



UNIL | Université de Lausanne

Unicentre

CH-1015 Lausanne

<http://serval.unil.ch>

Year : 2013

Neige artificielle et ressource en eau en moyenne montagne :
impacts sur l'hydrosystème. Les exemples d' Avoriaz (France)
et de Champéry (Suisse)

MAGNIER Elodie

MAGNIER Elodie, 2013, Neige artificielle et ressource en eau en moyenne montagne :
impacts sur l'hydrosystème. Les exemples d' Avoriaz (France) et de Champéry (Suisse)

Originally published at : Thesis, University of Lausanne

Posted at the University of Lausanne Open Archive.
<http://serval.unil.ch>

Droits d'auteur

L'Université de Lausanne attire expressément l'attention des utilisateurs sur le fait que tous les documents publiés dans l'Archive SERVAL sont protégés par le droit d'auteur, conformément à la loi fédérale sur le droit d'auteur et les droits voisins (LDA). A ce titre, il est indispensable d'obtenir le consentement préalable de l'auteur et/ou de l'éditeur avant toute utilisation d'une oeuvre ou d'une partie d'une oeuvre ne relevant pas d'une utilisation à des fins personnelles au sens de la LDA (art. 19, al. 1 lettre a). A défaut, tout contrevenant s'expose aux sanctions prévues par cette loi. Nous déclinons toute responsabilité en la matière.

Copyright

The University of Lausanne expressly draws the attention of users to the fact that all documents published in the SERVAL Archive are protected by copyright in accordance with federal law on copyright and similar rights (LDA). Accordingly it is indispensable to obtain prior consent from the author and/or publisher before any use of a work or part of a work for purposes other than personal use within the meaning of LDA (art. 19, para. 1 letter a). Failure to do so will expose offenders to the sanctions laid down by this law. We accept no liability in this respect.



**UNIVERSITÉ PARIS-SORBONNE
UNIVERSITÉ DE LAUSANNE FACULTE DES
GEOSCIENCES ET DE L'ENVIRONNEMENT**

**Laboratoire de géographie physique CNRS / Institut de géographie et durabilité de
l'université de Lausanne**

**Neige artificielle et ressource en eau en moyenne
montagne : impacts sur l'hydrosystème.**

Les exemples d'Avoriaz (France) et de Champéry (Suisse)

Thèse de doctorat en cotutelle

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

Elodie MAGNIER

Diplômée en master géographie et environnement (Paris IV Sorbonne, France)

Jury

Prof. Jean-Pierre PEULVAST	Professeur émérite, Université Paris IV Sorbonne
Prof. Emmanuel REYNARD	Professeur ordinaire, Université de Lausanne thèse
Prof. Gilles ARNAUD-FASSETTA	Professeur, Paris-Diderot (Rapporteur)
Prof. Jean-Jacques DELANNOY	Professeur, Université de Savoie (Rapporteur)
Prof. Christian GIUSTI	Professeur, Université Paris IV Sorbonne (Président du jury)
Dr. Christophe LAMBIEL	Maître d'enseignement et de recherche, Université de Lausanne

Lausanne, 13 novembre 2013

IMPRIMATUR

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

Rapporteur externe :	M. le Professeur Gilles Arnaud-Fassetta
Rapporteur externe :	M. le Professeur Jean-Jacques Delannoy
Co-directeur de thèse :	M. le Professeur Emmanuel Reynard (UNIL)
Co-directeur de thèse :	M. le Professeur Jean-Pierre Peulvast (Paris IV)
Expert interne :	M. le Docteur Christophe Lambiel
Expert interne :	M. le Professeur Christian Giusti

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

Madame Elodie MAGNIER

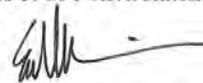
*Titulaire d'un Master de géographie
Université de Paris-Sorbonne/Paris IV*

Thèse effectuée dans le cadre d'une co-tutelle entre
l'Université Paris-Sorbonne (Paris IV) et l'Université de Lausanne (UNIL)
intitulée

**NEIGE ARTIFICIELLE ET RESSOURCE EN EAU EN MONTAGNE :
IMPACTS ET PROBLEMES ENVIRONNEMENTAUX. L'EXEMPLE
DES PREALPES DU NORD (FRANCE, SUISSE)**

Lausanne-Paris, le 13 novembre 2013

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



Professeur Eric Verrecchia, Vice-doyen





Photographie 1 : Piste du Grand-Paradis, Champéry, avril 2012

Photographie 2 : Canon monofluide sur la piste du Grand-Paradis, Champéry, avril 2012

Photographie 3 : Lac 1730, Avoriaz, printemps 2011

Photographie 4 : Canon bifluide sur la piste du retour Prodains, Avoriaz, printemps 2007

Ne verse pas une eau avant d'en avoir trouvé une autre.

Proverbe tibétain

C'est quand le puits est sec que l'eau devient richesse

Proverbe français

A mon grand-père.

REMERCIEMENTS

Mon travail de recherche, bien qu'étant un travail personnel, a été le fruit d'échanges de points de vue, de soutiens et d'aides aussi divers soient-ils de nombreuses personnes. Je souhaite remercier toute les personnes qui ont contribué à l'aboutissement de ma thèse.

Je remercie tout d'abord les membres du jury de thèse, d'avoir accepté de donner de leur temps pour évaluer ce travail : Professeur Gilles Arnaud-Fassetta (Université Paris-Diderot), Professeur Jean-Jacques Delannoy (Université de Savoie), Professeur Christian Giusti (Université Paris IV Sorbonne) et Christophe Lambiel, maître d'enseignement et de recherche (Université de Lausanne).

Mes remerciements vont également à mes deux directeurs de thèse, le professeur émérite Jean-Pierre Peulvast de l'Université de Paris IV, et le professeur et directeur de l'Institut de Géographie et Durabilité de Lausanne Emmanuel Reynard. Très disponibles, ils ont su m'aiguiller dans mes recherches et m'accompagner dans mes réflexions. Leur soutien au cours de nos nombreuses discussions m'a permis d'avancer et d'améliorer continuellement la qualité de mes réflexions et de mon travail. Très présents également dans mes démarches administratives ils ont toujours su porter mes demandes de financements et défendre mes objectifs auprès des différents acteurs. Ce fut un réel et sincère plaisir de collaborer avec eux pendant ces cinq années. Je tiens donc à leur adresser mes plus profonds remerciements.

Mes travaux ont bénéficié de deux financements. Un premier soutien sur trois années de recherche de la Société Eiffage TP. Dans cette recherche de financements, plusieurs personnes sont intervenues en ma faveur : Mr Lucien Vitre, directeur commercial, Mr Philippe Montel, directeur commercial et développement, Mr Bernard Marino, directeur d'exploitation, Mr Fabrice Roux et Mme Gina Tomasié. Ils ont cru en mes objectifs de recherches et à la pertinence de la question pour les années à venir. Je leur en suis particulièrement reconnaissante.

Un second soutien dans le cadre d'un appel à projet de la fondation Eau Neige et Glace sous l'égide de la Fondation de France pour une année. Merci à Serge Martinot le président de l'association. Dans ce cadre j'adresse un remerciement particulier à Yohann Taberlet, vice champion du monde de slalom 2011 handisport, mon parrain dans l'association et qui a porté avec dynamisme mon sujet.

Je ne saurais oublier mes collègues de l'institut de géographie de Paris IV et ceux de l'université de Lausanne. Je n'ai jamais hésité à les solliciter pour des questions particulières à la limite de mes compétences. Qu'ils soient chercheurs, maîtres de conférence, techniciens, ils ont soutenu mes travaux de près ou de loin : je voudrais remercier plus particulièrement pour Paris IV Guy Chemla, directeur de l'Institut de géographie, Vincent Moriniaux, Delphine Gramond, Olivier Milhaud. J'ai pu réaliser mes travaux dans le cadre de l'institut de géographie de Lausanne. Cette structure m'a permis de conduire mes recherches dans de bonnes conditions et m'a apporté un soutien financier pour instrumentaliser mon terrain afin d'améliorer mon étude et les résultats. J'adresse mes remerciements à toute l'équipe, en particulier à Daniela Balin qui n'a pas hésité à m'accompagner sur le terrain pour résoudre des problèmes techniques, à Jean-Michel Fallot, Christophe Lambiel et Manon Rosset. Leurs éclairages et leurs aides techniques, scientifiques et administratives m'ont souvent permis d'approfondir, voire de réorienter ma réflexion. Merci aux secrétaires de Paris

IV, Sylvaine Poulet et de Lausanne, Marcia Cruchod qui ont toujours répondu avec le sourire à mes questions administratives.

