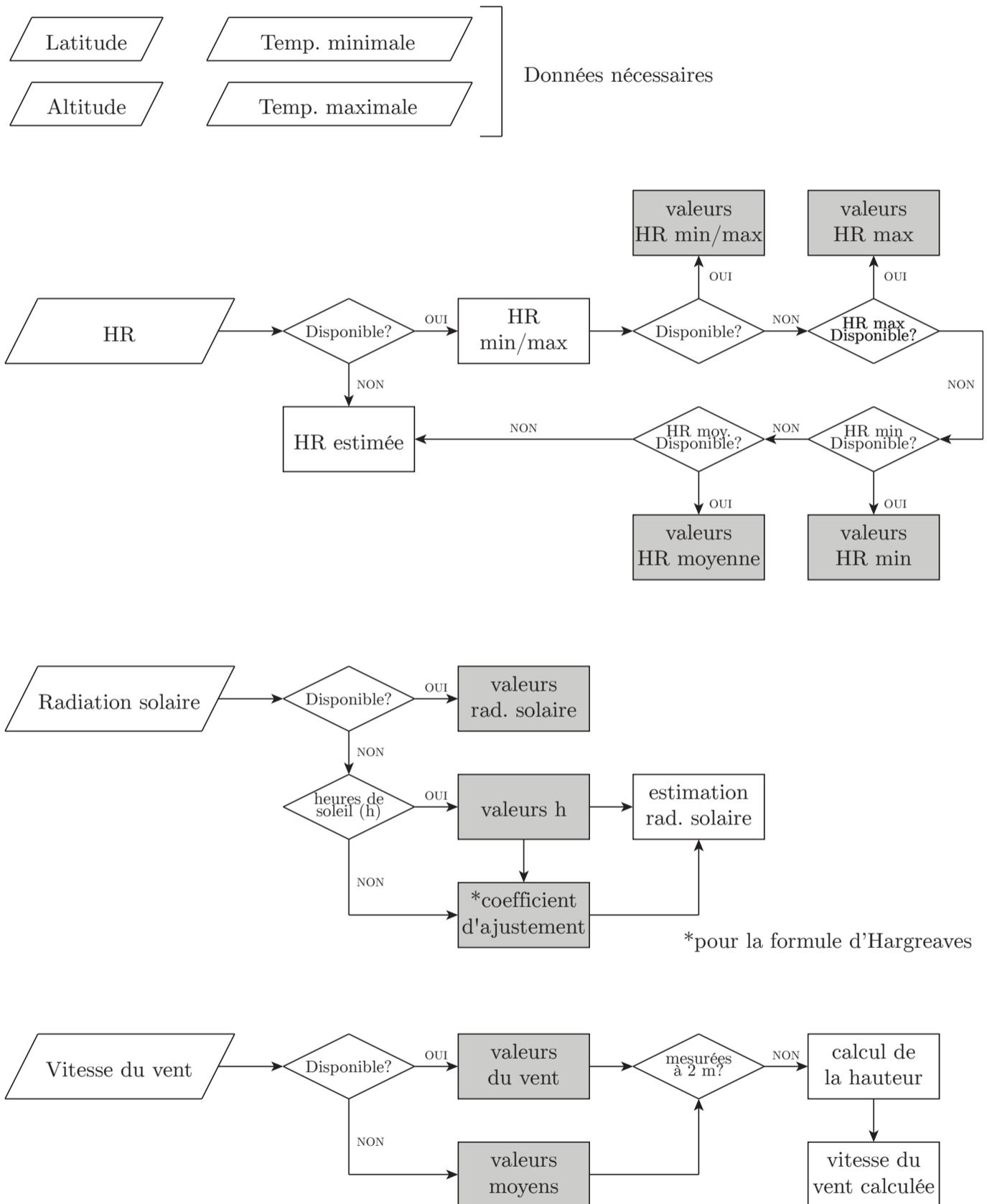
- Précipitations ;
- Évapotranspiration.

Afin de corriger le K_{cb} ⁶⁰ pendant les phases de développement des cultures, MABIA nécessite également les données concernant :

- la vitesse moyenne du vent ;
- l'humidité relative minimale.

Malheureusement, dans la plupart des cas, les données sur l'évapotranspiration ne sont pas disponibles. MABIA a la capacité de calculer l'évapotranspiration en s'adaptant à la disponibilité de données, toujours en faisant référence à l'équation de Penman-Monteith (comme recommandé par la FAO). Les démarches possibles sont expliquées dans la figure suivante.

60. Coefficient cultural de base, plus d'informations à l'adresse <http://www.weap21.org>.



Les démarches de MABIA pour calculer l'évapotranspiration.

Source : Jabloun et Sahli, 2012 (modifié).

Annexe 19 : barrage de Tzeusier

Mois	Apports	Eau en sortie
09.2005	5'604'200	8'034'200
10.2005	2'164'900	6'834'900
11.2005	1'027'800	10'237'800
12.2005	686'800	8'146'800
01.2006	467'200	7'927'200
02.2006	485'200	9'295'200
03.2006	719'900	6'679'900
04.2006	1'883'200	43'200
05.2006	10'764'400	644'400
06.2006	24'678'400	2'838'400
07.2006	16'749'500	10'889'500
08.2006	9'258'900	5'348'900
09.2006	6'262'300	4'652'300
10.2006	3'397'100	5'007'100
11.2006	1'156'900	5'826'900
12.2006	730'700	7'230'700
01.2007	800'100	6'740'100
02.2007	564'100	5'944'100
03.2007	783'600	7'093'600
04.2007	5'619'200	979'200
05.2007	13'412'900	6'362'900
06.2007	21'635'100	6'895'100
07.2007	17'122'400	13'952'400
08.2007	12'561'800	13'401'800
09.2007	4'218'400	5'028'400
10.2007	3'332'800	8'802'800
11.2007	902'400	10'112'400
12.2007	783'800	7'663'800
01.2008	612'300	10'082'300
02.2008	768'000	9'158'000
03.2008	889'300	5'999'300
04.2008	1'117'800	217'800
05.2008	12'279'400	1'499'400
06.2008	21'784'200	2'274'200
07.2008	15'504'200	6'874'200
08.2008	10'529'700	11'309'700
09.2008	6'206'800	12'126'800
10.2008	2'279'600	13'389'600
11.2008	1'535'100	11'595'100
12.2008	1'134'800	12'144'800

Mois	Apports	Eau en sortie
01.2009	530'900	270'900
02.2009	378'400	388'400
03.2009	532'300	1'072'300
04.2009	2'221'300	291'300
05.2009	14'201'200	401'200
06.2009	20'558'000	11'278'000
07.2009	16'457'100	7'607'100
08.2009	8'351'400	3'861'400
09.2009	4'402'100	2'852'100
10.2009	2'296'300	8'336'300
11.2009	1'584'600	7'834'600
12.2009	1'005'300	7'885'300
01.2010	710'900	11'560'900
02.2010	720'000	12'510'000
03.2010	769'500	939'500
04.2010	2'540'900	0
05.2010	7'448'800	238'800
06.2010	23'961'100	1'361'100
07.2010	18'305'800	4'705'800
08.2010	10'044'900	8'384'900
09.2010	4'155'900	7'445'900
10.2010	2'554'200	8'774'200
11.2010	1'451'800	10'571'800
12.2010	974'700	10'044'700
01.2011	695'900	10'855'900
02.2011	786'300	9'846'300
03.2011	765'800	1'975'800
04.2011	3'373'600	43'600
05.2011	12'304'100	0
06.2011	15'397'900	2'277'900
07.2011	10'942'200	1'172'200
08.2011	6'755'200	2'925'200
09.2011	5'435'500	2'235'500
10.2011	5'754'900	6'564'900
11.2011	1'212'200	12'482'200
12.2011	1'136'000	10'836'000

Apports et eau en sortie du barrage de Tzeusier.

Source des données : Lienne SA.

Annexe 20 : article sur l'enneigement artificiel

Le Temps

VALAIS Mercredi 30 novembre 2011

Canons à neige, la stratégie du court terme

PAR MARIE PARVEX

Une étude épingle la consommation d'eau de Crans-Montana pour ses canons à neige La consommation d'eau de Crans-Montana épinglée dans une étude Crans-Montana affirme utiliser 200'000 à 250'000 m³ d'eau par année pour faire de la neige artificielle. Selon une étude sur la gestion de l'eau dans la station, ce chiffre avoisine plutôt les 450'000 m³ pour l'hiver dernier. Un grand écart mathématique qui illustre le manque de données et la gestion totalement obscure de l'eau qui a cours en Valais. « Je ne sais pas comment un président de commune peut décider de l'utilisation de ses réserves quand, dans certaines d'entre elles, la consommation n'est même pas mesurée », lâche Emmanuel Reynard, hydrologue à l'Université de Lausanne et responsable de l'étude MontanAqua. « Je ne serais pas étonné que certaines d'entre elles soient confrontées à des pénuries dans le courant de cet hiver. La gestion de l'eau se fait le plus souvent commune par commune et sans vision globale ».

Le constat est sans appel alors que, depuis début novembre, les stations valaisannes amassent des tas de neige artificielle au pied des canons, dessinant des taches blanches dans un paysage désespérément brun et sec. Pour préparer une saison incertaine et faire face à des enjeux économiques majeurs à compter des vacances de Noël. De l'avis de Crans-Montana ou de Verbier, la quantité d'eau qu'elles prélèvent sur les immenses réserves des barrages est négligeable. Et la question de l'épuisement des ressources ne leur semble pas d'actualité puisque, en fondant, la neige réalimentera tôt ou tard la vallée. « En termes hydrologiques, c'est juste, confirme Emmanuel Reynard. Le problème, c'est plutôt la disponibilité de la ressource à un moment précis ». Entre l'augmentation démographique, la pression sur l'hydraulique pour compenser la sortie du nucléaire, la sécheresse de certaines années qui accroît les besoins de l'agriculture, c'est toute la gestion de la ressource qu'il conviendrait de repenser.

« Budgets plombés »

Mais les réserves d'eau ne sont pas la seule limite à l'utilisation des canons à neige. Jusqu'en 2006, Ovronnaz exploitait ses pistes dans une région sèche en s'alimentant au réservoir d'eau potable de la commune. Trop limitée dans son enneigement artificiel, elle a investi 5 millions dans un lac de retenue, une station de pompage et de nouveaux canons. Interrogé dans la presse locale, le directeur de Verbier Sport Plus estime entre 4 et 5 francs le mètre cube de neige artificielle. Pour ouvrir le lac des Vaux le week-end dernier, la station a dû produire 20'000 m³ de neige. « Le prix de l'enneigement plombe les budgets des petites stations, estime Emmanuel Reynard. Cette réalité économique pourrait à l'avenir faire le tri dans l'offre des domaines skiables ».

Garantir l'enneigement, c'est la raison d'être des canons à neige. Mais ils ne compensent pas l'image de paysages encore automnaux. « La neige naturelle est un besoin pour donner envie de pratiquer les sports d'hiver », analyse Gianluca Lepori, responsable de Téléovronnaz, en se réjouissant d'un changement météo annoncé pour vendredi. Un avis partagé par Grégoire Raboud, président des Verts valaisans, qui ne se scandalise pas de l'utilisation des canons mais plutôt de l'absence de vision des acteurs touristiques face au changement climatique. « Tant que nous compensons le manque de neige, nous sommes dans la réaction. Nous devons être actifs pour imaginer un autre tourisme. L'artificiel est possible mais il n'est pas viable parce que ce n'est pas une image commerciale valable ».

Annexe 21 : scénarios socio-économiques

Scénarios d'expansion (1a et 1b)

Votes défavorables ●, votes en faveur ○.

Démographie : 3 ●, 0 ○

Les communes recherchent activement de nouveaux résidents. En conséquence, la population résidente permanente augmente de façon significative.

Consommation d'eau potable (Privés et communes) : 0 ●, 0 ○

Comme il y a suffisamment d'eau, les gens ne pensent pas à l'économiser. L'eau potable est également parfois utilisée pour l'irrigation intensive des jardins et des parcs.

Constructions, aménagement du territoire : 4 ●, 0 ○

Activité de construction effrénée (dans le cadre de la législation actuelle). Il se construit beaucoup de résidences secondaires et de grands projets touristiques. La maison individuelle est la forme préférée de logement. L'activité de construction a lieu dans les zones à bâtir existantes.

Tourisme : 3 ●, 0 ○

Le tourisme est l'un des piliers les plus importants de l'économie régionale et il est axé sur le ski et le golf. Par conséquent, le ratio entre le tourisme d'hiver et le tourisme estival est semblable à celui d'aujourd'hui. L'objectif est d'être attractif pour le tourisme de masse. De nouvelles grandes stations thermales sont en cours de construction (par exemple Aminona). L'étendue du domaine skiable est similaire à aujourd'hui (y compris avec la construction de nouveaux canons à neige; le terrain de golf est complété par de nouveaux greens arrosés).

Agriculture : 0 ●, 0 ○

L'agriculture n'est pas une priorité. Elle se déroule sur des surfaces en dehors des zones à bâtir. Les entreprises sont abandonnées petit à petit. Il reste quelques exploitations à temps partiel qui font de l'agriculture extensive et qui irriguent comme aujourd'hui (par aspersion). Les zones difficiles à cultiver sont laissées à l'abandon et on observe un phénomène d'embroussaillage. L'économie alpestre continue à fonctionner, mais sur une zone plus petite, avec des bovins provenant de l'extérieur de la région et seulement pour la production de viande.

Vignoble : 2 ●, 0 ○

Le vignoble continue de jouer un rôle important et pourrait s'étendre à la zone située au-dessus de l'actuel (réchauffement climatique). La perte de surface au profit des constructions est importante. Le nombre de vigneronns a nettement diminué et ceux-ci visent un rendement maximal de leurs vignes. Chacun irrigue comme il l'entend (c'est à dire, comme aujourd'hui, sans effort particulier pour économiser).

Hydroélectricité : 1 ●, 1 ○

La production d'énergie hydroélectrique est d'une importance capitale. Le potentiel des différentes rivières est pleinement utilisé. Le barrage de Tseuzier s'élargit avec une station de pompage-turbinage. Un nouveau mur de soutènement est construit sur la Tièche et les petites centrales hydroélectriques prolifèrent.

Nature : 0 ●, 0 ○

Débits résiduels légaux réduits par rapport à aujourd'hui.

Infrastructures de l'eau : 0 ●, 0 ○

Les réseaux d'infrastructures pour l'eau sont agrandis : le projet Cordonier-Rey est réalisé, ainsi qu'une conduite pour le pompage-turbinage, et le mur de soutènement supplémentaire sur la Tièche permet d'optimiser le stockage de l'eau.

Institutions, collaborations : 0 ●, 0 ○

La collaboration intercommunale continue (en particulier la coopération au sein de l'ACCM). Il n'y a pas de nouvelles collaborations entre par exemple les communes du haut et les communes du bas. Chaque commune et chaque utilisateur tente de faire valoir ses intérêts en premier lieu. Les droits d'eau demeurent intacts et l'eau se paie en principe au forfait.

Source : Schneider, 2011.

Scénario de stabilisation (2)

Votes défavorables ●, votes en faveur ○.

Démographie : 0 ●, 5 ○

Les nouveaux résidents sont les bienvenus. En raison de la faible croissance démographique, la population résidente permanente croît faiblement.

Consommation d'eau potable (Privés et communes) : 0 ●, 7 ○

L'approvisionnement en eau est plus efficace. Il y a une séparation des réseaux d'eau potable et d'irrigation, y-compris dans la zone résidentielle.

Constructions, aménagement du territoire : 0 ●, 5 ○

La construction de résidences secondaires est radicalement limitée. Les maisons individuelles sont construites dans les quartiers existants (densification). La construction de petits immeubles est fortement encouragée.