Ces recherches et les résultats auxquels elles ont abouti n'auraient bien évidemment pas été possibles sans les nombreux acteurs de mes terrains d'étude et l'ensemble des personnes sollicitées. Je voudrais remercier en premier lieu les administrations communales et services de l'Etat :

- Mr Gérard Berger, Maire de Morzine, qui a accepté l'installation de sonde sur la commune.
- Mr Guy Marullaz, du service technique de l'eau de la mairie de Morzine.
- Mr Michel Rosset du SIVOM (Syndicat intercommunal à vocations multiples) de la Vallée d'Aulps. Et Mme Racadot Marilyne, de la STEP du SIVOM de la vallée d'Aulps.

- Mr Georges Ribière, Chargé d'inspection générale et membre permanent du Conseil général de l'environnement et du développement durable au Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du Territoire. Co-auteur du rapport « Neige de culture. Etats des lieux et impacts environnementaux », il a trouvé le temps de me recevoir malgré son emploi du temps surchargé.
- Michel Badré, CGEDD – Président de l'autorité environnementale. Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du Territoire.

- Mme Claire Ratouis de la Direction Régionale de l'Environnement de la région Rhône-Alpes.

- Mr Jean-Philippe Vincent, service Prospective et Connaissance des Territoires / Cellule SIG à la Direction Départementale des Territoires de Haute-Savoie. Et Mr Mathieu Delille, Ingénieur de l'Agriculture et de l'Environnement, Direction Départementale des Territoires de Haute-Savoie, Service Eau Environnement.
- Mr Michel Denis, directeur des Sports, Tourisme, Montagne, et Mr Jean-Philippe Bois, Conseil général 74.
- Mr Thomas Martini, chargé d'études Zones humides, ASTERS, Conservatoire des espaces naturels de Haute-Savoie.
- Mr Philippe Michou, chargé de mission à la délégation montagne. Direction de l'Ingénierie et du Développement. Atout France.

J'aimerais également remercier les acteurs des stations de montagne et les acteurs de l'eau :

- Mr Patrick Mouillon, chef du secteur Avoriaz de la Lyonnaise des Eaux qui a toujours répondu à mes nombreuses sollicitations. Je souhaiterais également remercier Mr Christophe Rodrigues de La Lyonnaise des Eaux Avoriaz, Mr Dominique Claudel chef d'agence Haute-Savoie, ainsi que les nombreux techniciens que j'ai pu rencontrer.

- Mr Jean-Claude Morand, adjoint au directeur des pistes de la Société d'exploitation des Remontées Mécaniques de Morzine-Avoriaz.
- Mr Raymond Monay, directeur de Télé Champéry les Crosets SA
- Mr Jacques Nantermod, directeur de Télé Morgins SA
- Mr Loic Lepage de l'observatoire Savoie-Mont-Blanc Tourisme

J'adresse mes remerciements aux professionnels du tourisme des stations :

- Office du tourisme de Morzine-Avoriaz.

Je remercie également :

- Mr Jean Digonnet, ex maire de Tence, qui nous a quitté le 29 octobre 2012
- Michel et Catherine Coquillard de l'hôtel le Crêt à Morzine, pour leur soutien technique
- Arnaud Brun (Tenevia)
- Serge Riveill et Laurent Raynaud (SNTF)
- Stéphanie Gaucherand (CEMAGREF Grenoble)
- Jacques Proton, résident de la commune d'Avoriaz et membre de l'Association Avoriaz demain
- Davie Michel, Université de Tours
- Bernard Ligori, Société Techno Alpin

J'adresse un remerciement très particulier à Pierre Paccard, docteur ayant soutenu une thèse sur la gestion de l'eau et l'enneigement artificiel deux années avant moi. Nos discussions et nos échanges m'ont permis d'avancer, de réorienter mes recherches et d'améliorer mes travaux.

Mes collègues et amis doctorants de l'institut de géographie de Paris IV, Alexis, Marie-José, Clémence, et ceux de l'institut de géographie de Lausanne, Mariano, Jean-Baptiste et Lucien m'ont permis d'avancer grâce à de nombreux échanges et à une très bonne ambiance de travail. Mon amical salut va plus particulièrement à Delon Madavan, dont les échanges amicaux l'emportent sur les échanges professionnels et à Christian Bréthaut dont le thème de recherche porte sur la gestion institutionnelle de l'eau dans les stations de montagne et avec qui j'ai conduit plusieurs entretiens sur le terrain.

J'adresse également toute ma reconnaissance aux étudiants, qui ont contribué à m'aider dans ma formation au métier d'enseignante pendant ces cinq années.

Une pensée va également à mes amis qui m'ont soutenu et encouragé durant ces cinq années. Ils ont su m'apporter un regard extérieur au monde de la recherche. Mais c'est surtout l'équilibre qu'ils m'ont apporté qui a contribué à la réussite de ce projet. Un merci plus particulier à Jérémy, docteur en biologie et qui a été d'un grand soutien moral mais aussi technique.

Je souhaite terminer ces remerciements par ceux adressés à mes parents, qui ont non seulement contribué à me transmettre cette passion pour la montagne et la neige depuis mon plus jeune âge mais qui ont surtout supporté ces cinq années de recherches.

A tous, mes plus sincères remerciements.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	18
PARTIE 1 LES RESSOURCES EN EAU ET L'ENNEIGEMENT ARTIFICIEL D'UN TERRITOIRE DE MONTAGNE : CADRE THEORIQUE.....	26
Introduction partie 1.....	28
CHAPITRE 1. L'APPROCHE CONCEPTUELLE ET METHODOLOGIQUE DE LA RECHERCHE	30
CHAPITRE 2. L'ENNEIGEMENT ARTIFICIEL	78
CHAPITRE 3. LA ZONE D'ETUDE	144
CONCLUSION PARTIE 1	189
PARTIE 2 L'ENNEIGEMENT ARTIFICIEL : ATOUTS ECONOMIQUES ET IMPACTS HYDROLOGIQUES.....	191
INTRODUCTION PARTIE 2.....	193
CHAPITRE 4. LES USAGES DE L'EAU ET L'ENNEIGEMENT ARTIFICIEL DANS UN TERRITOIRE DE MOYENNE MONTAGNE	195
CHAPITRE 5. LES IMPACTS HYDROLOGIQUES LIES A L'UTILISATION DE L'ENNEIGEMENT ARTIFICIEL	219
CHAPITRE 6. DISCUSSION DES RESULTATS	253
CONCLUSION PARTIE 2	295
CONCLUSION GENERALE	301
Liste des abréviations.....	311
Table des matières.....	317
Liste des figures	325
Bibliographie	333
Annexes.....	370

INTRODUCTION GENERALE

Développement touristique et pratique de l'enneigement

Dans la première partie du XIX^{ème} siècle, le tourisme en montagne se concentrait presque exclusivement en saison estivale. Avec l'organisation par le Club Alpin Français des premiers concours internationaux de ski, en 1907 à Montgenèvre et en 1908 à Chamonix, la pratique du ski deviendra peu à peu un véritable phénomène social. Mais c'est bien le tourisme et non le ski qui a présidé à la naissance des premières stations. Ainsi, d'anciens villages se transforment en stations, comme le village de Morzine ou celui des Gets en France, mais encore Champéry et Montana en Suisse. Ce sont les stations dites de première génération. Ces stations sont généralement situées à des altitudes inférieures à 1200 m. De nouvelles stations se sont créées ex-nihilo au niveau des alpages (altitudes comprises entre 1600 et 1800 m), par exemple les stations de Courchevel ou Des Deux Alpes. Dans les années 1950-1960, de grands projets d'aménagement des montagnes naissent, et de grandes installations de remontées mécaniques font leur apparition. L'essor du tourisme de « masse » dans les années 1960 pousse les promoteurs à proposer de nouvelles offres touristiques ; ce sont les stations intégrées de 3^{ème} génération, comme Le Corbier, Les Menuires en France, et Thyon 2000 en Suisse. Certaines stations poussent même le modèle encore plus loin en proposant une offre tout ski, où la circulation des voitures dans la station est interdite, comme Avoriaz, La Tania, 100 % piétonnes en France et Wengen et Riederalp en Suisse (Knafou, 2004 ; Dérioz et Bachimon 2009). La France possède la plus grande superficie des domaines skiables européens (28 %) juste devant la Suisse (20 %). En termes de fréquentation touristique, la France occupe là encore la première place avec 54,6 millions de journées skieurs en 2007/2008 contre 28,7 millions pour la Suisse (Vanat, 2008). Cette offre touristique n'a cessé de se développer et ne cesse de croître.

Aujourd'hui rares sont les stations qui ne possèdent pas au moins un canon à neige. La production de neige est un système qui s'est fortement banalisé ces dernières années et fait partie intégrante de l'offre de ski proposée par les stations. La production de neige consiste à prélever de l'eau selon différents modes d'approvisionnement (eau potable, retenue collinaire, cours d'eau...) et de pulvériser cette eau dans un air froid. Les cristaux ainsi produits se déposent aux pieds des canons et sont ensuite étalés sur les pistes progressivement par les dameuses. La France n'est pas la destination qui possède le plus de surfaces enneigées artificiellement (23 % du domaine skiable contre 33 % en Suisse et 59 % en Autriche, ODI France, 2009). Ces valeurs donnent une information sur la place de l'enneigement dans le tourisme hivernal et l'activité ski des stations de montagne.

La ressource en eau, entre abondance et pénurie

Pendant longtemps, la ressource en eau a été considérée comme inépuisable, les régions de montagne étant souvent assimilées aux châteaux d'eau des plaines environnantes. L'évaluation de la ressource a donc souvent été mise de côté dans les choix d'aménagement des stations. Mais depuis quelques temps, des situations de pénurie apparaissent. Ainsi, en Haute-Savoie, des stations ont été confrontées à ce manque d'eau et ont dû faire appel à des camions citernes pour l'approvisionnement en eau potable ; ce fut le cas aux Gets en 2006. Ces pénuries d'eau sont potentiellement le résultat du développement touristique des stations et des choix réalisés par celles-ci. La situation est paradoxale puisque la ressource est considérée comme inépuisable et se renouvelle constamment mais que parallèlement des situations de pénurie existent. Les questions liées à la problématique de manque d'eau se posent surtout depuis l'essor de la production de neige il y a quelques années. En effet, auparavant les stations de montagne développaient moins d'activités autour de la ressource. Depuis l'essor du tourisme de neige et l'augmentation de la population, le poids des différentes activités augmente sur la ressource en eau. Ainsi, la consommation d'eau observée sur la saison 1999-2000, pour les 119 stations équipées du bassin Rhône Méditerranée et Corse, est de 10 millions de m³. Ce volume représente 19 % du volume annuel prélevé par les collectivités correspondantes, pour leur usage d'eau potable (EuroRiob, 2006). Mais l'approvisionnement en eau dépend d'un certain équilibre entre l'environnement, la technique, les activités socio-économiques et les aspects politiques. Si cet équilibre est rompu et que la ressource est insuffisante pour satisfaire tous les usages, des situations de conflits peuvent se produire.

La gestion de l'eau et le développement touristique

La gestion de l'eau est essentielle en particulier dans les régions de montagne où les nombreuses activités prélèvent dans cette ressource parfois sur de courtes périodes (en saison hivernale principalement). Dans le cadre de la production de neige, la gestion de l'eau doit pouvoir concilier la production avec le milieu naturel et l'approvisionnement des autres usages. La gestion doit donc intégrer l'offre et la demande, la ressource et les usages. Pour cela, un état des lieux est nécessaire pour établir le poids des différentes activités et en particulier de la production de neige sur la ressource en eau et les hydrosystèmes à différentes échelles spatiales. Au cours des dernières années, l'échelle du bassin versant est devenue une référence en matière d'analyse des hydrosystèmes. Même si elle peut paraître la plus pertinente car présentée comme « naturelle » et, par conséquent, comme une échelle rationnelle mieux adaptée aux contraintes et aux besoins écologiques, ce n'est pas toujours le choix le plus adapté. En effet, certaines pratiques de gestion

montrent que dans de nombreux cas – aux Etats Unis, en Europe, en Afrique ou en Asie –, les transferts d'eau entre bassins sont nombreux (Graefe, 2013). La gestion s'organise aujourd'hui à divers échelons administratifs (local, régional, cantonal, national...) qui ne correspondent que rarement au bassin versant naturel. Sur le plan des réglementations, une série de structures et d'instruments administratifs réglemente les prélèvements d'eau. Mais les nombreuses activités d'une station de montagne compliquent cette gestion à l'échelon local. La production de neige est généralement gérée par les sociétés de remontées mécaniques. L'eau potable peut être régie par la commune ou des sociétés privées. La production d'énergie hydroélectrique est aussi gérée par des sociétés privées ou semi-privées. La multifonctionnalité de la ressource et les nombreux échelons administratifs compliquent la gestion.

Le questionnement général

La gestion de l'eau en montagne est un défi majeur au XXème siècle. C'est un sujet d'actualité dans lequel la production de neige tient une place importante.

De nombreuses publications dans les magazines, les revues des associations de protection de la nature ou la presse locale et nationale accusent la production de neige d'avoir un certain nombre d'impacts sur l'eau en montagne (Cabret, 2004 ; *Le Messenger du Chablais*, 2007 ; Le Hir, 2008). Ainsi, on peut citer l'exemple de Mountain Wilderness, association de protection de l'environnement de montagne, qui publie régulièrement des rapports sur la neige et ses impacts : « la quête de l'or blanc » (Caviglia et al., 2004) ; « Enneigement artificiel : Eau secours ! » (Mountain Wilderness, 2005).

Face à ces nombreuses controverses, le Ministère du développement durable a commandé un rapport sur l'état des lieux et les impacts environnementaux de la neige de culture (Badré et al., 2009). Il y mentionne un certain nombre de recommandations pour une meilleure gestion de la ressource dans les années à venir, notamment dans un contexte de changement climatique :

« La question de l'avenir des stations de petites ou moyennes altitudes est posée, sous le double effet des évolutions de la demande touristique, et du changement climatique » (Badré et al., 2009).

Les questions soulevées sur la production de neige sont nombreuses. D'un point de vue de la ressource en eau, la production de neige a-t-elle un impact conséquent sur la ressource globale ? Est-elle responsable de situations de pénuries ? En termes de besoin/ressource, la part imputable à la production de neige est-elle problématique vis à vis des autres usages ? Des situations de conflits entre ces différents usages sont elles possibles ? A l'échelle du bassin versant, modifie-t-elle le fonctionnement de l'hydrosystème ? Peut-elle entraîner une baisse du débit à l'aval, et modifier le régime hydrologique ? Ces impacts sont-ils acceptables ou non ? D'un point de vue

réglementaire, l'encadrement est-il suffisant ? Enfin, le système actuel est-il viable pour les années à venir ?

En abordant les questions soulevées dans un souci d'objectivité, nous souhaitons répondre aux interrogations actuelles et contribuer à la recherche de solutions.

La question générale qui motive notre recherche est la suivante :

La question est de savoir si la production de neige a des impacts sur la ressource en eau et l'hydrosystème et si ces impacts sont acceptables ou non. En effet, il s'agit d'évaluer le système actuel de production de neige et d'observer ses implications sur la gestion de la ressource et notamment avec les autres usages d'une station de montagne ainsi que sur le fonctionnement de l'hydrosystème.

Notre travail se situe à l'interface entre les sciences de l'environnement, physiques, humaines et sociales. Il s'agit d'un travail interdisciplinaire. En effet, l'étude du système de production de neige nécessite une démarche d'analyse très large du géosystème montagnard. La production de neige sert à améliorer l'offre touristique dans un contexte de variations interannuelles des conditions climatiques (températures, enneigements, précipitations...). Mais elle dépend fortement de ces conditions climatiques. Elle est de plus associée à de profondes modifications du milieu (passage d'engins, terrassement des pistes, passage de canalisations...). Ces modifications impactent non seulement le sol et le sous-sol mais également l'écosystème dans sa globalité. Mais le facteur essentiel est la ressource en eau disponible utilisée pour la fabrication de neige et qui paradoxalement peut en contraindre la production. Pourtant, la neige artificielle est un outil au service du tourisme hivernal, elle en assure la viabilité même si de nombreuses questions peuvent être soulevées dans les années à venir dans un contexte de changement climatique.

Cette recherche a donc pour objectif d'analyser le système de production de neige au sein des espaces de montagne et en lien avec les éléments physiques naturels, sans occulter le rôle de l'homme et ses implications.

Etat des connaissances

Cette étude touche à deux domaines : la production de neige de culture et la gestion de la ressource en eau. La gestion de la ressource a fait l'objet de nombreuses études alors que la production de neige est une pratique relativement récente et les analyses sont encore rares. Nous posons ici les principaux travaux réalisés et qui ont orienté nos recherches dès le départ.

Les premières recherches réalisées sur la production de neige concernaient principalement ses impacts sur l'environnement et la végétation (Dinger et Dubost, 1995 ; Rixen et al., 2002, 2003, 2004 ; Pröbstl, 2006). Plusieurs études ont

également été menées sur les impacts sur l'eau, à l'échelle de stations (pour la Suisse, Reynard, 2000a) ou dans le cadre de bassins versants de montagne (Le bassin Rhône Méditerranée et Corse, Campion, 2002 ; Dugleux, 2002). Ces études concluent à une absence d'impact mais mentionnent la difficulté pour obtenir des données précises à l'échelle locale des stations et à l'échelle journalière et mensuelle. Une note socio-économique du Ministère de l'économie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire (MEEDDAT) explique la difficulté à obtenir des données fiables sur l'impact des prélèvements et insiste sur la nécessité de renforcer les dispositifs de comptabilisation des volumes d'eau prélevés :

« Recommandation n°1 - Suivi des volumes d'eau prélevés - La mission recommande à la Direction de l'eau et de la biodiversité (DEB) : de faire effectivement appliquer les arrêtés du 11 septembre 2003 qui imposent la mesure ou l'évaluation des volumes prélevés dans la ressource en eau et la transmission des résultats au Préfet, cela en commençant par les zones de tension potentielle incluant les stations de ski équipées d'enneigeurs ; de mettre en place un dispositif de télé déclaration annuelle des volumes prélevés. » (Badré et al, 2009).