Tourisme : 0 ●, 7 ○

Le tourisme est l'un des piliers les plus importants de l'économie régionale. Grâce à diverses mesures, le tourisme est plus attrayant tout au long de l'année, de sorte que les infrastructures existantes soient utilisées de manière plus équilibrée. Le domaine skiable s'étale sur les domaines de Cry d'Er et des Violettes, la neige artificielle est utilisée seulement durant la haute saison. Seul les parcours professionnels du golf sont irrigués.

Agriculture : 0 ●, 3 ○

L'agriculture joue un rôle important dans la production alimentaire (surtout la viande). Les zones agricoles pourraient être largement préservées (y compris les alpages) et être efficacement gérées et irriguées. Les parcelles embroussaillées aujourd'hui déjà sont laissées en l'état. Le nombre d'exploitations a diminué de manière significative mais le nombre d'animaux est constant.

Vignoble : 0 ●, 7 ○

Le vignoble joue un rôle important et conserve sa superficie. En revanche, le nombre de vigneronnes a diminué et ceux-ci se concentrent sur la production d'un vin de haute qualité. L'irrigation est efficace (goutte à goutte) et est organisée par les consortages qui prévoient le calendrier et les quantités optimales.

Hydroélectricité : 0 ●, 1 ○

La production d'énergie hydroélectrique est une forte priorité, mais au même titre que les autres besoins en eau (irrigation, eau potable, etc.). Le réservoir de Tseuzier s'élargit avec une centrale de pompage-turbinage, et des mini centrales hydroélectriques prolifèrent également.

Nature : 0 ●, 5 ○

Débits résiduels légaux identiques à aujourd'hui.

Infrastructures de l'eau : 0 ●, 3 ○

Les infrastructures existantes sont agrandies en un réseau unique pour l'eau potable et sont parfaitement entretenues. Les réseaux d'alimentation pour l'eau potable et pour l'eau de ménage (autre que pour la consommation) sont séparés. Pas de constructions de stockage supplémentaires.

Institutions, collaborations : ●, 1 ○

La collaboration des 11 communes est optimisée et l'approvisionnement en eau est gérée de manière centralisée. Les droits d'eau sont renégociés en conséquence. Les communes conservent toutefois leur pouvoir de décision politique. La politique de tarification est basée sur la consommation (par ex. selon la surface du logement).

Source : Schneider, 2011.

Scénario de modération (3)

Votes défavorables ●, votes en faveur ○.

Démographie : 0 ●, 0 ○

Après les années 2020, il y a une forte diminution de la croissance de la population. En conséquence, la population résidente permanente diminue.

Consommation d'eau potable (Privés et communes) : 0 ●, 2 ○

Il y a une séparation de l'eau potable et de l'eau du ménage. Les ménages ont réduit leur consommation d'eau par des efforts conséquents d'épargne individuelle. Les jardins et les plantations sont arrosés seulement par de l'eau de pluie recueillie localement.

Constructions, aménagement du territoire : 0 ●, 3 ○

Il y a toujours des activités de construction, mais celles-ci se transforment petit à petit en activités de reconstruction et de rénovation énergétiques. Les résidences secondaires sont reconverties en résidences principales et les maisons inutilisées sont démontées. Crans-Montana est une ville attrayante et durable où l'on vit à l'année. Des zones à bâtir ont été déclassées.

Tourisme : 0 ●, 1 ○

Le tourisme est l'un des piliers les plus importants de l'économie régionale, il est orienté vers un "tourisme doux". Crans-Montana est une destination de vacances pour toute l'année basée sur le tourisme gastronomique et d'excursions associés à une riche offre culturelle et didactique. Les sports de neige sont dépendants de la neige naturelle et certaines infrastructures sont démontées (canons à neige, télécabines, résidences secondaires, etc.).

Agriculture : 0 ●, 4 ○

L'agriculture est d'une grande importance pour la région, et principalement au service du tourisme, de la conservation et de l'entretien du paysage. La production est centrée sur les produits locaux et sur l'élevage de la race d'Hérens et d'ovins. Selon l'emplacement, on trouve également des chèvres. Globalement, on observe une diversification et une conversion vers l'agriculture biologique. L'économie alpestre joue un rôle important et de nombreuses entreprises pourraient survivre grâce à l'élargissement des paiements directs.

Vignoble : 0 ●, 1 ○

Le vignoble joue un rôle important et sa surface pourrait s'étendre vers le haut. Cela crée une mosaïque de paysages. Le nombre de vigneronnes a peu diminué; ils se concentrent sur le vin de haute qualité et prennent en compte les aspects de la protection de la biodiversité et du paysage dans la gestion du vignoble. L'irrigation a lieu seulement lors des années très sèches.

Hydroélectricité : 0 ●, 4 ○

La production d'énergie hydroélectrique est importante, cependant le but est de réduire la consommation d'énergie et de diversifier le bouquet énergétique. L'infrastructure existante est conservée et des mini centrales hydroélectriques sont construites.

Nature : 0 ●, 5 ○

Débits résiduels légaux supérieurs à aujourd'hui.

Infrastructures de l'eau : 0 ●, 4 ○

Les infrastructures pour l'eau existantes sont agrandies dans un réseau unique d'eau potable et sont parfaitement entretenues. Les réseaux d'eau potable et d'eau pour le ménage sont séparés. Les ménages recueillent et stockent l'eau de pluie localement, pour l'irrigation des jardins par exemple.

Institutions, collaborations : 0 ●, 5 ○

Les 11 municipalités unissent leurs efforts pour créer une communauté qui assure l'approvisionnement en eau pour le bien commun de tous les habitants de la région. Par conséquent, il y a une réforme des droits d'eau, et un déplacement des droits privés en droits publics. La politique de tarification de l'eau est basée sur la consommation (par échelons : les besoins fondamentaux en eau sont gratuits, toute demande supplémentaire est payante, les tarifs augmentent en fonction de la consommation).

Source : Schneider, 2011.

Scénario RégiEau (4)

Résultant de la votation des acteurs locaux.

Démographie

Les nouveaux résidents sont les bienvenus. En raison de la faible croissance démographique, la population résidente permanente croît faiblement.

Consommation d'eau potable (Privés et communes)

L'approvisionnement en eau est plus efficace. Il y a une séparation des réseaux d'eau potable et d'irrigation, y-compris dans la zone résidentielle.

Constructions, aménagement du territoire

La construction de résidences secondaires est radicalement limitée. Les maisons individuelles sont construites dans les quartiers existants (densification). La construction de petits immeubles est fortement encouragée.

Tourisme

Le tourisme est l'un des piliers les plus importants de l'économie régionale. Grâce à diverses mesures, le tourisme est plus attrayant tout au long de l'année, de sorte que les infrastructures existantes soient utilisées de manière plus équilibrée. Le domaine skiable s'étale sur les domaines de Cry d'Er et des Violettes, la neige artificielle est utilisée seulement durant la haute saison. Seul les parcours professionnels du golf sont irrigués.

Agriculture

L'agriculture est d'une grande importance pour la région, et au service du tourisme, de la conservation et de l'entretien du paysage. La production est centrée sur les produits locaux et sur l'élevage de la race d'Hérens et d'ovins. Selon l'emplacement, on trouve également des chèvres. Globalement, on observe une diversification et une conversion vers l'agriculture biologique. L'économie alpestre joue un rôle important et de nombreuses entreprises pourraient survivre grâce à une législation adaptée et aux produits de l'agrotourisme.

Vignoble

Le vignoble joue un rôle important et conserve sa superficie. En revanche, le nombre de vigneron a diminué et ceux-ci se concentrent sur la production d'un vin de haute qualité. L'irrigation est efficace (goutte à goutte) et est organisée par les consortages qui prévoient le calendrier et les quantités optimales.

Hydroélectricité

La production d'énergie hydroélectrique est importante, cependant le but est de réduire la consommation d'énergie et de diversifier le bouquet énergétique. Les possibilités pompage-turbinage sont exploitées et des mini centrales hydroélectriques sont construites.

Infrastructures de l'eau

Les infrastructures pour l'eau existantes sont agrandies dans un réseau unique d'eau potable et sont parfaitement entretenues. Les réseaux d'eau potable et d'eau d'irrigation en zone de résidence sont séparés. Les ménages recueillent et stockent l'eau de pluie localement, pour l'irrigation des jardins par exemple. Le projet Cordonier-Rey est réalisé, ainsi qu'une conduite pour le pompage-turbinage.

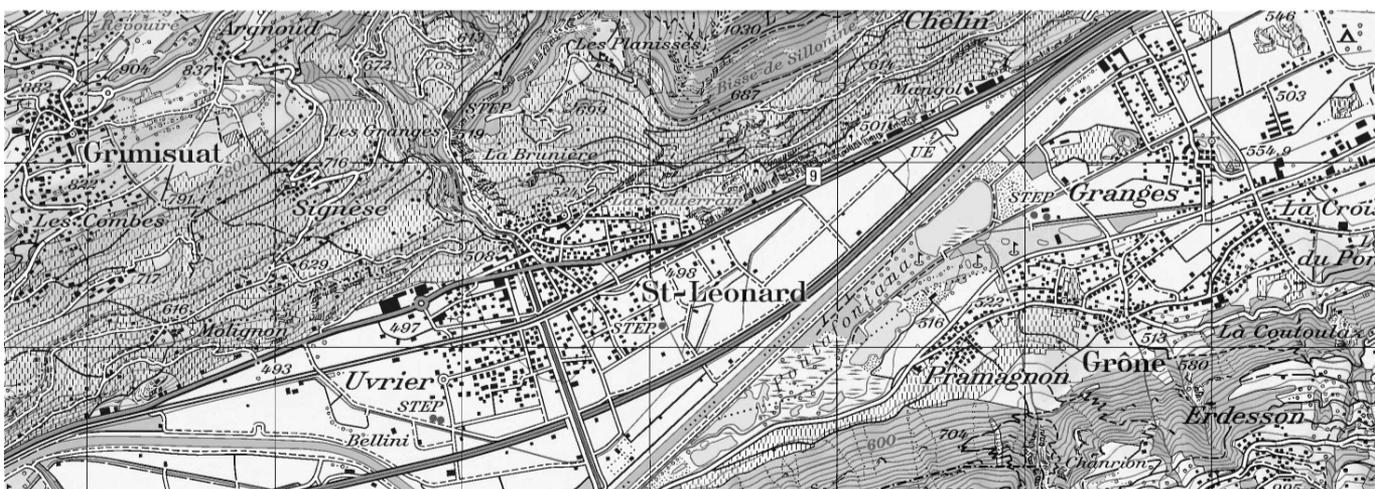
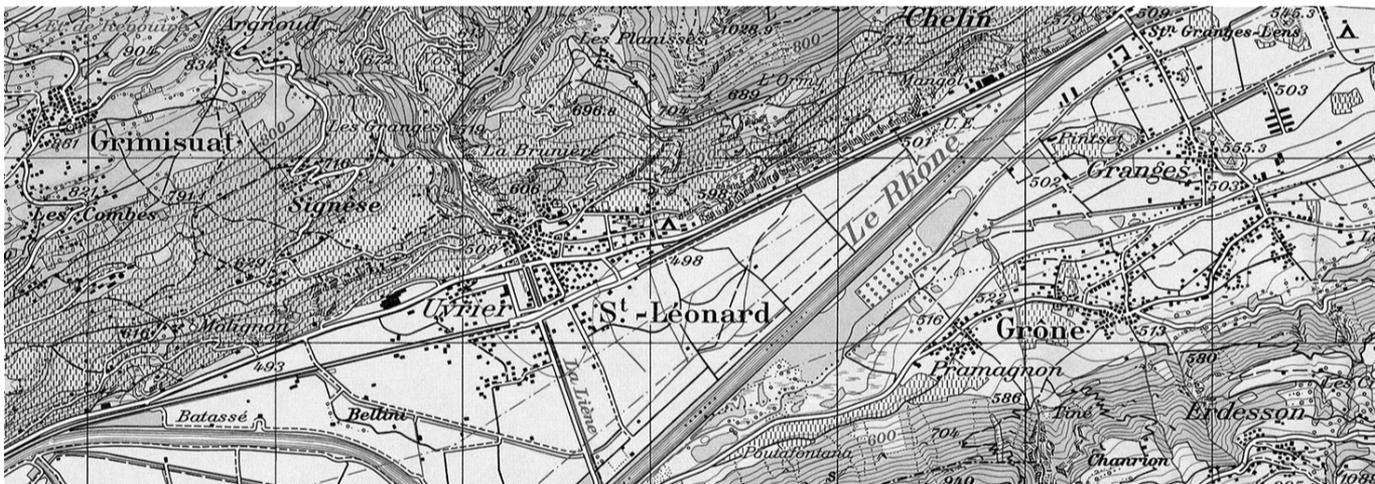
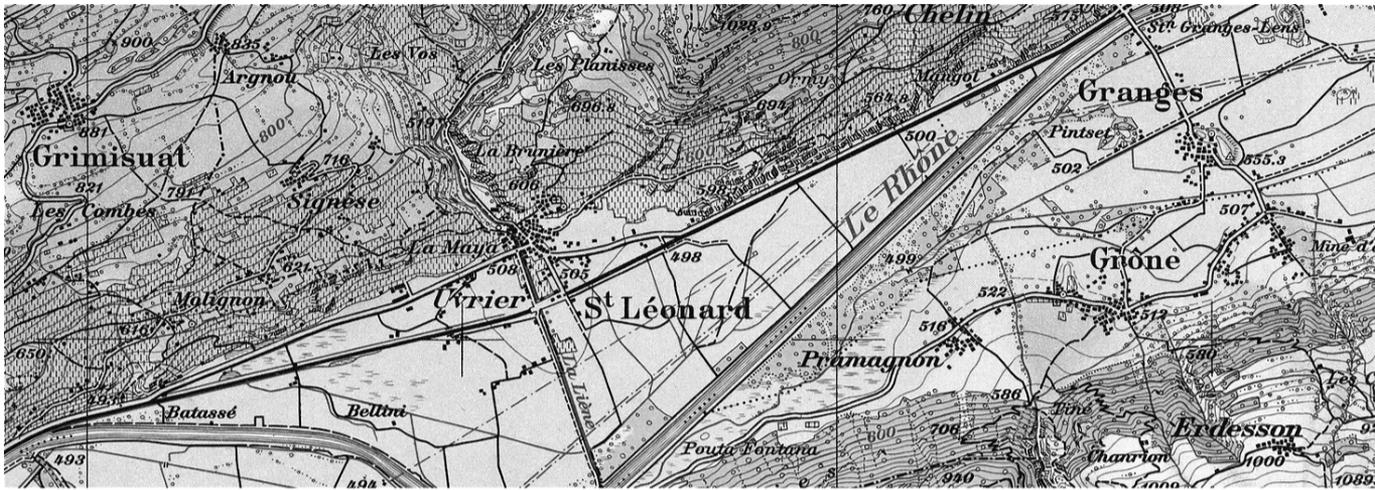
Institutions, collaborations

Les 11 municipalités unissent leurs efforts pour créer une communauté qui assure l'approvisionnement en eau pour le bien commun de tous les habitants de la région. Par conséquent, il y a une réforme des droits d'eau, et un déplacement des droits privés en droits publics. La politique de tarification de l'eau est basée sur la consommation (par échelons : les besoins fondamentaux en eau sont gratuits, toute demande supplémentaire est payante, les tarifs augmentent en fonction de la consommation).

Source : Schneider, 2011.