Plus récemment, P. Paccard (2010) dans le cadre de sa thèse intitulée Gestion durable de l'eau en montagne, a mené une étude à l'échelle de trois stations de Savoie et Haute-Savoie (Orcières-Merlette, Villard-de-Lans-Corrençon-en-Vercors et Courchevel-La Tania). En conclusion de ces recherches, il souligne la nécessité de réaliser des mesures à une échelle plus fine des têtes de bassin versant :

« Il importe de souligner l'indigence des données et des recherches sur la ressource en eau aux échelles qui nous intéressent ici : celles des têtes de bassin. En cette absence tout peut être dit et son contraire ».

C'est sur ces lacunes de données que nous nous sommes focalisées.

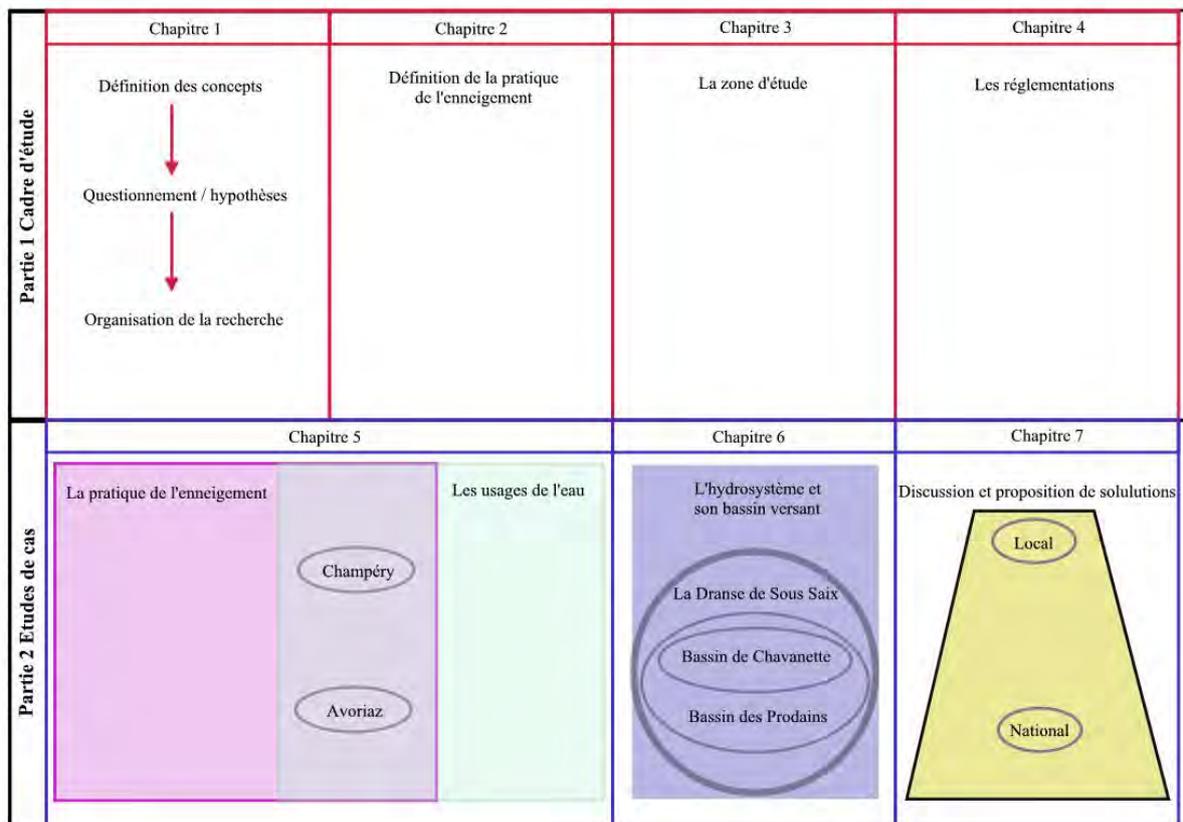
Plan de la recherche

Pour répondre à ce questionnement, notre recherche s'organise en deux temps (Fig. 1).

Dans un premier temps, nous dresserons le cadre théorique de la recherche (Chapitre 1). Nous définirons ainsi les concepts et le contexte actuel de la production de neige, puis nous expliquerons les hypothèses de départ fondées sur un socle bibliographique. Les orientations données à notre travail seront également expliquées. Après avoir défini le cadre de la recherche, nous définirons la pratique de l'enneigement, ses enjeux et les conditions de production. Pour cerner les limites de la production de neige à différentes échelles, nous poserons le cadre législatif de la pratique (Chapitre 2). Nous présenterons ensuite la zone d'étude et les stations choisies (Chapitre 3).

Dans un second temps, nous changerons d'échelle pour nous intéresser aux deux stations de montagne étudiées. Nous mettrons en évidence pour ces stations, les impacts de la production de neige sur l'eau à deux niveaux d'étude. Nous observerons la pratique de l'enneigement et les interactions avec les autres usages à l'échelle des stations (Chapitre 4). Puis, nous nous intéresserons aux impacts de la pratique sur le fonctionnement de l'hydrosystème à l'échelle du bassin versant (Chapitre 5). Enfin, nous mettrons en perspective les résultats de notre recherche au regard de la problématique et des hypothèses de départ (Chapitre 6). Et nous proposerons des solutions d'adaptation à une augmentation certaine de la production de neige dans les années à venir.

Figure. 1 Représentation de l'organisation de la recherche et du plan de thèse.



**PARTIE 1 LES RESSOURCES EN EAU ET L'ENNEIGEMENT
ARTIFICIEL D'UN TERRITOIRE DE MONTAGNE : CADRE
THEORIQUE**

**« La gestion de l'équilibre entre la demande en eau et la ressource disponible est un enjeu central du débat mondial sur la gestion de l'eau. Pour autant, cet enjeu d'équilibrage ne se joue pas, aujourd'hui, à l'échelle du globe, comme c'est largement le cas pour l'énergie. Même si les transferts d'eau entre régions ou pays voisins se développent, l'enjeu de l'eau est largement territorialisé. »
(Mermet et Trayer, 2001)**

Introduction partie 1

Cette première partie pose le cadre de la recherche. Quatre objectifs principaux constituent la base de la réflexion : définir les concepts et les hypothèses de départ, expliquer la méthodologie, décrire et expliquer la pratique de l'enneigement et préciser le cadre de l'étude.

La problématique de la recherche est la suivante : quels sont les impacts de la production de neige sur un hydrosystème de moyenne montagne? Ce questionnement a été défini au terme d'un état des lieux et de recherches bibliographiques. Avant de présenter la méthodologie et les résultats acquis sur le terrain, nous définirons les termes de notre sujet d'étude. Ces concepts poseront le cadre de notre réflexion. Nous émettrons les hypothèses de recherche. Notre but est de démentir ou de confirmer ces éléments et ainsi de définir concrètement par l'appui de données scientifiques l'implication de la neige de culture sur l'hydrosystème et son fonctionnement. La méthodologie sera définie. Elle a été établie pour pouvoir obtenir les informations nécessaires à la résolution du questionnement de départ. Cette étude est menée à deux échelles spatiales distinctes et pourtant indissociables. La première échelle d'étude est celle de la station de ski et la seconde échelle spatiale est celle du bassin versant hydrologique.

Une fois le cadre théorique posé, notre attention s'est portée sur la pratique de la production de neige. La pratique est définie selon les éléments d'étude : le développement de la pratique, l'évolution au cours du temps et les conditions de production.

L'historique du développement de la pratique nous permettra de montrer que cette pratique souvent définie comme un nouvel usage n'est pas si récente au regard du développement de l'activité ski dans les stations. En revanche, les techniques évoluent très rapidement. Les stations équipées et les surfaces de pistes enneigées ne cessent de croître. Nous montrerons cette évolution dans le cadre de l'arc alpin, puis de la France et de la Suisse, en y intégrant quelques éléments de comparaison avec d'autres pays. Facteur d'influence, la variabilité climatique interannuelle a contribué à développer l'enneigement mécanique. D'autres facteurs ont également participé à cette rapide évolution, comme le développement touristique et le développement spatial des domaines skiables. L'évolution dans les années à venir sera également prise en compte avec le changement climatique, notion indissociable à celle de ressource en eau.

Nous définirons ensuite le cadre spatial de la recherche. Cette étude porte sur un domaine transfrontalier, nous incitant à la comparaison des pratiques liées à l'enneigement. Les deux stations d'étude sont celles d'Avoriaz en France et de Champéry en Suisse. Le cadre de l'étude est double. La première partie des recherches confrontée à des entretiens avec les acteurs des stations de ski portera

sur le cadre spatial de la station. Cette première partie de l'étude aura pour objectif d'analyser l'implication de la production de neige sur la ressource en eau. La seconde partie des recherches sera menée dans le cadre du bassin versant avec pour objectif cette fois-ci une analyse des implications de la production de neige sur le fonctionnement de l'hydrosystème. Enfin nous terminerons cette première partie par un état des lieux des réglementations et des lois françaises et suisses encadrant cette pratique. Ce cadre concerne plus particulièrement les prélèvements d'eau. L'objectif est de nous permettre de cerner les limites de ces réglementations afin de proposer des actions concrètes pour améliorer le système.

Tous ces éléments doivent nous permettre d'améliorer nos connaissances sur la production de neige et ainsi de pouvoir répondre de manière précise et objective aux hypothèses et à la problématique de départ.

CHAPITRE 1. L'APPROCHE CONCEPTUELLE ET METHODOLOGIQUE DE LA RECHERCHE

Introduction chapitre 1

Ce chapitre a pour objectif dans un premier temps, de définir les concepts et les termes utilisés pour répondre à la problématique de départ : enneigement mécanique, concept de ressource, hydrosystème, gestion, territoire de montagne. Ces notions nous permettent d'établir le cadre de la recherche. Les objectifs de l'étude et le choix du sujet seront définis. Cette étude repose sur les controverses relayées par les médias et souvent menées par les associations de protection de l'environnement. Ces différents propos nous ont permis de constituer les hypothèses de départ que nous définirons. Elles seront vérifiées par notre travail de recherche pour être affirmées ou infirmées. La méthodologie vise à obtenir les informations nécessaires pour répondre de manière précise et objective à ce manque de connaissance actuelle. Les biais relatifs au manque de données et à la difficulté de les obtenir seront décrits dans une deuxième et dernière partie. Le manque de données nous conduira à un double travail de recherche, par des entretiens et des enquêtes auprès des différents acteurs dans un premier temps, puis dans un second temps par des mesures et des relevés sur le terrain.

1.1 LES ENJEUX ACTUELS DE L'ENNEIGEMENT ARTIFICIEL

Les publications et les travaux de recherche sont nombreux sur la pratique de l'enneigement artificiel (Reynard, 2000a ; Campion, 2002 ; Badré et al., 2009 ; Paccard, 2010...). Il ne s'agit pas ici d'en faire un relevé exhaustif mais plutôt de dresser un bilan et de mettre en avant les enjeux autour de la production de neige.

La neige artificielle est une pratique qui fait débat et qui oppose d'un côté les associations de protection de l'environnement et de l'autre, les gestionnaires de station. On peut citer en exemple les campagnes d'information du SNTF (2009) qui ont pour objectif de répondre aux accusations des médias. Ces débats sont fréquemment repris par les médias. Ainsi dans le journal L'Express du 12 avril 2004 (Biais, 2008), la question de l'interdiction des canons est posée. La question est posée en premier lieu au Maire de Chamrousse et Président de Ski France, Jacques Guillot, qui répond « c'est la seule façon d'assurer la rentabilité des stations ». Puis, Jean-Yves Vallat, Vice-président de la Fédération de la Savoie pour la pêche et la protection du milieu aquatique, y répond à son tour : « les montagnes ne sont pas des châteaux d'eau ! ». Certains de ces écrits ont parfois tendance à forcer le trait dans la présentation des différentes parties prenantes. Nous commencerons par citer quelques exemples repris dans la presse nationale et locale.

1.1.1 Les « accusateurs » de la neige artificielle

Dans la presse généraliste, de nombreux articles sur la neige de culture ont paru. A titre d'exemple, on peut citer : le journal *Libération* qui publie le 25 février 2004 un article intitulé « La poudreuse artificielle pas vraiment blanche comme neige ». Cet article dénonce une consommation d'eau importante en hiver ayant un impact non négligeable sur la ressource et la circulation de l'eau en montagne. Il dénonce également la volonté des opérateurs de domaine de cacher ces impacts : « Ne dites plus «neige artificielle» mais «neige de culture». Le dictionnaire des exploitants de domaines skiables s'est enrichi de tournures plus «vertes», histoire de faire oublier l'impact grandissant de leur industrie sur l'environnement » (Carrel, 2004). D'autres journaux et revues ont également publié de nombreux articles : « Les additifs ajoutés à l'eau des canons à neige artificielle favorisent la pollution des sols » dans *Le Monde* du samedi 24 avril 2004 (Cabret, 2004) ; « La neige de culture pèse sur l'eau et la biodiversité », *Le Monde* du 28 décembre 2008 (Le Hir, 2008) ; « La montagne victime des sports d'hiver » dans *Le Monde diplomatique* de février 2008 (Descamps, 2008.) ; « Les canons à neige dessèchent-ils les Alpes ? » dans *Le Matin* (Fingal, 2007). En Suisse le journal *La Liberté* du 19 avril 2007, quotidien suisse romand publie : « les canons à neige menaceraient les Alpes » (*La Liberté*, 2007). Cet article indique que dans les Alpes françaises, le niveau des rivières a baissé de 70 % par rapport aux années d'avant les canons à neige.

La presse spécialisée sur les milieux naturels et les milieux de montagne s'empare également du sujet. La revue *La Montagne et Alpinisme* de janvier 2003 publie un article intitulé « Neige éternelle ? La neige artificielle en question » (Lardreau, 2003). La revue *Géo* consacre en mars 2005 quelques pages sur les montagnes en danger, « Attention à nos montagnes » (Falkehed, 2005). La production de neige y tient une part importante de responsabilité. Le magazine *Notre Planète* du 30 janvier 2008 titre « L'additif SNOMAX™ améliore le rendement des canons à neige mais à quel prix ? » (Tavernier, 2008.). On peut également citer : « La production de neige artificielle détériorerait l'eau des Alpes » dans *Le Journal de l'environnement* (Avignon, 2007).

Des associations spécialisées dans la protection de la nature et des milieux de montagne s'attaquent fréquemment au système de production de neige et en font un combat permanent. Pour n'en citer qu'une, Mountain Wilderness publie régulièrement des brochures mettant en avant les impacts de la production de neige sur les espaces de montagne. On peut citer pour exemple, « Enneigement artificiel : Eau secours ! » (Mountain Wilderness, 2005) et « Canon à neige, au secours ! » (Neirinck, 2004).

Enfin à l'échelle des Alpes, la presse locale est riche d'articles. On recense une dizaine d'articles du *Dauphiné Libéré* entre 2007 et 2010 portant sur la neige artificielle. Pour exemple, citons « Agriculture contre neige de culture » du 6 novembre 2007 (Casanova, 2007) ; « Neige de culture l'enquête qui dérange » du 26 octobre 2009 (Leleu, 2009), « Neige artificielle : ce que pensent les associations de protection de la nature » du 22 janvier 2010 (Rédaction du Dauphiné, 2010)... La revue *Nature et patrimoine en pays de Savoie* a consacré une publication aux enneigeurs : « L'avenir des stations est-il assuré par les enneigeurs ? Quels problèmes pose leur utilisation ? » (Pajeot, 2007). Enfin dans *Le Chablais*, notre secteur d'étude, le *Messenger* publie un article sur « Les conséquences financières et écologiques de la fabrication de neige artificielle » (Rouxel, 2012).

Dans le massif du Chablais, un collectif « vieille, montagne » s'est créé en 2010 en opposition à l'installation de canons à neige et à la construction d'une retenue collinaire sur la commune de Mieussy (Haute-Savoie). Plusieurs manifestations ont eu lieu ainsi que des publications dans lesquelles les termes employés sont particulièrement percutants : « la fausse neige nous prend pour des flocons », « Elle creuse dans la montagne et dans les budgets des trous bien réels », « Boire ou skier, il faut choisir » (Canardeau, 2010). Le maire a donné suite aux investissements.

Tous ces articles et revues mettent en avant plusieurs impacts de la production de neige que l'on peut résumer comme suit :

- Une diminution de la ressource en eau
- Une modification importante des écoulements
- Un impact sur la faune et la flore
- Des additifs dangereux pour l'environnement
- Des installations qui modifient la topographie des pistes.

La problématique du réchauffement climatique y occupe également une place majeure. Mais la plupart de ces articles ont tendance à forcer le trait. Les titres sont souvent percutants et le vocabulaire employé est alarmiste : « menacer, détériorer, dessécher, irrémédiable... »).