Annexe 23 : Extraits de cartes topographiques

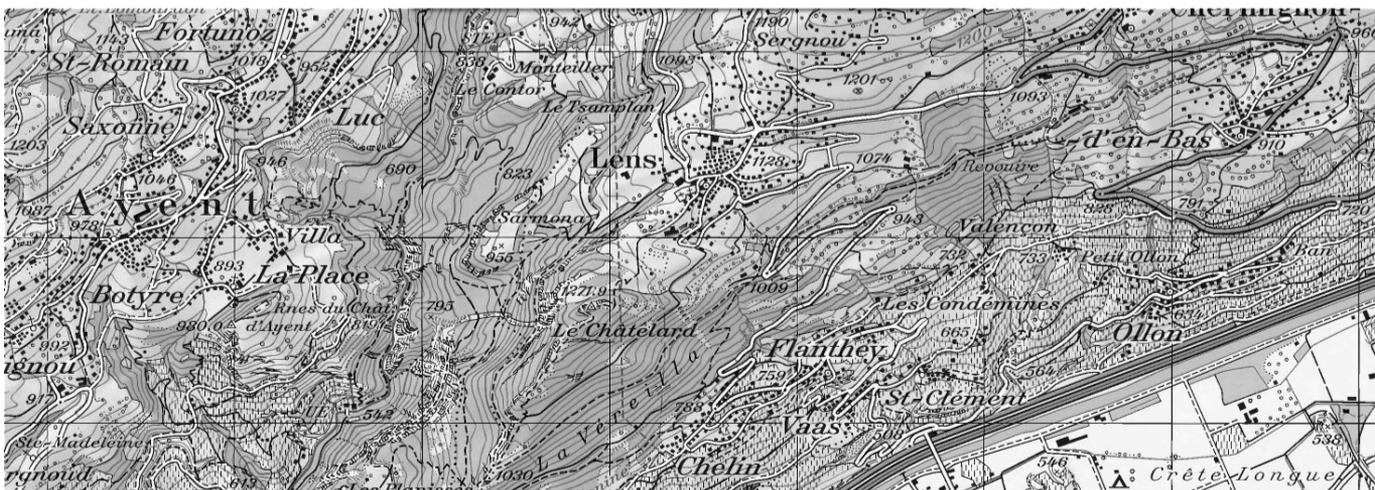
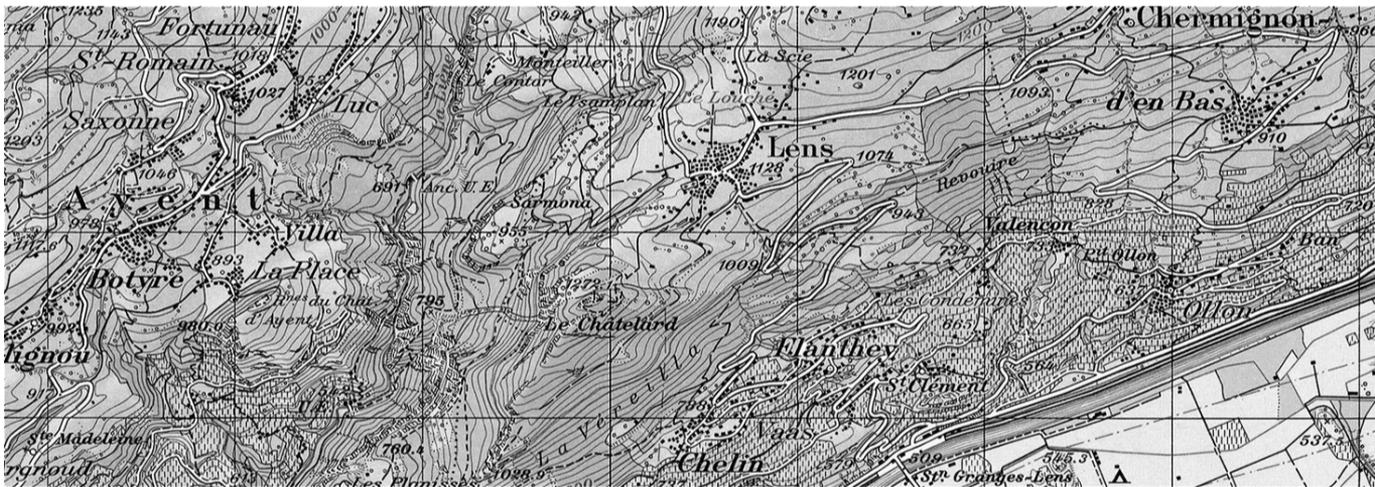
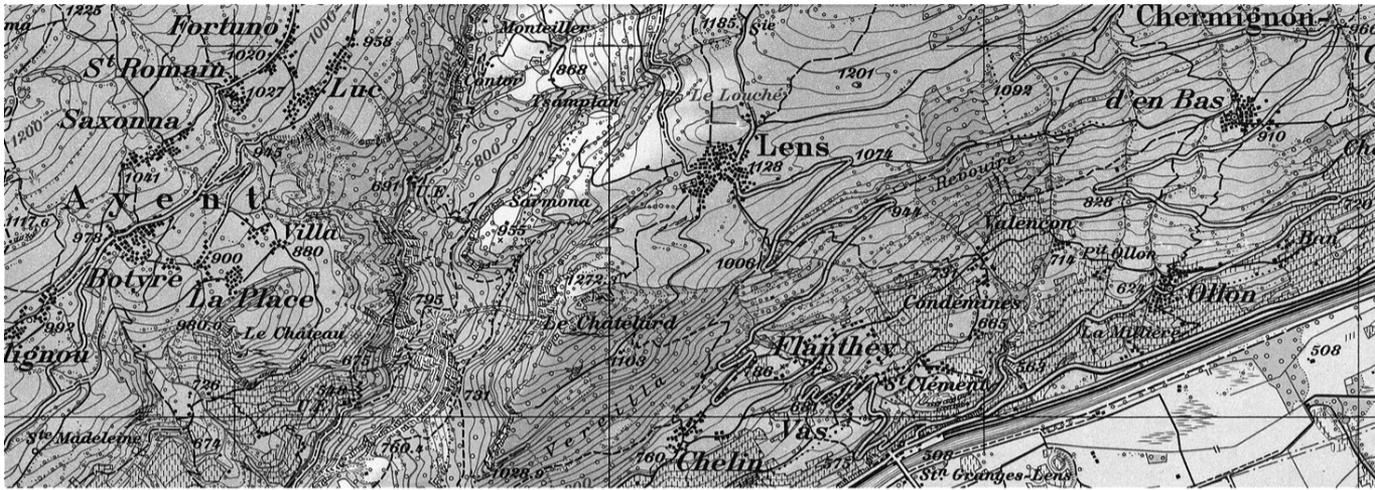
Sous-région de St-Léonard



Extraits de cartes topographiques 1:50'000.
De haut en bas : 1946, 1974 et 1998.

Source : Swisstopo.

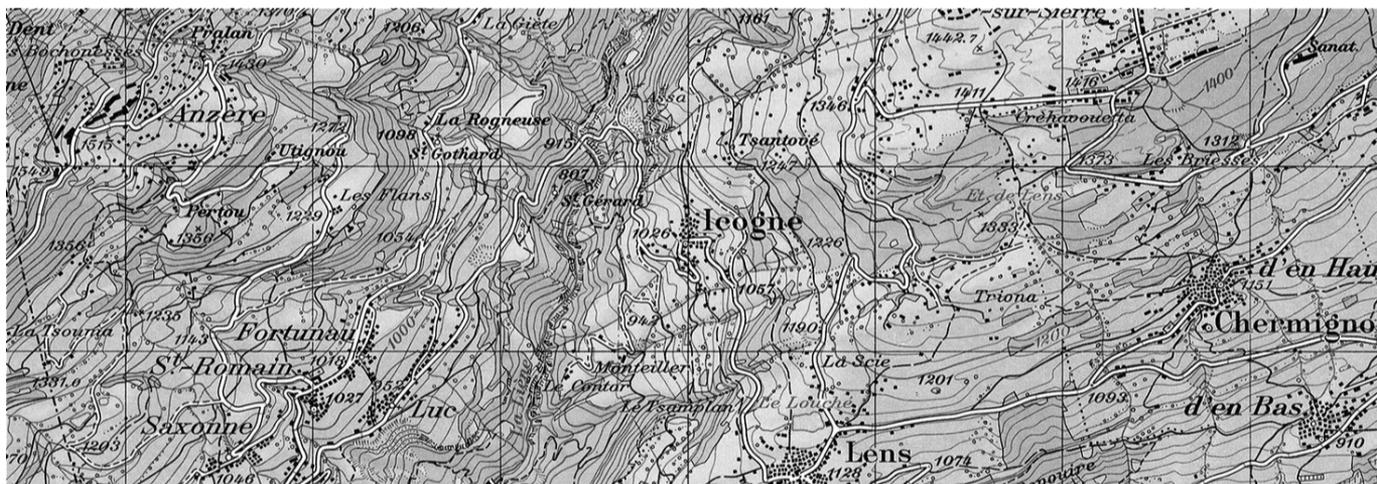
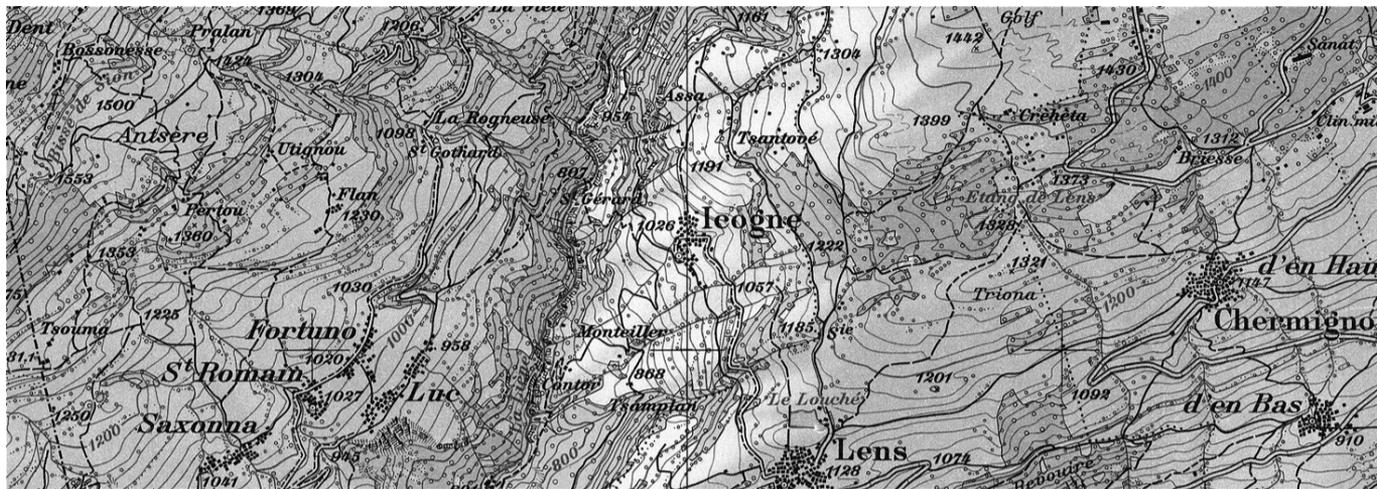
Sous-région de Lens



Extraits de cartes topographiques 1:50'000.
De haut en bas : 1946, 1974 et 1998.

Source : Swisstopo.

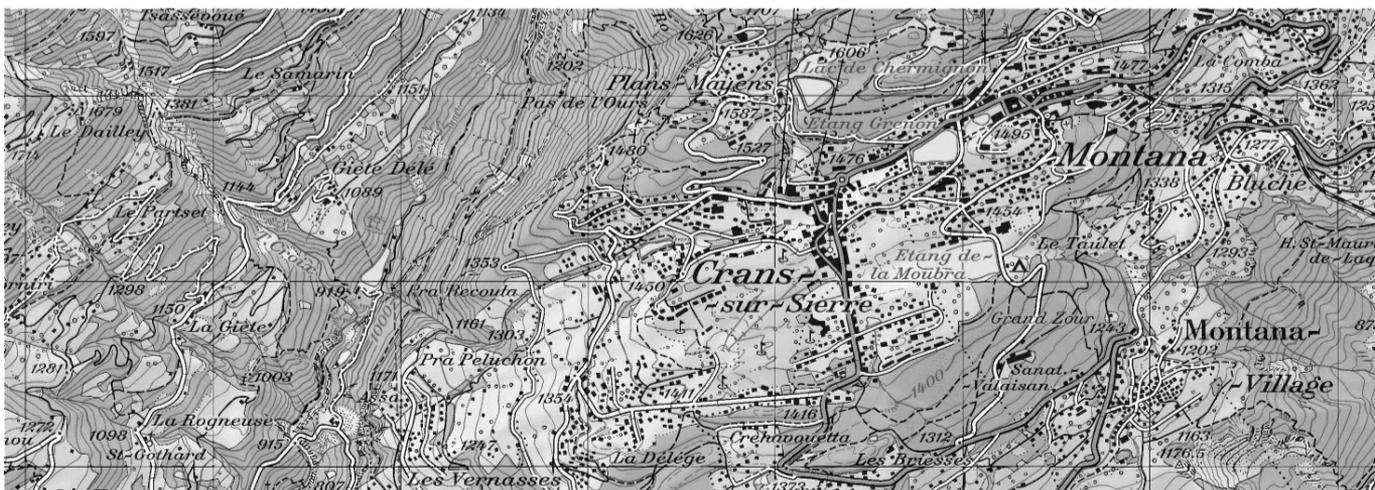
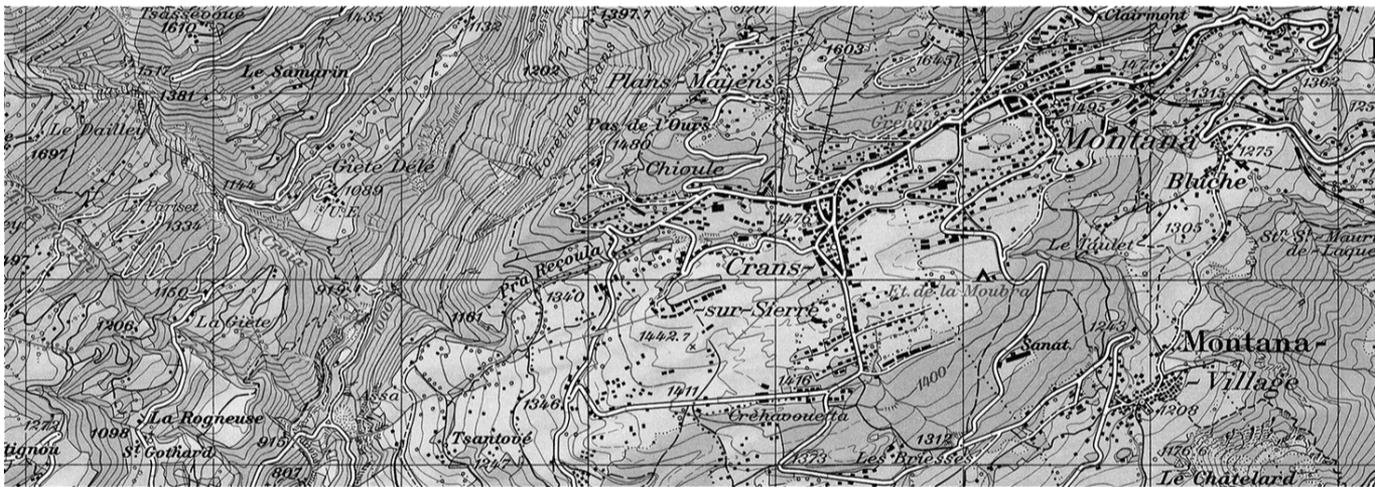
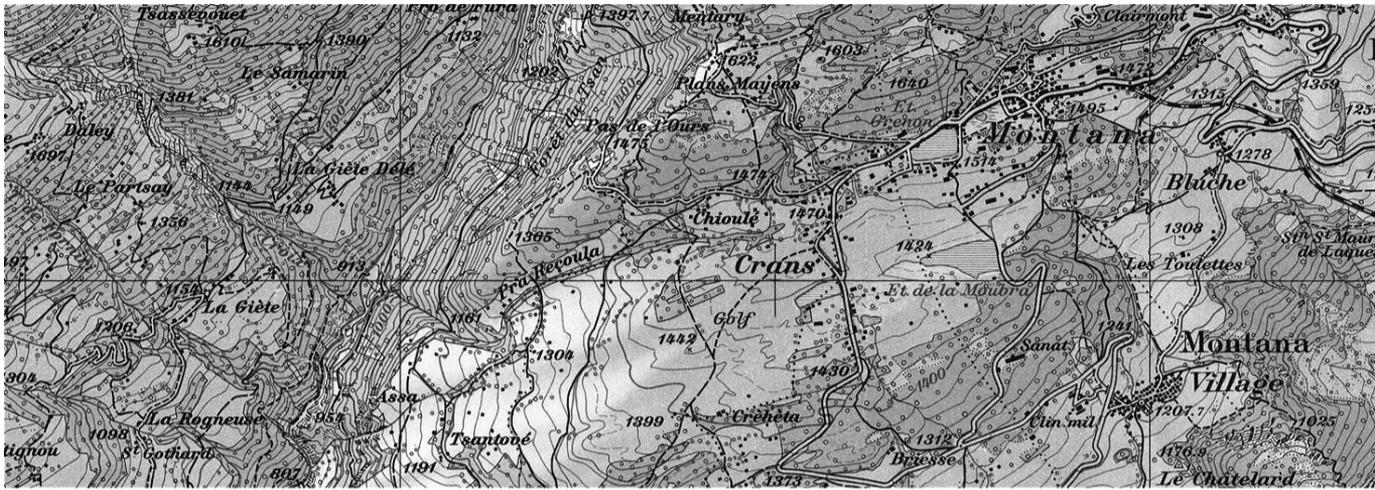
Sous-région d'Icogne



Extraits de cartes topographiques 1:50'000.
De haut en bas : 1946, 1974 et 1998.