1.1.2 Les « défenseurs » de la neige artificielle

Face à ces associations qui condamnent la neige pour des raisons environnementales et écologiques, les opérateurs de domaine skiable mettent en avant les logiques économiques. Dans un contexte actuel de concurrence entre les stations de ski et de changement climatique, la production de neige est indispensable au fonctionnement des stations. Ils mettent en avant l'aspect naturel de la neige fabriquée qui n'est autre qu'un mélange d'eau et d'air. Ainsi, le SNTF insiste sur le « déficit d'image duquel souffre la neige de culture lié pour l'essentiel à une sous information » (SNTF, 2008). Plusieurs campagnes d'information ont été menées à l'intention du grand public dès 2008.

Les opérateurs et leurs chambres syndicales mettent en avant la nécessité d'enneiger. Le choix des termes utilisés justifie cette volonté : « emprunter de l'eau à la nature » ; « bénéfiques » ; « bon déroulement de la saison » ; « cristal »... (SEPIA Conseil, 2009 ; SNTF, 2008a et 2008b ; SNTF, 2009). Les exigences de gestion et d'exploitation d'un domaine skiable sont mises en avant, notamment par les responsables de stations (Batard et Tichet, 2010). Ainsi Ski info, site d'information publicitaire pour les stations de sports d'hiver, publie un article intitulé « La neige de culture qui fait vivre les stations » (Harneis, 2011). En France, l'Association Nationale des Professionnels de la Neige de Culture (NPNC) a été créée il y a une vingtaine d'années. Elle rassemble aujourd'hui près de 200 nivoculteurs en France. Dominique Roche, nivoculteur et correspondant de l'ANPNC des Alpes du Sud explique que la neige de culture est indispensable. Les années sans neige, elle a sauvé l'ouverture de stations comme celle d'Isola 2000 (Roche, 2013).

Le sujet de l'enneigement artificiel est aujourd'hui très médiatisé. Mais il est important, dans ce contexte polémique, de prendre du recul et de garder un jugement critique sur tous ces écrits. Si les débats sont aussi nombreux, la cause principale peut-être un manque d'information. Le manque d'information, source de

conflits, dans ce domaine, a souvent été déploré par Charles Farauto, président du SNTF :

« L'absence d'informations claires et accessibles sur ce sujet constitue aujourd'hui le socle de croyances erronées, d'a priori négatifs qui peuvent à terme nuire à l'image des stations de montagne et impacter leur vitalité économique ». (Les talents insoupçonnés de la neige de culture. SNTF, hiver 2008a).

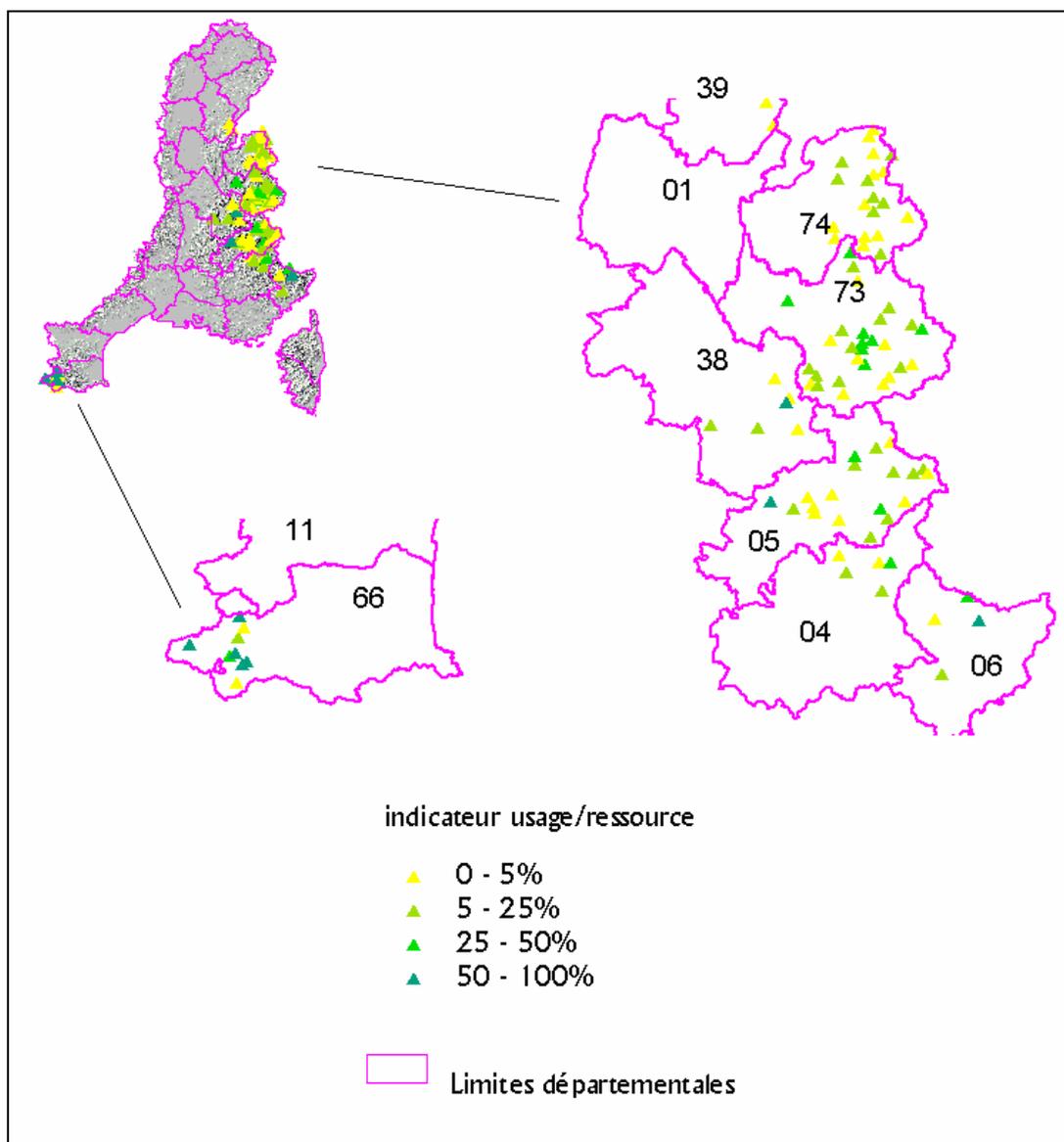
1.1.3 Les études scientifiques

De plus, peu d'études ont été réalisées sur les impacts de la production de neige. Finalement, en reprenant point par point les impacts de la production de neige mis en avant par ses détracteurs, on se rend rapidement compte que la plupart de ces accusations sont infondées.

Premiers arguments mis en avant : les problèmes liés à la ressource en eau. En 1995, une première étude voit le jour, intitulée « Impacts des installations de neige de culture sur l'environnement » (Dinger et Dubost, 1995). En termes de ressource, d'un point de vue quantitatif et qualitatif, cette étude précise que la production de neige nécessite de grands volumes d'eau au moment des étiages hivernaux. Les auteurs insistent sur l'importance de maintenir un débit minimum dans les cours d'eau. D'un point de vue qualitatif, une attention particulière doit être portée sur la qualité de l'eau utilisée.

A une échelle d'étude plus restreinte plusieurs études peuvent être mentionnées. A l'échelle du Bassin Rhône Méditerranée et Corse, un inventaire des équipements existants sur le bassin versant et une évaluation de leurs impacts en matière de prélèvements d'eau ont été réalisés (Campion, 2002 et Dugleux, 2002). Ces études montrent que dans l'état actuel, la situation n'est pas alarmante d'un point de vue quantitatif pour la ressource. Les volumes prélevés restent généralement faibles et n'ont pas d'impacts sur les besoins des autres activités et les milieux à l'échelle d'une année. T. Campion a quand à lui défini un indicateur « Prélèvements/ressource » à l'étiage pour évaluer l'importance des prélèvements (Fig. 2). Ce calcul montre que la proportion représente moins de 10 % des volumes des cours d'eau à l'étiage.

Figure. 2 Résultats du ratio Prélèvements/Ressource sur le bassin Rhône Méditerranée et Corse pour la saison 2001-2002. (Source : Champion, 2002).



Plus récemment, Pierre Paccard (2010) propose une étude sur la gestion durable de l'eau en montagne dans le cas de la production de neige de trois stations des Alpes, Orcières-Merlette, Courchevel-La Tania et Villard-de-Lans-Corrençon-en-Vercors. Les résultats tempèrent fortement les accusations médiatiques puisque dans ces trois stations, les impacts sont faibles à l'échelle de bassins versants plus ou moins vastes et à l'échelle de la saison touristique. Les prélèvements sont particulièrement faibles par rapport au volume global de la ressource. L'auteur insiste également sur la bonne coordination des usages grâce au dialogue entre les différents acteurs concernés.