Source : Swisstopo.

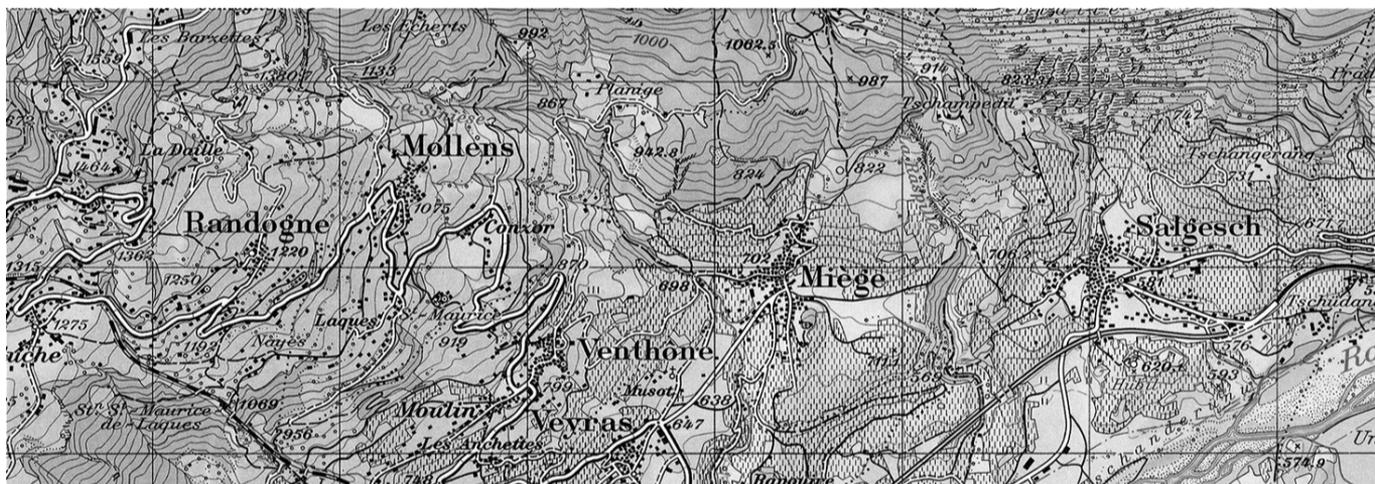
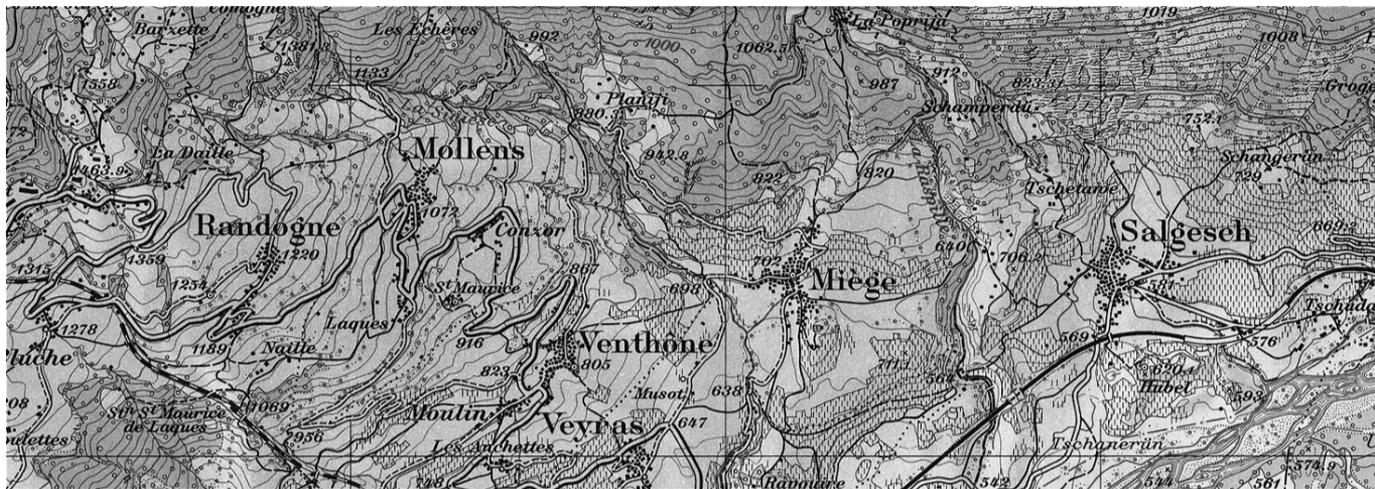
Sous-région du Haut-Plateau



Extraits de cartes topographiques 1:50'000.
De haut en bas : 1946, 1974 et 1998.

Source : Swisstopo.

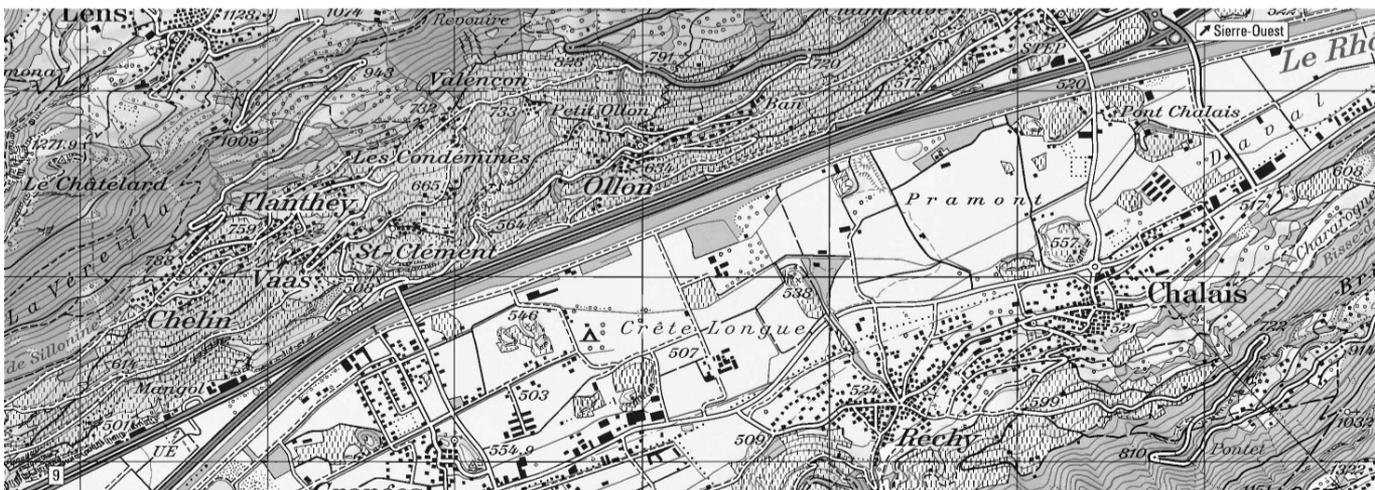
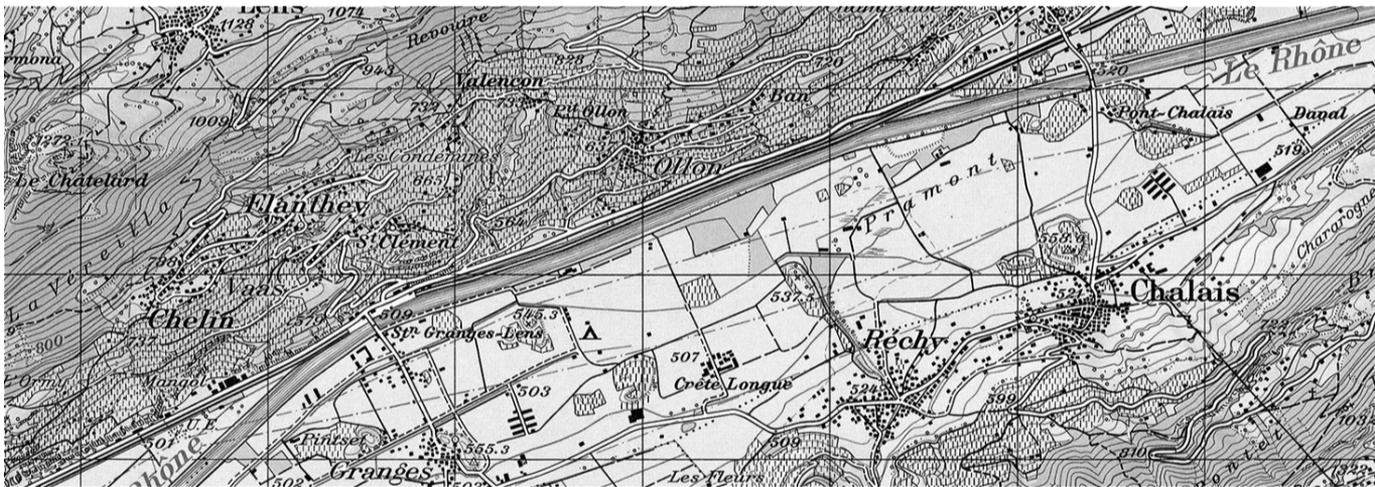
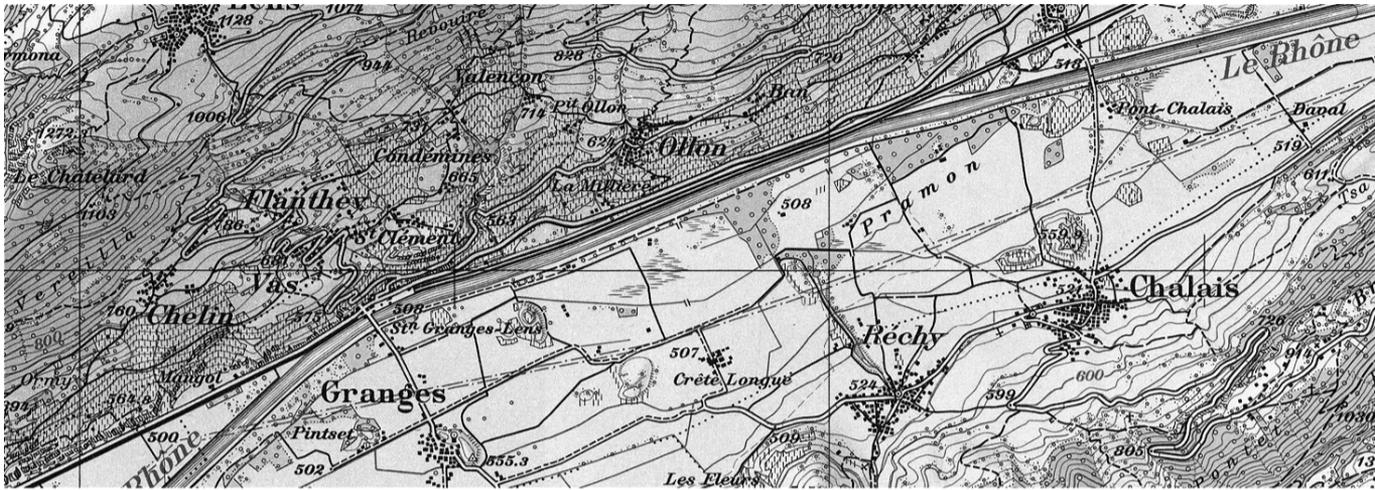
Sous-région de Miège



Extraits de cartes topographiques 1:50'000.
De haut en bas : 1946, 1974 et 1998.

Source : Swisstopo.

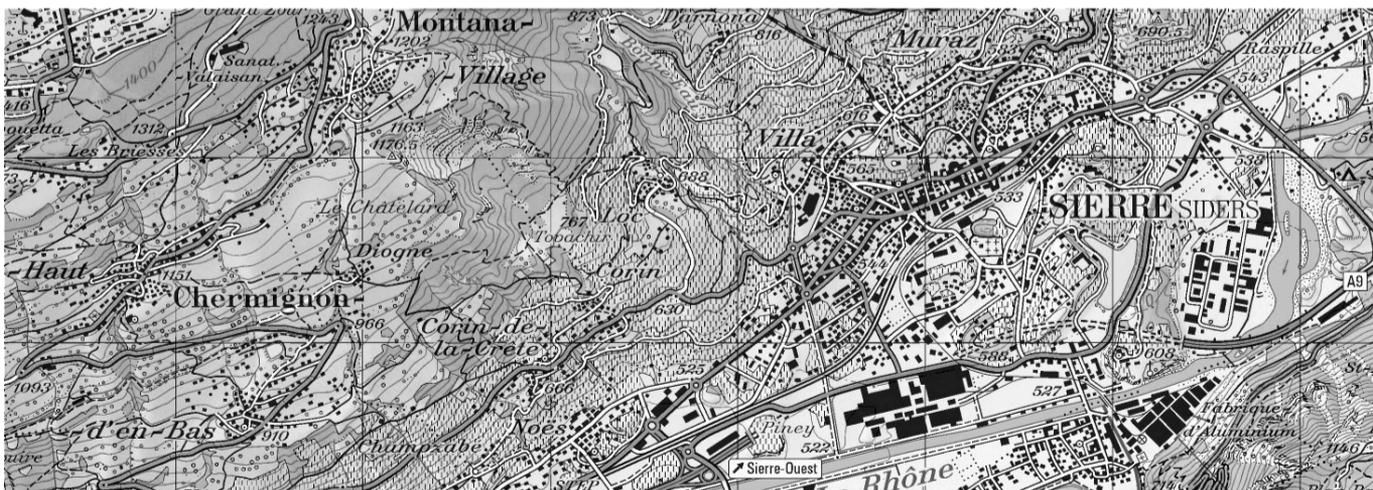
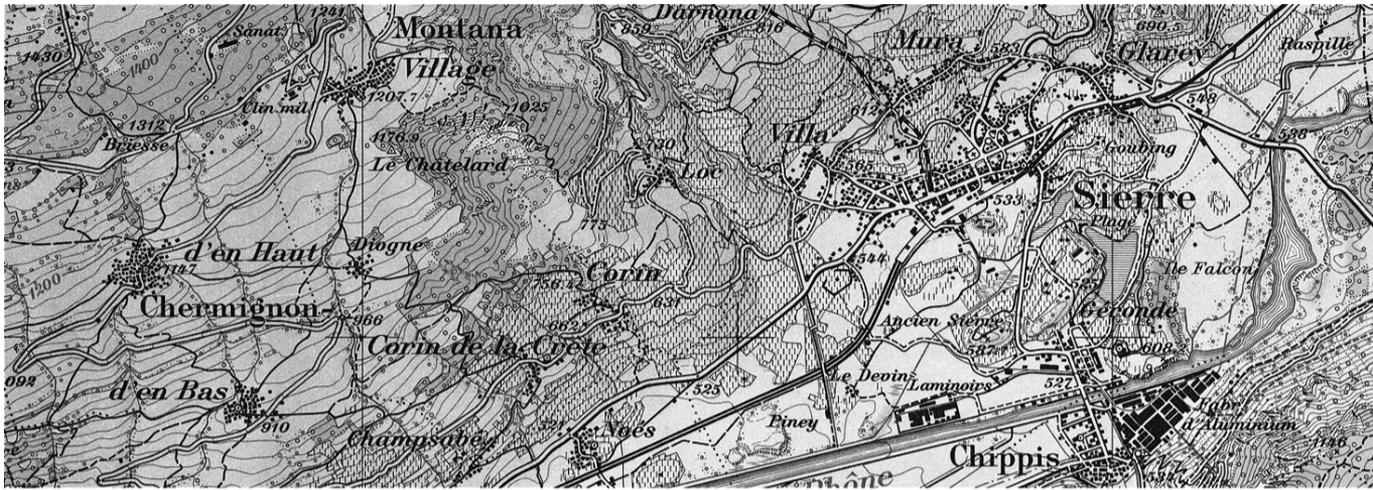
Sous-région d'Ollon



Extraits de cartes topographiques 1:50'000.
De haut en bas : 1946, 1974 et 1998.

Source : Swisstopo.

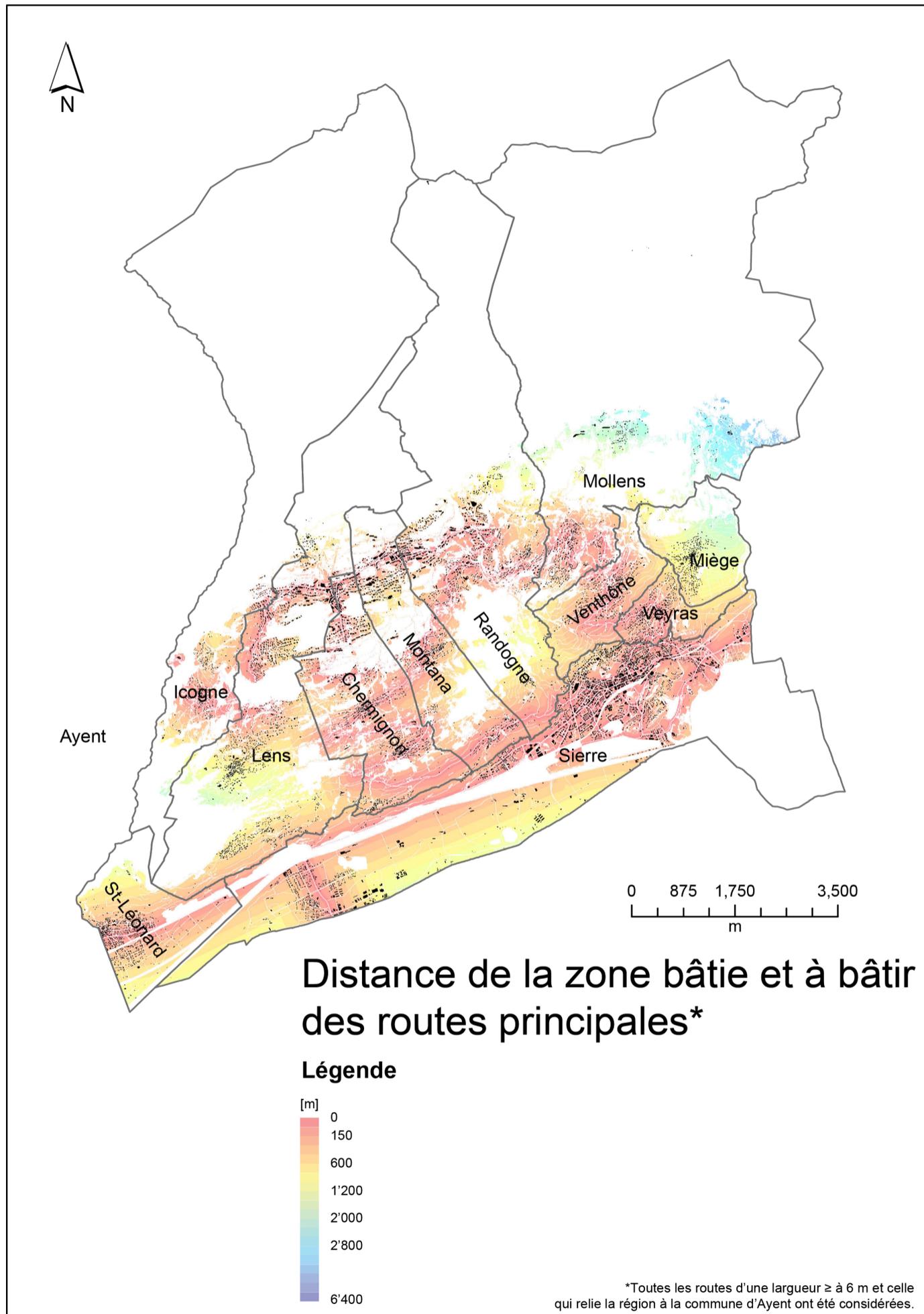
Sous-région de Sierre



Extraits de cartes topographiques 1:50'000.
De haut en bas : 1946, 1974 et 1998.

Source : Swisstopo.

Annexe 24 : influence des routes principales



Distance de la zone bâtie et à bâtir des routes principales.

Annexe 25 :

script pour les heures potentielles d'enneigement artificiel

```
01 %Station Meteosuisse de Montana
02 %Variables : Temperature [C] et Humidité relative [%]
03 data=dlmread('data.csv');
04 time=data(:,2);
05 %Hauteur (1600, 1700, 1800, 1900, 2000)
06 altitude=1600
07 % Gradient vertical moyen des températures (Source : Boet 1978. In Reynard 2000, annexe 5.15)
08 T_grad_m=[0.0048;0.0053;0.0059;0.0063;0.0065;0.0066;0.0065;0.0061;0.0056;0.005;0.0045;0.0043];
09 %temp_calc_a=zeros(size(data,1),1);
10 l=1;
11 for i=1 :1630514;
12     k=time(i,1);
13     temp_calc_a(l,1)=data(i,4)-T_grad_m(k,1)*(altitude-1508);
14     l=l+1;
15 end
16 %Après le 11.2.2009 (1531298) la station est déplacée à 1427 m
17 temp_calc_b=zeros(size(time(1531298:1630514,1),1),1);
18 l=1;
19 for i=1531298:1630514;
20     k=time(i,1);
21     temp_calc_b(l,1)=data(i,4)-T_grad_m(k,1)*(altitude-1427);
22     l=l+1;
23 end
24 %Matrice d'analyse
25 temp_calc_tot=[temp_calc_a(1:1531297,1); temp_calc_b];
26 %Données enregistrées
27 analyse_1=[data(:,1), temp_calc_tot,data(:,3)];
28 clear('temp_calc_a');clear('temp_calc_b');clear('data');clear('time');clear('k');clear('l');
29 %Détection des conditions idéales pour l'enneigement artificiel 1980-2009
30 j=1;
31 for i=1:length(analyse_1);
32     if analyse_1(i,2)<-2 analyse_1(i,3)<80
33         resultat1(j,:)=analyse_1(i,:),1;
34         j=j+1;
35 end
36 mois1 = floor(resultat1(:,1)/1E8);
37 [uniques,numUnique]=countunique(mois1);
38 conditionsideales=[uniques numUnique]
39 clear('uniques'); clear('numUnique'); clear('mois1'); clear('resultat1');
40 clear('i');clear('j');clear('analyse_1');clear('temp_calc_tot');clear('T_grad_m')
41 %Enregistrer
42 csvwrite('conditions_ideales.csv', conditions_ideales);
43 end
```

Script Matlab pour les heures potentielles d'enneigement artificiel.

Élaboré à partir d'un script de Martina Kauzlaric avec l'aide de Natan Micheletti.

Bibliographie

- A -

- Abegg, B. (1996). *Klimaänderung und Tourismus. Klimafolgenforschung am Beispiel des Wintertourismus in den Schweizer Alpen*. Zürich : vdf.
- Albran, K. (1973). *The profit*. Los Angeles : Price/Stern/Sloan Publishers.
- ACCM, Association des six communes de Crans-Montana (2010). *Concours d'architecture à un degré et en procédure ouverte pour un centre Aqualoisirs à la Moubra*. [Document numérique en ligne].
Disponible sur : <http://www.cransmontana.ch> (consulté le 13.01.2011, n'est plus disponible).
- ACCM, Association des six communes de Crans-Montana (2012). *Présentation* [Page Web].
Disponible sur : <http://www.cransmontana.ch> (consulté le 4 novembre 2012).
- ACQWA, Assessing Climate impacts on the Quantity and quality of WATER (2013) [Page Web].
Disponible sur : <http://www.acqwa.ch> (consulté le 20.11.2012).
- Administration communale de Mollens (1993). *Utilisation et entretien des bisses d'irrigation* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.mollens.ch> (consulté le 28.03.2011).
- Agridea (2007). *Irrigation de la vigne - Soins au sol* [Rapport interne].
- Alp-Water-Scarce (2012). [Page Web]. Disponible sur : <http://www.alpwaterscarce.eu> (consulté le 20.11.2012).
- Ammann, H.-R. (2011). Autour de l'eau de la Raspille. In *Actes du colloque international sur les bisses*, Sion, 2-5 septembre 2010, Annales valaisannes 2010/2011, pp. 253-269.
- Anctil, F. (2007). *L'eau et ses enjeux*. Québec, Presses de l'Université Laval.
- ASL, Association pour la sauvegarde du Léman (2009a). *Evaluation de la durabilité de la gestion des ressources en eau dans la région lémanique - Le bassin de l'Aubonne* [Documents numériques]. Disponible sur : <http://www.asleman.org> (consulté le 09.05.2013).
- ASL, Association pour la sauvegarde du Léman (2009b). *Evaluation de la durabilité de la gestion des ressources en eau dans la région lémanique - Le bassin de la Versoix* [Documents numériques]. Disponible sur : <http://www.asleman.org> (consulté le 09.05.2013).
- ASL, Association pour la sauvegarde du Léman (2009). *Evaluation de la durabilité de la gestion des ressources en eau dans la région lémanique - Le bassin des Dranses* [Document numérique]. Disponible sur : <http://www.asleman.org> (consulté le 09.05.2013).
- ARE, Office fédéral du développement territorial (2012). [Page Web]. Disponible sur : <http://www.are.admin.ch> (consulté le 9 mai 2012).

- B -

- Bacher, M. (2011). *Schnee auf der Dose* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://ttl.tuwien.ac.at> (consulté le 19 mai 2012).
- Bachmann, F (1976). Montana, belvedere soleggiato - Trasformazione del paesaggio all'insegna del turismo. In *La Svizzera vista dall'alto*. Milano : Selezione dal Reader's Digest S.p.A. , pp. 178-179.
- Bättig, M., Rom, N., et Dettli, R. (2011). *Anpassung an die Klimaänderung im Berggebiet - Fallstudie Saastal* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.wsl.ch> (consulté le 20.11.2011).
- Bernard, A. (1970). *Le Golf*. Paris : Presses universitaires de France.
- Berreau, G. (2012). « *Le canton ne respecte pas la loi* » [Page Web]. Disponible sur : <http://www.lenouvelliste.ch> (consulté le 06.12.2012).
- Bezzola, G. R. (2008). *Vorlesungsmanuskript Flussbau*. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule.
- BLFUW, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2012). *Wasserverbrauch und Wasserbedarf* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.lebensministerium.at> (consulté le 22.10.2012).
- Bissig, G. (2004). *Changement climatique et gestion durable de l'approvisionnement en eau potable d'une région karstique : La vallée de Joux (Vaud, Suisse)*. Mémoire de master. Lausanne : Université, Institut de Géographie.
- Bollrich, G. (2000). *Technische Hydro-mechanik 1*. Berlin : Verlag Bauwesen.
- Bonriposi, M. et Reynard, E. (2013) Future water use in Crans-Montana-Sierre. The impact of climatic and socio-economic scenarios [en préparation].
- Bosshard, T., Kotlarski, S., Ewen, T., Arnold, J., Pall, P., Schär, C. (2011). *Klimaszenarien für hydrologische Impaktstudien in der Schweiz*. Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zürich.
- Bouët, M. (1948). L'insolation en Valais. *Bulletin de la Murithienne*, vol. 65, pp. 82-94.
- Bouët, M. (1978). Le Valais. In *Regionale Klimabeschreibung, 1. Teil : Gesamtübersicht, Westschweiz, Wallis, Jura und Juranordfuss sowie Mittelland*. Zürich : SMZ, Serie Klimatologie der Schweiz, Heft 18, pp. 88-114.

- Boulogne, A. (2010, 9 décembre). *Le Projet « Village » de la commune des Gets : une gestion durable de la ressource en eau ?* [Conférence]. Lausanne : Université, Institut de géographie.
- Bray, E. A. (1997). Plant responses to water deficit. *Trends in plant science*, vol. 2, n°2, pp. 48-54.
- Breiling, M. et Sokratov, S. (2012). Water demand for ski resort development in the Austrian Alps : an Overview [Abstract]. In EGU General Assembly 2012, *Geophysical Research Abstracts*, vol. 14, EGU2012-14027.
- Bréthaut, C. (2010). *Analyse comparée des régimes institutionnels des services urbains de l'eau dans les stations touristiques : Le cas de Crans-Montana (Suisse), une illustration du modèle de gestion « public local fort »*. Working Paper n°5. IUKB, Sion.
- Bréthaut, C. (2012). *Analyse comparée des arrangements institutionnels de gestion des services urbains de l'eau dans les espaces touristiques : les cas de Crans-Montana (Suisse) et de Morzine-Avoriaz (France)*. Thèse de doctorat. Institut Universitaire Kurt Bösch et Université de Lausanne.
- Bréthaut, C., et Nahrath, S. (2010). *Entre imbrication, instrumentalisation et infusion : le rôle des consortages de bisses et des bourgeoisies dans les politiques de gestion de l'eau à Crans-Montana*. In *Actes du colloque international sur les bisses*, Sion, 2-5 septembre 2010, Annales valaisannes 2010/2011, pp. 69-89.
- Briguet, K. (2012) *Imaginer le futur et anticiper les besoins* [Article de journal disponible en version électronique]. Disponible sur : <http://issuu.com> (consulté le 11.05.2013).
- Brouwer, C. and Heibloem, M. (2001). *Irrigation Water Management : Irrigation Water Needs* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <ftp://ftp.fao.org> (consulté le 21.01.2013).
- Bruch, C. (2009). Adaptive Water Management : Strengthening Laws and Institutions to Cope with Uncertainty. In *Water Management in 2020 and Beyond*, pp. 89-113. Berlin : Springer Berlin Heidelberg.
- Bührer, C. (1897). Le climat du Valais [Document numérisé en ligne]. In *Bulletin de la Murithienne*, no. 26, p. 230. Disponible sur : <http://doc.rero.ch> (consulté le 05.05.2013).
- Bulletin de la Murithienne (1956). *Le nouvel aménagement hydro-électrique de la Lienne* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://doc.rero.ch> (consulté le 25.10.2011).
- Butler, R.W. (2011). *Tourism Area Life Cycle* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.goodfellowpublishers.com> (consulté le 11.10.2012).