Les recherches conduites à l'étranger concluent sur ces mêmes résultats. Les recherches menées par E. Reynard (2000) en Suisse traitaient de la gestion intégrée des ressources à l'échelle de deux stations de montagne, Crans-Montana-Aminona et Nendaz, en Valais. Plusieurs conclusions sont importantes à retenir pour nos recherches. Tout d'abord les volumes concernés par les prélèvements pour la production de neige sont relativement bas au regard des volumes mis en jeu pour les autres usages. Mais de manière globale, la ressource est suffisante pour satisfaire l'ensemble des besoins. Enfin, il souligne le manque de transparence de la part des sociétés de remontées mécaniques, ce qui rend difficile l'amélioration des connaissances dans ce domaine. Une étude récente sur la région de Crans-Montana confirme ces résultats (Bonriposi et Reynard, 2012). Dans sa thèse intitulée « Analyse systémique et prospective des usages de l'eau dans la région de Crans-Montana-Sierre (Suisse) », M. Bonriposi (2013) consacre un volet sur l'usage de l'enneigement artificiel. Les résultats montrent que « 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 ». Les éventuels risques de conflits dans le futur seraient liés aux choix économiques faits par les exploitants de domaines.

Au Canada, Demers (2006), s'est plus particulièrement intéressé aux « impacts engendrés par la modification du régime hydrique, découlant de l'enneigement artificiel » sur le Mont-Oxford. Cette étude met en avant quelques modifications des régimes, avec un retard de fonte sans grandes conséquences aujourd'hui sur les systèmes hydriques. De manière générale, ces travaux mettent l'accent sur un manque de données et d'informations et sur les risques de gestion des ressources dans les années à venir.

A l'inverse de ces premiers résultats, plusieurs études réalisées par Carmen de Jong (De Jong, 2007, 2008, 2009 ; De Jong et al., 2007, 2008a, 2008b) montrent un impact important de la production de neige sur les hydrosystèmes de montagne. Selon l'auteure, la neige artificielle perturbe le cycle de l'eau. Dans les stations où l'eau est prélevée (dans les sources, les torrents, les nappes phréatiques, les bassins) pour être stockée dans des bassins en prévision de la production de neige artificielle, cela provoque un déficit local temporaire en eau. L'évaporation et les fuites lors du stockage dans les retenues collinaires, pendant la production, puis lors de la redistribution sur les pistes accentuent ce déficit (jusqu'à 30% d'eau perdue) (De Jong et al., 2008b). Le cycle de l'eau est perturbé principalement à l'échelle locale lorsque l'eau de fonte retourne aux écoulements de surface. La production de neige entraîne alors un surplus local d'eau augmentant de près de 30% les débits de crues et l'érosion associée (De Jong et al., 2008a).

Le second argument défendu est un impact sur le milieu naturel d'un point de vue topographique, faunistique et floristique. Sur ce sujet, les recherches sont nombreuses. On peut citer les recherches du CEMAGREF sur les impacts des installations de neige de culture sur l'environnement (Dinger et Dubost, 1995). Les

auteurs préconisent une attention particulière sur les zones écologiquement sensibles telles que les zones humides, même si la végétation semble peu affectée par la production de neige. Le raccourcissement de la période de végétation liée à une fonte tardive du manteau n'a pas pu être démontré.

C. Rixen, dans le cadre des travaux de l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), a mesuré l'impact de la neige de culture sur la végétation et les sols (Rixen et al., 2002 ; Rixen et al., 2003 Rixen et al., 2004a et 2004b). Il met en avant les travaux associés à la pratique de l'enneigement (terrassement, passage de canalisation...) qui contribuent à modifier la structure du sol. Quand à la végétation, ces résultats diffèrent de ceux de Dinger et Dubost, puisque les impacts sur la flore du retard de fonte ont pu être identifiés. Les compositions floristiques en sont affectées. Cependant, la neige aurait un effet de bouclier thermique protégeant le sol du gel durant la saison d'hiver, mais protégeant aussi la végétation contre le passage répété des engins. Mais dans ce contexte, la production de neige pourrait constituer une menace pour les zones écologiques fragiles peuplées d'espèces rares. La conclusion de ces recherches souligne l'intérêt de mener des études d'impacts sur le long terme. Tous ces points positifs et négatifs ont été repris par différentes études, dont celle de Keller (2004), qui s'est attachée à démontrer le rôle de la neige sur les propriétés thermiques du sol. Elle permet ainsi de limiter le refroidissement du sol en profondeur.

Là encore fortement contradictoires, les recherches menées par Teich et al. (2007) sur la production de neige et son contexte environnemental émettent la théorie d'une meilleure stabilisation du sol par des communautés végétales riches et variées.

Enfin, le rôle des additifs est très controversé. Les études dans ce domaine n'ont pu démontrer de façon claire et précise les impacts négatifs des additifs sur l'eau et le milieu naturel. On peut citer en exemple les travaux du CEMAGREF sur le Snowmax en 2004, l'additif le plus utilisé il y a quelques années, et les recherches de Dinger (2006) sur le Snowmax. Mais il faut préciser que ces additifs ne sont plus utilisés aujourd'hui dans les stations françaises et suisses.

L'ensemble de ces études a permis de mettre en avant deux freins à une bonne compréhension des impacts de la production de neige. Il s'agit d'une part de la difficulté à obtenir des informations et à collecter des données. D'autre part, les travaux réalisés à des échelles spatiales et temporelles plus fines manquent, en particulier à l'échelle d'études journalières et mensuelles sur un bassin versant de montagne. Tous ces résultats nous permettent de comprendre l'absence de fondement de certains articles et la vitalité des débats aujourd'hui sur la pratique de l'enneigement artificiel. Notre étude n'a pas pour prétention de répondre à toutes les interrogations et à calmer les tensions mais doit permettre d'apporter un regard nouveau sur cette pratique et ses implications sur l'hydrosystème.

Compte tenu des nombreuses interrogations qui subsistent autour de cette pratique et de l'état des connaissances, la problématique générale de notre recherche vise à répondre de manière précise et objective au questionnement suivant :

Quels sont les impacts de la production de neige sur la ressource en eau et son hydrosystème de moyenne montagne ?

Les concepts auxquels fait référence cette problématique doivent être débattus avant de formuler les hypothèses de départ.

1.2 DEFINITION DES CONCEPTS ET DES HYPOTHESES DE TRAVAIL

1.2.1 Neige de culture, neige artificielle, enneigement mécanique

La neige de culture est définie d'après l'Association nationale des producteurs de neige de culture (ANPNC):

« La neige fabriquée, contrairement à la neige naturelle (se formant à partir de la vapeur d'eau contenue dans les nuages (condensation)), se produit à partir de la phase liquide de gouttelettes d'eau pulvérisées dans de l'air froid (congélation)» (ANPNC, 2005).

Le terme de neige de culture ou neige artificielle est apparu dans les années 1960 avec le développement de cette technique. La sémantique révèle les clivages qui existent aujourd'hui sur ce sujet comme l'évoquent Badré et al. (2009). Certains utilisent le terme de neige artificielle, qu'ils qualifient de plus juste pour décrire cette technique. Il convient donc de définir le terme « artificiel ». Le Larousse le définit comme « produit par le travail de l'homme » et le Robert comme « ce qui est le produit de l'habileté humaine et non celui de la nature ». Maillet (2008b), dans une note à l'intention de la mission d'inspection du MEEDAT (Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire) explique que cette définition convient parfaitement à la neige fabriquée par l'homme. Cependant, il précise également que l'autre sens d'artificiel suscite une connotation péjorative, sans doute peu favorable à l'image du ski, comme pratique d'un sport nature. En effet la seconde définition proposée par le Larousse est la suivante : « se dit de ce qui trompe en cachant ou corrigeant la réalité, de ce qui ne paraît pas naturel ».

De ce fait, certains préfèrent utiliser le terme de neige de culture ; c'est notamment le cas des gestionnaires de remontées mécaniques. Pour eux, il est important d'insister sur l'aspect naturel de la production de neige qui nécessite seulement un apport d'eau et d'air froid. Il s'agit tout simplement de produire de la neige dans les mêmes

conditions climatiques de formation de la neige naturelle, sans apports exogènes, sans artificialisation. Ainsi, le Syndicat national des téléphériques français (SNTF) dans une campagne d'information destinée à la presse et au grand public, insiste sur les procédés naturels de fabrication de la neige de culture (Fig. 3).

Figure. 3 Brochure publicitaire du SNTF diffusée durant l'hiver 2008. (SNTF, 2008c).



Cependant, la multitude des sens que possède le terme de culture ne peut s'appliquer à la neige. D'après le Larousse, la culture s'apparente à la connaissance, à l'enrichissement de l'esprit. On est ici bien loin du sens donné à la production de neige. Mais comme le souligne M. Maillet, la confusion profite à l'activité. Une seconde définition se rapporte à l'action de cultiver la terre (Le Robert). L'usage du terme de culture pour l'enneigement est donc impropre puisque la notion s'applique à la culture du sol et des plantes et on ne voit aucune de ces pratiques (conscientes) dans la pulvérisation de neige par l'intermédiaire de canons.