- C -

- Canton du Valais (2007a). *Études et réalisations. Étude des terroirs viticoles valaisans*. [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.vs.ch> (consulté le 09.01.2012).
- Canton du Valais (2007b). *Qualité des cours d'eau en Valais* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.vs.ch> (consulté le 18.06.2011).
- Canton du Valais (2009). *Plan cantonal d'assainissement des cours d'eau* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.vs.ch> (consulté le 18.06.2011).
- Canton du Valais (2010, 6 août). *Bilan d'épuration des eaux usées en Valais, année 2009* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.vs.ch> (consulté le 18.06.2011).
- Canton du Valais (2011). *Recommandation à l'intention des vigneron et encaveurs. Evacuation des eaux usées*. [Page Web]. Disponible sur : <http://www.vetroz.ch> (consulté le 20.09.2011).
- Castella, J. (2006). *Calcul du débit Q_{347} pour les points de prélèvement d'eau destinés à l'hydroélectricité dans le canton du Valais*. Mémoire de Master ès sciences pour l'enseignement, non publié. Lausanne : Université, Institut de Géographie.
- Cavalier-Smith, T. (2004). Only six kingdoms of life. *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences*, vol. 271, pp. 1251-1262.
- Cerutti, J. (2011) « Village royal » en Valais : c'est la folie des hauteurs! [Article de journal disponible en version électronique]. Disponible sur : <http://www.lematin.ch> (consulté le 8.03.2011).
- CH2011 (2011). *Les scénarios du changement climatique en Suisse CH2011* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.ch2011.ch> (consulté le 08.05.2012).
- Chambre d'Agriculture de la Gironde et IFV (2011). *Œnologie* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.matevi-france.com> (consulté le 20.09.2011)
- Charnay, B. (2010). *Pour une gestion intégrée des ressources en eau sur un territoire de montagne. Le cas du bassin versant du Giffre (Haute-Savoie)*. Thèse de doctorat. Chambéry : Université de Savoie.
- CIPRA, Commission Internationale pour la Protection des Alpes (2011). *La gestion de l'eau face au changement climatique* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.cipra.org> (consulté le 01.11.2012).
- Clavien, Y. (2004). *Influences des sols, de la végétation herbacée et des techniques de gestion sur le comportement de la vigne et la qualité du moût* [Document numérique en ligne]. Mémoire de licence publié sous forme électronique.

Université de Neuchâtel, Faculté de biologie, Institut de botanique. Disponible sur : <http://www2.unine.ch> (consulté le 01.11.2012).

CMA, Remontées Mécaniques Crans Montana Aminona SA (2010). *Schéma d'adduction projeté* [Schéma technique].

CMA, Remontées Mécaniques Crans Montana Aminona SA (2012). *Rapport de gestion 2011-2012* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.cma.ch> (consulté le 4 novembre 2012).

CMT, Crans-Montana tourisme (2012). *Rapport de gestion 2011*.

Commune de Lens (2012) *Bisse du Rô* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.lens.ch> (consulté le 07.02.2012).

Commune de Montana (2005). Les alpages de notre région [Document numérique en ligne].

Disponible sur : <http://www.montana.ch> (consulté le 14.01.2011).

Commune de Montana (2009). L'eau source de vie. [Document numérique en ligne].

Disponible sur : <http://www.montana.ch> (consulté le 08.10.2012).

Crettaz, R. (2010). *Etude sur le bisse du Bénou (Valais). Son mode de gestion de hier à aujourd'hui*. Travail Personnel. Université de Fribourg, Faculté des Sciences, Département de Géosciences.

- D -

DDC, Direction du développement et de la coopération, (2005). *Eau 2015 : Principes de base et lignes directrices* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.deza.admin.ch> (consulté le 13.01.2011).

Demers, A. (2006). *Les impacts engendrés par la modification du régime hydrique, découlant de l'enneigement artificiel*. 2e cycle, essai, Université de Sherbrooke, Québec., p. 74.

DFE, Département fédéral de l'économie, (2011). *Situation économique : défis actuels* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.evd.admin.ch> (consulté le 8 mai 2012).

Dietl, W., Schmid, W., und Zihlmann, U. (1991). Floristique und ökologische Charakterisierung der Magerwiesen. In Häberli, R., Lüscher, C., Praplan Chastonay, B., Wyss, C. *Boden-Kultur : Für eine haushälterische Nutzung des Bodens in der Schweiz*. Zürich : Verlag der Fachvereine.

Dietrich, D., et Casey, M. (1989). A new tectonic model for the Helvetic nappes. In *Alpine Tectonics, geological Society of London Special Publication*, no. 8, pp. 47-63.

Dipner-Gerber, M. (2008). Prairies et pâturages secs. *Information du forum biodiversité suisse - Biodiversité : Dialogue entre recherche et pratique* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.biodiversity.ch> (consulté le 13.01.2011).

Doriot Galofaro , S. (2005a). Autour des archives, la naissance de la station et son évolution. In Galofaro Doriot, S., *Un siècle de tourisme à Crans-Montana* (pp. 18-21), Ayer : Porte-plumes.

Doriot Galofaro , S. (2005b). Un panorama unique : Montana et Crans entre ouverture et rivalité. In Galofaro Doriot, S., *Un siècle de tourisme à Crans-Montana* (pp. 34-39), Ayer : Porte-plumes.

Douglas, I. (1994). Human Settlements. In *Changes in Land Use and Land Cover : A Global Perspective*, eds. W. B. Meyer et B. L. Turner II, 149-169 pp. Cambridge University Press.

Dubuis, P. (1995). *Bisse et conjoncture économique : le cas du Valais au XIV et XV^e siècle*. In Actes du colloque international sur les bisses, Sion, 15-18 septembre 1994, Annales valaisannes, 2e série, no. 70, pp. 39-46.

- E -

EEA, European Environment Agency, (2009) *Regional climate change and adaptation - The Alps facing the challenge of changing water resources*. Copenhagen : Schultz Grafisk.

ENSEMBLES (2009). *Climate change and its impacts at seasonal, decadal and centennial timescales - Summary of research and results from the ENSEMBLES project* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://ensembles-eu.metoffice.com> (consulté le 13.01.2011).

Emery Mayor, D. (2007). *Artificielle ou tombée du ciel : la neige sera à Crans-Montana cet hiver* [Article de journal disponible en version électronique]. Disponible sur : <http://blog.sixieme-dimension.ch> (consulté le 12.01.2011).

Emery Mayor, D. (2010). *Ycoor : le projet va bientôt remodeler le visage de la station* [Article de journal disponible en version électronique]. Disponible sur : <http://blog.sixieme-dimension.ch> (consulté le 10.03.2011).

Emery Mayor, D. (2011a). *Coupe du Monde de ski : un défi de taille pour Crans-Montana en février 2012* [Article de journal disponible en version électronique]. Disponible sur : <http://blog.sixieme-dimension.ch> (consulté le 09.04.2013).

Emery Mayor, D. (2011b). *Concept de gestion des eaux de la Lienne à la Raspille : Icogne Energie SA a démarré des travaux vertigineux* [Article de journal disponible en version électronique]. Disponible sur : <http://blog.sixieme-dimension.ch> (consulté le 25.10.2011).

Emery, L. (2010). *Gestion de l'eau des golfs de Crans-Montana*. Mini-Mémoire de Bachelor non publié. Université de Lausanne, Faculté des géosciences et de l'environnement.

EPFL, École polytechnique fédérale de Lausanne (2010). *Collection des articles des travaux de diplôme*. [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://infoscience.epfl.ch> (consulté le 08.10.2010).

ESR SA, Énergie de Sion-Région SA (2010). *Chiffres clés de Beulet* [Page Web].

Disponible sur : <http://www.esr.ch> (consulté le 14.01.2011).

ESRI, Environmental Systems Research Institute (2011). *Smoothing zone edges with Boundary Clean and Majority Filter* [Page Web]. Disponible sur : <http://help.arcgis.com> (consulté le 16.04.2013).

- F -

Fallot, J.-M. (2011). *Rétrospective année 2010. Inspiré de MétéoSuisse* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.cepob.ch> (consulté le 11.05.2013).

Fallot, J.-M. (2012). *Quelques aspects climatiques marquants de l'année 2011 en Suisse* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.climato.be> (consulté le 10.05.2013).

FAO (1987). Coefficient de réponse du rendement (K_y). *Bulletin FAO d'irrigation et de drainage*, no. 33, pp. 46-50.

FAO (1998). *Crop evapotranspiration; Guidelines for computing crop water requirements* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.fao.org> (consulté le 15.11.2011).

FAO (2006). *Soil permeability* [Page Web]. Disponible sur : <ftp://ftp.fao.org> (consulté le 12.09.2011).

Finger, D., Hugentobler, A., Hüss, M., Voinesco, A., Wernli, H., Fischer, D., Weber, E., Jeannin, P.-Y., Kauzlaric, M., Wirz, A., Vennemann, T., Hüsler, F., Schädler, B., and Weingartner, R. (2013). Identification of glacial melt water runoff in a karstic environment and its implication for present and future water availability. *Hydrology Earth System Sciences Discussion*, 10, pp. 2743-2788, doi :10.5194/hessd-10-2743-2013.

Flörke, M. et Alcamo, J. (2004). *European outlook on water use*. Final report, Center for Environmental Systems Research, Kassel, 83 p.

Frei, E. et Peyer, K. (1984). *Légende détaillée pour la carte des sols 1:500'000*. Feuille 7a de l'Atlas de la Suisse. Wabern : Office fédéral de topographie.

- G -

GIEC, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2007). *Changements climatiques - Rapport de synthèse* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.ipcc.ch> (consulté le 08.04.2013).

GIEC, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2008). *Climate change and water - IPCC Technical Paper VI* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.ipcc.ch> (consulté le 11.05.2013).

Giovanola, A., et Karlen, A. (1999). *Les bisses du Valais*. Sierre, Monographic, 311 p.

Gisiger K. (1997). Inventaire des bisses valaisans. In Vautier, A., *Au pays des bisses*. Châtelaine-sur-Moudon : Editions Kitty Alexandre [Rééd. de Vautier, A. (1928). *Au pays des bisses*, Lausanne : Spes].

Gleick, P. H. (2000). The changing water paradigm : a look at twenty-first century water resources development. In *Water International*, vol. 1, no. 1, pp. 127-138.

Gobat, J.-M., Aragno, M., Matthey, W. (2010). *Le sol vivant. Bases de pédologie, biologie des sols (3e édition)*. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes.

Gonseth, C. et Vielle, M. (2011). Modeling climate change adaptation in a computable general equilibrium model : an application to tourism [Document numérique - Working paper]. Disponible sur : <http://www.gemini-e3.epfl.ch> (consulté le 31.10.2012).

Guillaume, P. (1991). Tuberculose et montagne : Naissance d'un mythe. In *Vingtième Siècle, Revue d'histoire*. no. 30, pp. 32-39.

GWP, Global Water Partnership (2000). *La gestion intégrée des ressources en eau* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.gwptoolbox.org> (consulté le 31.10.2012).

GWP, Global Water Partnership (2012). *GWP in action. 2011 Annual Report* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.gwp.org> (consulté le 08.05.2013).

GWP, Global Water Partnership (2013). *Water : catalyst for cooperation* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.gwp.org> (consulté le 08.05.2013).

- H -

Höllermann, B., Giertz, S., and Diekkrüger, B. (2010). Benin 2025 – Balancing Future Water Availability and Demand Using the WEAP “Water Evaluation and Planning” System. *Water Resources Management*, vol. 24, no. 13, pp. 3591-3613.

Homewood, C. (in prep.). *Entre flexibilité et rigidité : gestion de l'eau en Valais dans un système complexe*. Thèse de doctorat. Université de Fribourg.

Hüss, M., Hoelzle, M., et Voinesco, A. (2011). *Glaciological investigations on Glacier de la Plaine Morte* [Présentation de diapositives]. Fribourg : Université, Institut de géographie.

Hüss, M., Voinesco, A., Hoelzle, M. (in prep.). Implications of climate change on Glacier de la Plaine Morte [in preparation]. *Geographica Helvetica*.

- I -

IFV, Institut Français de la Vigne et du Vin (2011). *L'hygiène en œnologie : généralités* [Page Web]. Disponible sur : <http://vignevin-sudouest.com> (consulté le 20.09.2011).

ISSKA, Institut suisse de spéléologie et de karstologie (2011). *Presentation of the geological model built for the MontanAqua project* [Vidéo en ligne]. Disponibles sur : <http://www.vimeo.com> (consulté le 10.05.2013).

- J -

Jabloun, M. et Sahli, A., (2012) *WEAP-MABIA Tutorial*. [Document numérique en ligne].

Disponible sur : <http://www.bgr.bund.de> (consulté le 12.12.2011).

Juuti, P., Katko, T. S., and Vuorinen, H. S. (2007). *Environmental history of water : Global views on community water supply and sanitation*. London : IWA Publishing.

- K -

Kappeyne van de Coppello, S. (1987). Championnats du monde de ski alpin 1987. *La vie à Crans-sur-Sierre/Montana*, n°11, pp. 29-38.

Khatri, K. B. et Vairavamoorthy, K. (2009). *Water Demand Forecasting for the City of the Future against the Uncertainties and the Global Change Pressures : Case of Birmingham* [Document numérique]. Disponibles sur : <http://www.delftcluster.nl> (consulté le 10.05.2013).

Knecht, S. (2010). *Hydrologische Vorerkundung Crans-Montana-Sierre*. Masterarbeit. Universität Bern, Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät, Geographisches Institut.

Knoepfel, P., Kissling-Näf, I., et Varone, F. (éds), avec la collaboration de Bisang, K., Mauch, C., Nahrath, S., Reynard, E., et Thorens., A. (2001). Institutionelle Regime für natürliche Ressourcen : Boden, Wasser und Wald im Vergleich – Régimes institutionnels de ressources naturelles : analyse comparée du sol, de l'eau et de la forêt. Bâle : Helbing & Lichtenhahn (série Ecologie & Société).

Krogerus, M. and Tschäppeler, R. (2012). *The Change Book*. London : Profile Books.

- L -

Laignre, L., Arnaud-Fassetta, G., et Reynard, E. (2010). Cartographie sectorielle du paléoenvironnement de la plaine alluviale du Rhône suisse depuis la fin du Petit Age Glaciaire : la métamorphose fluviale de Viège à Rarogne et de Sierre à Sion. *Bull. Murithienne*, vol. 127, pp. 7-16.

Lasserre, F., Descroix, L. (2011). *Eaux et territoires. Tension, coopérations et géopolitique de l'eau*. Québec, Presses de l'Université du Québec.

Lauber, K., et Wagner, G. (2009). *Flora Helvetica* (4e éd. rév). Bern : Haupt Verlag.

Le Nouvelliste (2012). *Le canton ne respecte pas la loi* [Article de journal disponible en version électronique]. Disponibles sur : <http://www.lenouvelliste.ch> (consulté le 12.12.2012).

Les Vins du Valais (2012). *Encaveurs* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.lesvinsduvalais.ch> (consulté le 10.02.2012).

Lew, A. A. (1987). A framework of tourism attraction research. In *Annals of tourism research*, vol. 14, pp. 553-575.

Libbrecht, K. G. (2005). The Physics of Snow Crystals. *Reports on Progress in Physics*, no. 68, 855-895.

Lienne SA (2002-2011). *Rapports de gestion* [Document numérique en ligne]. Disponibles sur <http://www.esr.ch> (consulté le 12.08.2012).

Lindzen, R. S. (1994). Climate Dynamics and Global Change. *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 26, pp. 353-378.

Loretan, V. (1999). *L'eau dans la Contrée d'Agent. Eau d'irrigation et gestion de l'eau potable*. Mémoire de licence, Université de Lausanne, Institut de Géographie, p. 64.

- M -

Massy, F. (2011). Quelques gouttes de luxe sur un Plateau d'argent... *Le Nouvelliste*, p. 2.

Mabillard, G. (1997). *Le bisse du Rho et le tunnel du Mont Lachaux*, Université de Lausanne, Institut de Géographie, Levé de terrain, non publié.

MADD Technologies (2011). *Mode d'emploi HyMADD* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.jdc.ch> (consulté le 28.11.2011).

Magnier, E. (2010). *La neige artificielle* [Conférence]. Lausanne : Université, Institut de géographie.

Magnier, E. (2013). Artificial snow and water uses in mountain resorts. The Dranse-de-Sous-Saix area (Haute-Savoie, France). In Arnaud-Fassetta, G., Masson, E. and Reynard, E. (editors), *European Continental Hydrosystems*, München : Verlag Dr. Friedrich Pfeil, pp. 193-204.

Marcelpoil, E. et Langlois, L. (2010) *Protection de l'environnement et développement touristique en station : du conflit à l'organisation des proximités* [Article dans une revue en ligne].

Disponible sur : <http://developpementdurable.revues.org> (consulté le 29.11.2012).

Mariétan, I. (1948). *Les bisses. La lutte pour l'eau en Valais*. Neuchâtel : Ed. du Griffon.

- Meier, C. und Buchecker, M. (2005). *Soziokulturelle Aspekte der Landschaftsentwicklung. Grundlagen für das Projekt Landschaft 2020 des BUWAL*. Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Schriftenreihe Umwelt und Natürliche Ressourcen der Hochschule Wädenswil 1.
- Mortier, V. (2001). *Processus métier et composants logiciels pour la gestion intégrée des eaux en milieu urbain*. Lausanne : EPFL.
- Mounir, Z. M., Ma, C. M., et Amadou, I. (2011). Application of Water Evaluation and Planning (WEAP) : A Model to Assess Future Water Demands in the Niger River (In Niger Republic). In *Modern Applied Science*, vol. 1, no. 5, pp. 38-49.
- Mountain Wilderness France (2005). *Enneigement artificiel : eau secours !* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.c-rdp.ac-grenoble.fr> (consulté le 05.09.2011)
- Musy A., Higy C., Reynard E. (in prep.). *L'hydrologie : une science de la nature, une gestion sociétale*. Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes.

- N -

- Nahrath, S., Papilloud J.-H., et Reynard, E. (2011). Conclusions : le renouveau des bisses. In *Actes du colloque international sur les bisses*, Sion, 2-5 septembre 2010, Annales valaisannes 2010/2011, pp. 531-535.
- Nicklaus, M. (2012). *An Object-oriented Approach for Mapping Current Land Use/Land Cover in the Study Area Crans-Montana-Sierre, Valais*. University of Berne, Faculty of Natural Sciences, Master Thesis.
- Noverraz, F., Bonnard, C., Dupraz, H., et Huguenin, L. (1998). *Grands glissements de versants et climat*. Zürich : vdf.

- O -

- OCDE, Organisation de coopération et de développement économiques (2003). *Améliorer la gestion de l'eau : l'expérience récente de l'OCDE*. Paris, OCDE, p. 144.
- OFEG, Office fédéral des eaux et de la géologie (2002). Les crues 2000. *Rapports de l'OFEG, Série Eaux, 2*.
- OFEN, Office fédéral de l'énergie (2008). *Stratégie d'utilisation de l'énergie hydraulique en Suisse* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.bfe.admin.ch> (consulté le 11.04.2013).
- OFEN, Office fédéral de l'énergie (2011). *Sécurité énergétique* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.bfe.admin.ch> (consulté le 08.10.2012).
- OFEV, Office fédéral de l'environnement (2009). *Étiages et crues : Événements extrêmes* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.bafu.admin.ch> (consulté le 16.12.2011).
- OFEV, Office fédéral de l'environnement (2010). *Prairies et pâturages secs (PPS)* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.bafu.admin.ch> (consulté le 18.06.2011).
- OFEV, Office fédéral de l'environnement (2011a). *Crues des 10 et 11 octobre 2011* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.bafu.admin.ch> (consulté le 11.01.2012).
- OFEV, Office fédéral de l'environnement (2011b). *Gestion par bassin versant - Idées directrices pour une gestion intégrée des eaux en Suisse* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.bafu.admin.ch> (consulté le 10.01.2012).
- OFEV, Office fédéral de l'environnement (2011c). *Sécheresse du printemps 2011 : effets sur la nature et l'environnement* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.bafu.admin.ch> (consulté le 10.01.2012).
- OFEV, Office fédéral de l'environnement (2012a). *Adaptation aux changements climatiques en Suisse. Objectifs, défis et champs d'action. Premier volet de la stratégie du Conseil fédéral du 2 mars 2012* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.bafu.admin.ch> (consulté 08.05.2013).
- OFEV, Office fédéral de l'environnement (2012b). *Gestion par bassin versant et gestion des eaux en Suisse* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.bafu.admin.ch> (consulté 08.04.2013).
- OFEV, Office fédéral de l'environnement (2012c). *Rapport de synthèse du projet «Changement climatique et hydrologie en Suisse» (CCHydro)* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.bafu.admin.ch> (consulté 08.05.2013).
- Office de la statistique du canton du Valais (2010). *Le Valais en chiffres* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.vs.ch> (consulté le 17.06.2011).
- Office du tourisme de Sierre Salgesch (2012). *Rapport d'activités 2011*.
- OFS, Office fédéral de la statistique (2003). *Nuitées touristiques par catégorie de logement en 2003 dans les principales stations valaisannes* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.valaistourism.net> (consulté le 19.06.2011).
- OFS, Office fédéral de la statistique (2008). *Recensement fédéral des entreprises* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.bfs.admin.ch> (consulté le 19.06.2011).
- OFS, Office fédéral de la statistique (2011). *Scénarios de l'évolution de la population des cantons de 2010 à 2035* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.bfs.admin.ch> (consulté le 11.05.2013).

- OFS, Office fédéral de la statistique (2012). *Statistique de l'hébergement touristique* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.bfs.admin.ch> (consulté le 19.06.2011).
- Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse (2010a). *Bulletin climatologique saisonnier - Hiver 2009/2010* [Page Web]. Disponible à l'adresse <http://www.meteosuisse.admin.ch/> (consulté le 07.05.2013).
- Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse (2010b). *Bulletin climatologique saisonnier - Printemps 2010* [Page Web]. Disponible à l'adresse <http://www.meteosuisse.admin.ch/> (consulté le 07.05.2013).
- Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse (2010c). *Bulletin climatologique saisonnier - Eté 2010* [Page Web]. Disponible à l'adresse <http://www.meteosuisse.admin.ch/> (consulté le 07.05.2013).
- Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse (2010d). *Bulletin climatologique saisonnier - Automne 2010* [Page Web]. Disponible à l'adresse <http://www.meteosuisse.admin.ch/> (consulté le 07.05.2013).
- Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse (2011a). *Bulletin climatologique saisonnier - Hiver 2010/2011* [Page Web]. Disponible à l'adresse <http://www.meteosuisse.admin.ch/> (consulté le 07.05.2013).
- Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse (2011b). *Bulletin climatologique saisonnier - Printemps 2011* [Page Web]. Disponible à l'adresse <http://www.meteosuisse.admin.ch/> (consulté le 07.05.2013).
- Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse (2011c). *Bulletin climatologique saisonnier - Eté 2011* [Document numérique en ligne]. Disponible à l'adresse <http://www.meteosuisse.admin.ch/> (consulté le 07.05.2013).
- Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse (2011d). *Bulletin climatologique saisonnier - Automne 2011* [Document numérique en ligne]. Disponible à l'adresse <http://www.meteosuisse.admin.ch/> (consulté le 07.05.2013).
- Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse (2012). *Bulletin climatologique saisonnier - Hiver 2011/2012* [Document numérique en ligne]. Disponible à l'adresse <http://www.meteosuisse.admin.ch/> (consulté le 07.05.2013).
- Olefs, M., Fischer A., Lang, J. (2009). *Boundary conditions for artificial snow production in the Austrian Alps*. [Page Web]. Disponible sur : <http://imgi.uibk.ac.at> (consulté le 08.04.2013)
- ONU, Organisation des Nations unies (1992). *Agenda 21* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.un.org> (consulté le 05.04.2013).
- OVS, Observatoire Valaisan de la Santé (2011). *Population selon le lieu de domicile, Valais* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.ovs.ch> (consulté le 29.09.2012).

- P -

- Paccard, P. (2009). Un exemple d'exploitation des ressources en eau du karst : la production de neige à Villard-de-Lans – Corrençon-en-Vercors (Isère, France), *Karstologia*, no. 52, pp. 41-52.
- 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 doctorat. Chambéry : Université de Savoie.
- PAES, Plan d'action environnement et santé suisse (2006). *Dé... marche à Crans-Montana. Rapport sur les connaissances acquises entre 2001 et 2006 par la Région pilote du Plan d'action environnement et santé suisse (PAES)* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.cransmontana.ch> (consulté le 7.03.2011).
- Papilloud, J.-H. (1995). Présentation. In *Actes du colloque international sur les bisses*, Sion, 15-18 septembre 1994, Annales valaisannes, 2e série, no. 70, pp. 11-16.
- Papilloud, J.-H. (2002). Les bisses du Valais. In Guex, D., et Reynard, E. (Eds), *L'eau dans tous ses états. Actes du cycle de conférences 2001 de l'Association des Anciens de l'IGUL*, Travaux et recherches n°22. Lausanne : Université, Institut de Géographie, pp. 61-72.
- Pearse, G. (2012). *Greenwash : big brands and carbon scams*. Collingwood, Vic. : Black Inc..
- Pecher, C., Tasser, E. et Tappeiner, U. (2011). Definition of the potential treeline in the European Alps and its benefit for sustainability monitoring. *Ecological Indicators* 11, pp. 438-447.
- Perec, G. (1978). *La Vie mode d'emploi*. Paris : Hachette Livre.
- Perry, A. D. (1994) *Forest ecosystems*. Baltimore, JHU Press, p. 649.
- Petroni, B. (2013). *Das Wasser läuft vorwiegend in das Oberland ab, aber...* [Article de journal disponible en version électronique]. Disponible sur : www.bernerzeitung.ch (consulté le 25.03.2013).
- Peirce, J. J., Weiner, R. F., and Aarne Vesilind, P. (1998). *Environmental Pollution and Control. Fourth Edition*. Oxford : Butterworth-Heinemann.
- PNR 61 (2010). *Gestion durable de l'eau - Portrait du Programme national de recherche PNR 61*. Zuben, Druckwerkstatt A. Huber, p. 56.
- PNR 61 (2012). *Portrait* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.nfp61.ch> (consulté le 12.09.2012).
- Pomerol, C., Renard, M. et Lagabriele, Y. (2005). *Éléments de géologie*, Paris, Dunod, 13e édition, p. 762.
- Prichard, T. (2000). Vineyard Irrigation Systems. *Raisin Production Manual*. Oakland, CA, University of California Agricultural and Natural Resources Publication, no. 3393, pp. 57-63.

Pütz, M., Gallati, D., Kytzia, S., Elsasser, H., Lardelli, C., Teich, M., Waltert, F., Rixen, C. (2011) Winter tourism, climate change, and snowmaking in the Swiss Alps : tourists' attitudes and regional economic impacts. In *Mountain Research and Development*, vol. 31, no. 4, 357-362 pp.

Putz, C. (2003) *La gestion de l'eau potable sur le Haut Plateau*. Université de Lausanne, Institut de Géographie, Mémoire de licence.

- Q -

Quaglia, L. (1988). *Le Mont de Lens*. Lens, Commune de Lens.

- R -

Rai 3. (2008, 3 avril). *Alberto Tomba - Il bello della neve (46 m 27 s)* [Émission de télévision]. 44 m 39 s - 53 s.

Rebetez, M. and Dobbertin, M. (2004). Climate change may already threaten Scots pine stands in the Swiss Alps. In *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 79, no. 1-2, pp. 1-9.

Renner, R., Schneider, F., Hohenwallner, D., Kopeinig, C., Kruse, S., Lienert, J., Link, S., and Muhar, S. (2013). Meeting the Challenges of Transdisciplinary Knowledge Production for Sustainable Water Governance. *Mountain Research and Development*, vol. 33, no. 3, pp. 234-247.

Rey, E., Schneider, F., Liniger, H., Herweg, K., & Weingartner, R. (2013). *Climate change scenarios and socio-economic scenarios, land use modelling and water resources in an inner alpine area, Switzerland* [Poster]. Présenté le 01.03.2013 à la 22e réunion annuelle « Hochgebirge im Globalen Wandel ». Bonn, Allemagne.

Rey, F. J. H. (2002). *Historique de la Commune de Montana* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.montana.ch> (consulté le 13.01.2011).

Rey, G., et Bonvin, J. (1999). *Le glissement du Boup* [Document numérique en ligne].

Disponible sur : <http://www.montana.ch> (consulté le 14.01.2011).

Rey, Y. (2009) *Nouveau concept de gestion des eaux de la région de Crans-Montana*. Travail de MAS en ingénierie hydraulique. EPFL, Laboratoire de Constructions Hydrauliques.

Papilloud, J.-H. (1995). Présentation. In *Actes du colloque international sur les bisces*, Sion, 15-18 septembre 1994, Annales valaisannes, 2e série, no. 70, pp. 11-16.

Reynard, E. (1995). L'irrigation par les bisces en Valais. Approche géographique. In *Actes du colloque international sur les bisces*, Sion, 15-18 septembre 1994, Annales valaisannes, 2e série, no. 70, pp. 47-64.

Reynard, E. (2000a). *Gestion patrimoniale et intégrée des ressources en eau dans les stations touristiques de montagne. Le cas de Crans-Montana-Aminona et Nendaz (Valais)*. Thèse de doctorat. Université de Lausanne, Institut de Géographie, Travaux et recherches no. 17.

Reynard, E. (2000b). Cadre institutionnel et gestion des ressources en eau dans les Alpes : deux études de cas dans des stations touristiques valaisannes [Article dans une revue en ligne]. In *Swiss Political Science Review*, no. 6, pp. 53-85. Disponible sur : <http://onlinelibrary.wiley.com> (consulté le 14.01.2011).

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 Géographie Alpine*, vol. 89, no. 3, pp. 7-19.

Reynard, E. (2005a). Governance of Farmer Managed Irrigation Corporations in the Swiss and Italian Alps : Issues and Perspectives, in : Pradhan P., Gautam U. (Eds). *Farmer Managed Irrigation Systems and Governance Alternatives*, Proceedings of the Third International Seminar held on 9-10 September 2004, Kathmandu, Nepal, Kathmandu, Farmer Managed Irrigation Systems Promotion Trust, pp. 67-86.

Reynard, E. (2005b). La trame naturelle : un plateau qui n'en est pas un ! In Galofaro Doriot, S., *Un siècle de tourisme à Crans-Montana* (pp. 24-33), Ayer : Porte-plumes.

Reynard, E. (2008). Transporter l'eau : regards croisés sur les réseaux urbains et ruraux de l'eau en Suisse, *Flux*, no. 72, pp. 27-38.

Reynard, E. (2012) *Raconte-nous les bisces ; Les consortages des bisces (6 min)* [Vidéo en ligne].

Disponible sur : <http://vimeo.com> (consulté le 28.08.2012).

Reynard, E., Jenelten-Biollaz, V., et Biollaz, S. (2011). Les bisces du Valais au patrimoine mondial ?. In : Nahrath, S., Papilloud J.-H., et Reynard, E. (dir.). *Les Bisces, économie, société, patrimoine*. Actes du colloque international. Sion, 2-5 septembre 2010, Annales valaisannes 2010/2011, pp. 403-423.

Reynard, E., Arnaud-Fassetta, G., Laigre, L., et Schoeneich, P. (2009). Le Rhône alpin sous l'angle de la géomorphologie : état des lieux. In E. Reynard, M. Evéquo-Dayen et P. Dubuis (eds.), *Le Rhône : dynamique, histoire et société*. Sion : Cahiers de Vallesia, pp. 75-100.

Reynard, E., Mauch, C., et Thorens, A. (2001). Développement historique des régimes institutionnels de l'eau en Suisse entre 1870 et 2000. In Knoepfel P., Kissling-Näf I., Varone F. (Eds.), *Institutionelle Regime für natürliche Ressourcen : Boden, Wasser und Wald im Vergleich - Régimes institutionnels de ressources naturelles : analyse comparée du sol, de l'eau et de la forêt*. Bâle : Helbing Lichtenhahn, pp. 101-139.

- Reynard, E., Baud, M. (2001). 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*. Irrigation et droits d'eau du Moyen Age à nos Pyrénées (Aubriot O., Jolly G., eds.), Aix, Presses de l'Université de Provence, pp. 187-212.
- Reynard, E., et Bonriposi, M. (2012). Water use management in dry mountains of Switzerland. The case of Crans-Montana Sierre area. In Miklos NEMÉNYI - Bálint HEIL, *The Impact of Urbanization, Industrial, Agricultural and Forest Technologies on the Natural Environment*. Budapest : Nemzeti Tankönyvkiadó, pp. 281-301.
- Reynard E., Martin S., Arlettaz S., Bessero V. (2007). Analyse cartographique de l'évolution du vignoble valaisan depuis 1880. In *Vallesia*, no. 62, pp. 261-296.
- Robyr, J. (2001). *De la naissance des remontées mécaniques sur le Haut-Plateau à CMA SA* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.montana.ch> (consulté le 19.06.2011).
- Roe, G. H., and O'Neal, M. A. (2005). The response of glaciers to intrinsic climate variability : observations and models of late-Holocene variations in the Pacific Northwest. In *Journal of Glaciology*, vol. 55, no. 193, pp. 839-854.
- Rogers, de Silva & Bhatia (2002). Water is an economic good : How to use prices to promote equity, efficiency, and sustainability. In *Water policy : official journal of the World Water Council*, vol. 4, no. 1, pp 1-17.
- Rudaz, G. (2009). Recompositions territoriales et gouvernance des régions de montagne [Article dans une revue en ligne]. In *Revue de géographie alpine*, vol. 9, no. 2, pp. 19-29. Disponible sur : <http://rga.revues.org> (consulté le 03.04.2013).

- S -

- Savoy, J.-C. (2010). *La lutte pour l'eau* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.lens.ch> (consulté le 13.01.2011).
- Schmithüsen, F. (2000). L'évolution des politiques forestières en Europe. *Cahiers du Conseil général du Génie Rural, des Eaux et des Forêts*, no. 56, pp. 9-15.
- Schneider, F. (2011). *Scénarios socio-économiques*. [Document de travail]. Berne : Université, Institut de géographie.
- Schneider, F. et Homewood, C. (2013). Exploring Water Governance Arrangements in the Swiss Alps From the Perspective of Adaptive Capacity. *Mountain Research and Development*, vol. 33, no. 3, pp. 225-233.
- Schneider, F. et Rist, S. (2013). *Envisioning sustainable water futures in a transdisciplinary learning process : combining normative, explorative, and participatory scenario approaches*. [Submitted to « Sustainability science »].
- Schweizer, R. (2010). *Les bisses et leurs modes d'organisation au XXIe siècle, un modèle de gestion durable ? Etude de cas à Savièse*. Lausanne : IDHEAP, Institut de hautes études en administration publique.
- Schweizer, R., et Reynard, E. (2011). La gestion d'un réseau complexe d'irrigation en 2010. L'exemple du coteau de Savièse. In : Nahrath, S., Papilloud J.-H., et Reynard, E. (dir.). *Les Bisses, économie, société, patrimoine*. Actes du colloque international. Sion, 2-5 septembre 2010, Annales valaisannes 2010/2011, pp. 109-129.
- Schwarz E. (1996). Une brève introduction à l'approche systémique, in : Schwarz E. (éd.) : *La théorie des systèmes : une approche inter- et transdisciplinaire*, Colloque tenu à Sion, 4-6 avril 1995, Sion : Institut Kurt Bösch, pp. 9-28.
- SEI (2011). *MABIA Method* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.weap21.org> (consulté le 13.09.2011).
- Serquet, G. et Rebetez, M. (2013). *Changements climatiques - Quel avenir pour les destinations touristiques des Alpes et du Jura vaudois ?* [Document numérique en ligne]. Disponible sur <http://www.vd.ch> (consulté le 18.11.2011).
- Serquet, G. et Thalmann, P. (2011). *Impact des changements climatiques pour le tourisme à Verbier* [Document numérique en ligne]. Disponible sur <http://www.verbiergps.com> (consulté le 18.11.2011).
- Service de l'agriculture du canton du Valais (2010). *Techniques d'irrigation du vignoble* [Document interne].
- Shortt, R. (2010). *Irrigation de début de saison* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.omafra.gov.on.ca> (consulté le 29.09.2011).
- Shmueli, D. F. (1999). Water quality in international river basins. *Political Geography*, no. 18, pp. 437-476.
- SHVR, Société d'histoire du Valais romand (1995). *Les Bisses*. Actes du colloque international sur les bisses. Sion, 15-18 septembre 1994, Annales valaisannes, no. 70, 375 p.
- Sixième Dimension (2012). *Message du 21 mai 2012* [Article de journal disponible en version électronique]. Disponible sur : <http://blog.sixieme-dimension.ch> (consulté le 21.05.2012).
- SSIGE, Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux (1998). *L'eau potable est de qualité ou n'est pas* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.trinkwasser.ch> (consulté le 13.01.2011).
- SSIGE, Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux (2003). *Consommation d'eau à la baisse en Suisse* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.trinkwasser.ch> (consulté le 12.01.2011).
- SSIGE, Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux (2010). *La consommation d'eau potable évolue à la baisse*. [Page Web]. Disponible sur : <http://www.trinkwasser.ch> (consulté le 23.01.2012).
- SSIGE, Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux (2011). *Entwicklung des mittleren (q_m) und des maximalen (q_{max}) Wasserverbrauchs pro Einwohner und Tag (l/E.d) von 1945 bis 2011*. [Page Web]. Disponible sur : <http://www.trinkwasser.ch> (consulté le 23.01.2012).

Swissinfo.ch (2007). *Crans-Montana ne veut plus de lits inoccupés* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.swissinfo.ch> (consulté le 21 août 2012).

Swissinfo.ch (2012a). *Victoire des protecteurs de l'environnement devant le TF* [Page Web]. Disponible sur <http://www.swiss-info.ch> (consulté le 06.12.2012).

Swissinfo.ch (2012b). *European Masters : casting revu à la baisse* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.swissinfo.ch> (consulté le 22 août 2012).

- T -

The Royal and Ancient Golf Club of St Andrews (2009). *Guidance on Running a Competition* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.randa.org> (consulté le 09.05.2013).

Tobler Haustechnik AG (2009). *Utiliser l'eau de pluie au lieu de gaspiller l'eau potable : avec les installations de récupération d'eau de pluie de la gamme Tobler* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://toblerag.ch> (consulté le 18.06.2011).

Turner, B. L. II, et Meyer, W. B. (1994). Global land-use and land-cover change : An overview. In *Changes in Land Use and Land Cover : A Global Perspective*, eds. W. B. Meyer et B. L. Turner II. Cambridge University Press, pp. 101-139.

- U -

UICN, Union mondiale pour la nature (2000). *Vision de l'eau et de la nature : Stratégie mondiale de conservation et de gestion durable des ressources en eau au 21e siècle* [Document de conférence]. *Deuxième forum mondial de l'eau*. La Haye, Pays-Bas.

- V -

Van Leeuwen, C., et Seguin, G. (1994). Incidences de l'alimentation en eau de la vigne, appréciée par l'état hydrique du feuillage, sur le développement de l'appareil végétatif et la maturation du raisin (*Vitis vinifera* variété Cabernet franc, Saint-Emilion 1990). In *Journal international des sciences de la vigne et du vin*, vol. 28, no. 2, pp. 81-110.

Van Vliet-Lanoë, B. (2005). *La planète des glaces. Histoire et environnements de notre ère glaciaire*. Paris, Vuibert, 470 p.

Varis, O., Biswas, A. K., Tortajada, C. et Lundqvist, J. (2006) Megacities and Water Management. In *International Journal of Water Resources Development*, vol. 22, no. 2, pp. 337-394.

Ville de Sierre (2011). *Attention, nous allons manquer d'eau!* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.sierre.ch> (consulté le 10.10.2011).

Viviroli, D. et Weingartner, R. (2004). The hydrological significance of mountains : from regional to global scale, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 8, no. 6, pp. 1017-1030.

- W -

Weber, E. (2010). *Bassins versants karstiques et modèles 3D autour de Montana* [Rapport]. La Chaux-de-Fonds : ISSKA, Institut suisse de spéléologie et de karstologie.

Weingartner, R., et Aschwanden, H. (1985). *Die Abfluss-regime der Schweiz*. Bern : Geographisches Institut der Universität.

Weingartner, R., et Aschwanden, H. (1992). *Régimes d'écoulement*. In Atlas hydrologique de la Suisse, Berne, Service hydrologique et géologique national, pl. 5.2.

Weingartner R., Herweg D., Liniger H., Rist S., Schädler B., Graefe B., Hoelzle M., Reynard E. (2010a). Wasserknappheit in inneralpinen Regionen – Optionen für eine nachhaltige Wassernutzung, *Geosciences Actuel*, vol. 2, pp. 20-22.

Weingartner R., Herweg D., Liniger H., Rist S., Schädler B., Graefe B., Hoelzle M., Reynard E. (2010b). Water Scarcity in InnerAlpine Regions. Options for sustainable water use in the Crans-Montana-Sierre region (Valais). *Mountain Research Initiative Newsletter*, no. 5, pp. 13-15.

Weingartner, R. et Reynard, E. (2010). Pénurie d'eau en région intra-alpine Projet d'étude pour une utilisation durable de l'eau en Valais, dans la région de Crans-Montana. *MeteoMagazine*, no. 6, pp. 13-15.

Werner, P. (1988). *La flore*. Martigny : Pillet.

Wildberger, A. (1981). *Zur Hydrogeologie des Karstes im Rawil-Gebiet*. Bern : Kommissionsverlag, Geographischer Verlag Kummerly & Frey.

Wolf, A. T., Kramer, A., Carius, A., and Dabelko, G. D. (2005). Managing Water Conflict and Cooperation. In The Worldwatch Institute. *The State of the World 2005 : Redefining global security*. Washington, D.C. : W. W. Norton Company, pp. 80-97.

Woolsey, S. (2005). *Makroinvertebraten : taxonomische Zusammensetzung des Makrozoobenthos* [Document numérique en ligne]. Disponible sur : <http://www.wsl.ch> (consulté le 29.03.2011).

WWF, World Wide Fund for Nature (2012). *Communiqué de presse* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.wwf.ch> (consulté le 12.12.2012).

WWDR, The United Nations World Water Development Report (2003). *Water for life, water for people*, Barcelona, UNESCO Publishing / Berghahn Books, p. 578. Disponible sur : <http://www.unesco.org> (consulté le 10.05.2013).

- Z -

Zanini, F., Zanini, E., Weber, C., et Schlaepfer, P. (2007). Analyse de la dynamique du paysage de la plaine du Rhône de 1850 à 2003 sur la base de cartes topographiques. *Bull. Murithienne*, vol. 124, pp. 89-98.

Cartes

Atlas hydrologique de la Suisse (1992-). Wabern : Office fédéral de topographie.

Carte nationale de la Suisse au 1:25'000 Feuille 1286 *St-Léonard* (2006). Wabern : Office fédéral de topographie.

Carte nationale de la Suisse au 1:25'000 Feuille 1287 *Sierre* (2006). Wabern : Office fédéral de topographie.

Carte pédologique de la Suisse au 1:200'000 (1980). DFKP, DFE, DFI.

Carte tectonique de la Suisse 1:500'000 (2005). Institut de géologie, Université de Berne, et Office fédéral des eaux et de la géologie.



- N° 42 **Sabine JAQUET** (2013) : Identité, projet, changement : des représentations sociales aux leviers de l'action publique. Pour un mode de gouvernance axé sur le développement territorial. Etude de cas : canton du Jura (Suisse). Lausanne : Université, Institut de géographie et durabilité. 248 pages.
- N° 41 **Simon MARTIN** (2013) : Valoriser le géopatrimoine par la médiation indirecte et la visualisation des objets géomorphologiques. Lausanne : Université, Institut de géographie et durabilité. 273 pages.
- N° 40 **Cristian SCAPOZZA** (2013) : Stratigraphie, morphodynamique, paléoenvironnements des terrains sédimentaires meubles à forte déclivité du domaine périglaciaire alpin. Lausanne : Université, Institut de géographie et durabilité. 551 pages.
- N° 39 **Philippe HERTIG** (2012) : Didactique de la géographie et formation initiale des enseignants spécialistes. Conception et première évaluation du nouveau dispositif de formation initiale des enseignants de géographie du Secondaire supérieur à la HEP Vaud. Lausanne : Université, Institut de géographie. 260 pages.
- N° 38 **Géraldine REGOLINI** (2012) : Cartographier les géomorphosites. Objectifs, publics et propositions méthodologiques. Lausanne : Université, Institut de géographie. 294 pages.
- N° 37 **Emmanuel REYNARD, Laetitia LAIGRE, Nicolas KRAMAR** (eds) (2011) : Les géosciences au service de la société. Actes du colloque organisé en l'honneur du Professeur Michel Marthaler, 24-26 juin 2010, Lausanne. Lausanne : Université, Institut de géographie. 262 pages.
- N° 36 **Christophe LAMBIEL, Emmanuel REYNARD, Cristian SCAPOZZA** (eds) (2011) : La géomorphologie alpine: entre patrimoine et contrainte. Actes du colloque de la Société Suisse de Géomorphologie, 3-5 septembre 2009, Olivone. Lausanne : Université, Institut de géographie. 273 pages.
- N° 35 **Géraldine REGOLINI-BISSIG, Emmanuel REYNARD** (eds) (2010) : Mapping Geoheritage, 127 pages.
- N° 34 **Lawali DAMBO** (2007) : Usages de l'eau à Gaya (Niger) : entre fortes potentialités et contraintes majeures. Thèse de doctorat, 354 pages. Version couleur sur CD-ROM annexé.
- N° 33 **Christophe LAMBIEL** (2006) : Le pergélisol dans les terrains sédimentaires à forte déclivité : distribution, régime thermique et instabilités. Thèse de doctorat, 260 pages.
- N° 32 **Jean-Pierre PRALONG** (2006) : Géotourisme et utilisation des sites naturels d'intérêt pour les sciences de la Terre : les régions de Crans-Montana-Sierre (Valais, Alpes suisses) et Chamonix-Mont-Blanc (Haute-Savoie, Alpes françaises). Thèse de doctorat, 224 pages.



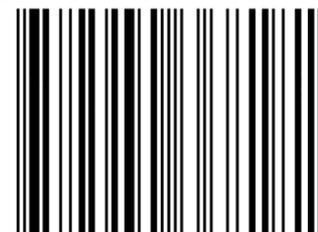
UNIL | Université de Lausanne

Institut de géographie
et durabilité

Quartier - Mouline
Géopolis
CH-1015 Lausanne

www.unil.ch/igd

ISBN 978-2-940368-18-1



9 782940 368181 >