La polysémie des termes *artificiel* et *culture* rend la définition de l'enneigement très complexe et favorise les conflits autour de la sémantique. On peut considérer que le terme impropre de culture a été substitué en France au terme correct d'artificiel à des fins psychologiques et mercantiles (Maillet, 2008b).

A l'étranger l'adjectif *artificiel* revient régulièrement dans les expressions utilisées ; on parle en effet de neige artificielle en Suisse romande, d'« artificial snow » aux Etats-Unis et en Angleterre, de « neve artificiale » en Italie et en Suisse italienne et de « nieve artificial » en Espagne. Par contre dans l'aire germanophone, c'est le terme de « Kunstschnee » (neige de culture) qui est utilisé.

Depuis quelques temps, on commence également à voir apparaître le terme d'enneigement mécanique. Là encore, il s'agit de mettre en avant l'aspect technique de cette pratique. Le choix du vocabulaire est plus neutre que des termes comme artificiel ou de culture.

Il convient également de définir le terme de canon à neige. Un canon à neige ou enneigeur est un dispositif permettant de fabriquer de la neige mécaniquement à partir d'eau et d'air, le tout à basses températures. Comme pour la neige produite, on peut opposer les termes d'enneigeurs et de canons à neige. Le terme « canon à neige » tend à disparaître progressivement au profit de celui

d'enneigreur qui permet de mettre en avant la haute technologie des équipements d'après le Syndicat national des téléphériques de France (SNTF). De plus, le terme est plus approprié au tourisme (SNTF, 2009). Là encore, il s'agit d'un choix sémantique, le mot « canon » pouvant faire peur au plus grand nombre.

Tous ces choix lexicaux se font dans un but unique, celui de modérer la connotation négative liée à la production de neige. Car finalement, si le mécanisme de production de cette neige est bel et bien artificiel, car instantané et intensif, la neige de culture reste naturelle, répondant à des processus physiques similaires à la neige naturelle tant pour sa formation que pour son évolution.

Le choix des mots utilisés par les différents acteurs permet de connaître leurs positions. Ainsi, la majorité des rapports publiés par les associations de protection de la nature, tous ou presque emploient les termes de neige artificielle et de canon à neige (« Canons à neige eau secours ! », Neirinck, 2004 ; « La neige artificielle en question » *Sud-Ouest Nature* (Gouanelle, 2009)) ; il en est de même pour les médias (« La poudreuse artificielle pas vraiment blanche comme neige », *Libération*, 25 février 2004 ; « Neige éternelle ? La neige artificielle en question », *La montagne et alpinisme* (Lardreau, 2003) ; « Les conséquences financières et écologiques de la fabrication de neige artificielle », *Le messager du Chablais* (Rouxel, 2012). A l'inverse, les exploitants de domaines skiables utilisent davantage le terme de neige de culture (Fig. 4) : « Cahier de bonnes pratiques pour la culture de la neige », membre du site pilote l'Eau en Montagne, (Lachenal ; 2010) ; le SNTF qui titre sa campagne de publicité « Les talents insoupçonnés de la neige de culture », 2008. On peut citer également le rapport du Conseil général de l'Environnement et du

Développement durable sur « la neige de culture » (Badré et al., 2009) et le document d'information sur « la neige de culture » édité par le Syndicat National des Téléphériques de France (SNTF, 2009).



Figure. 4 Information sur la neige de culture et quizz destinés au grand public, proposés par la station des Sybelles en Savoie. (Site internet des Sybelles : <http://www.sybelles.com/fr/quizz-neige-de-culture.com>).

Les termes utilisés ne cessent d'évoluer et dépendent fortement de l'évolution de l'image de la production de neige au sein du grand public. P. Paccard retrace ainsi dans sa thèse l'histoire des termes employés (Paccard, 2010). Aujourd'hui, aucun mot n'a été défini pour qualifier la production de neige, même si celui de neige artificielle nous semble le plus juste d'après la définition stricte donnée de l'adjectif artificiel.

1.2.2 Les concepts de ressource en eau et de gestion d'usages

1.2.2.1 La ressource en eau

Le terme de ressource, du latin *resurgere*, signifie rejaillir. Au sens premier, la ressource est donc apparentée à ce qui peut « fournir de quoi satisfaire au besoin, améliorer une situation » (Robert, 1973).

Dans ce sens strict, la ressource en eau correspond à l'eau disponible pour un utilisateur ou un ensemble d'utilisateurs pour couvrir ses besoins. L'UNESCO définit ainsi la ressource comme une offre : « il peut s'agir aussi bien des possibilités de prélever l'eau dans le milieu naturel que des possibilités d'approvisionnement par des agents intermédiaires » (UNESCO, 1978). Cette définition semble un peu excessive puisque dans cette acception large, la ressource est définie comme une offre illimitée de la nature et dépend finalement de la demande et des besoins.

En hydrologie, la ressource en eau est souvent apparentée à l'eau continentale. Mais cette eau continentale est soumise aux aléas de la nature (variation des précipitations et de l'évapotranspiration) et au milieu (possibilités de stockage) qui la rendent plus ou moins disponible. Dans un sens plus large, la ressource en eau n'est donc pas entièrement disponible à l'utilisation, ce qui introduit la notion de possibilité d'utilisation. Mais cette définition néglige d'autres dimensions telles que l'accessibilité et la maîtrisabilité. C. Gleizes évoque la difficulté de définir les ressources en eau dans l'absolu, car « elles ne peuvent se définir que par rapport à des besoins, qui imposent des contraintes, de quantité, qualité et coût » (Gleizes, 1977). Il est donc préférable de parler de ressource exploitable, utilisable, mobilisable.

L'eau peut être appropriée par l'homme d'un point de vue économique. La rareté de l'offre en définit son coût, même s'il est difficile de monétariser ce prix (Pillet, 1993). Certains usages de l'eau sont aisément traduits par un coût ; c'est le cas de l'eau potable ou de la production d'eau potable. Il est en revanche beaucoup plus complexe d'évaluer en termes de valeur marchande la beauté d'un lac ou l'apport hydrique à un biotope. Il est par conséquent réducteur de limiter la question de la gestion des ressources en eau à une approche purement financière (Reynard, 2000). Deux concepts peuvent être définis : ceux de « ressource techniquement et économiquement disponible » (dans ce premier cas l'eau est répartie entre les divers utilisateurs selon le seul critère économique) et le concept de « ressource

écologiquement et économiquement disponible » (dans ce second cas, une partie de la ressource n'est pas assimilée au contexte économique pour des raisons politiques) (Pillet et Baranzini, 1993).

Cette ressource ainsi définie est particulièrement sensible aux impacts d'utilisation parfois très divers. La ressource mobilisable peut être apparentée à un stock d'eau plus ou moins disponible, qui varie dans le temps et se renouvelle plus ou moins rapidement. Le concept de ressource flux impliquant la notion de disponibilité périodique est donc préférable à celui de ressource stock (Pillet, 1993). La ressource est donc « disponible » à un instant donné mais elle n'est pas infinie. Pour évaluer cette ressource, il faut non seulement évaluer les conditions naturelles, soit l'offre du milieu, mais il faut également prendre en compte les interactions avec les activités anthropiques qui font varier cette offre qualitativement et quantitativement. Pour que la ressource soit viable, il faut que le stock puisse se renouveler au moins aussi rapidement qu'il est consommé. Si les prélèvements dépassent le taux de renouvellement, les stocks peuvent diminuer. Pour cette raison, on parle de ressource renouvelable, mais épuisable (Tietenberg, 1992). Finalement, la ressource disponible définie au départ dépend de critères spatio-temporels de variation du stock et de l'utilisation, donc au résultat de la comparaison entre offre et demande. Puisqu'il s'agit d'une offre de la nature évaluée suivant les critères d'utilisation, l'utilisation de la ressource est un facteur particulièrement important à prendre en compte.

Le concept de gestion est indissociable du concept de rareté de la ressource qui implique que la quantité d'eau qui peut être utilisée ne permet pas de satisfaire l'ensemble des usages. Cela peut s'expliquer de deux manières. Soit la ressource physique disponible est insuffisante ; c'est le cas par exemple dans des régions du globe où les précipitations ne suffisent pas à alimenter toutes les activités (régions arides). C'est la rareté absolue. Soit la ressource physique est suffisante, mais des contraintes économiques, techniques ou politiques limitent son utilisation. C'est la rareté relative (Mather et Chapman, 1995). Dans un contexte de montagne des régions tempérées, la rareté de la ressource s'apparente surtout à une rareté relative (Reynard, 2000). Cette rareté de la ressource peut entraîner des situations de pénurie. Ce concept de pénurie s'applique aux situations dans lesquelles la ressource ne satisfait pas tous les usages. Cela implique que la ressource est limitée dans un contexte spatial et temporel précis et impose des choix dans la coordination des usages. Voyons maintenant quels sont les usages de l'eau et quels sont ceux dit prioritaires.

1.2.2.2 Les usages de l'eau

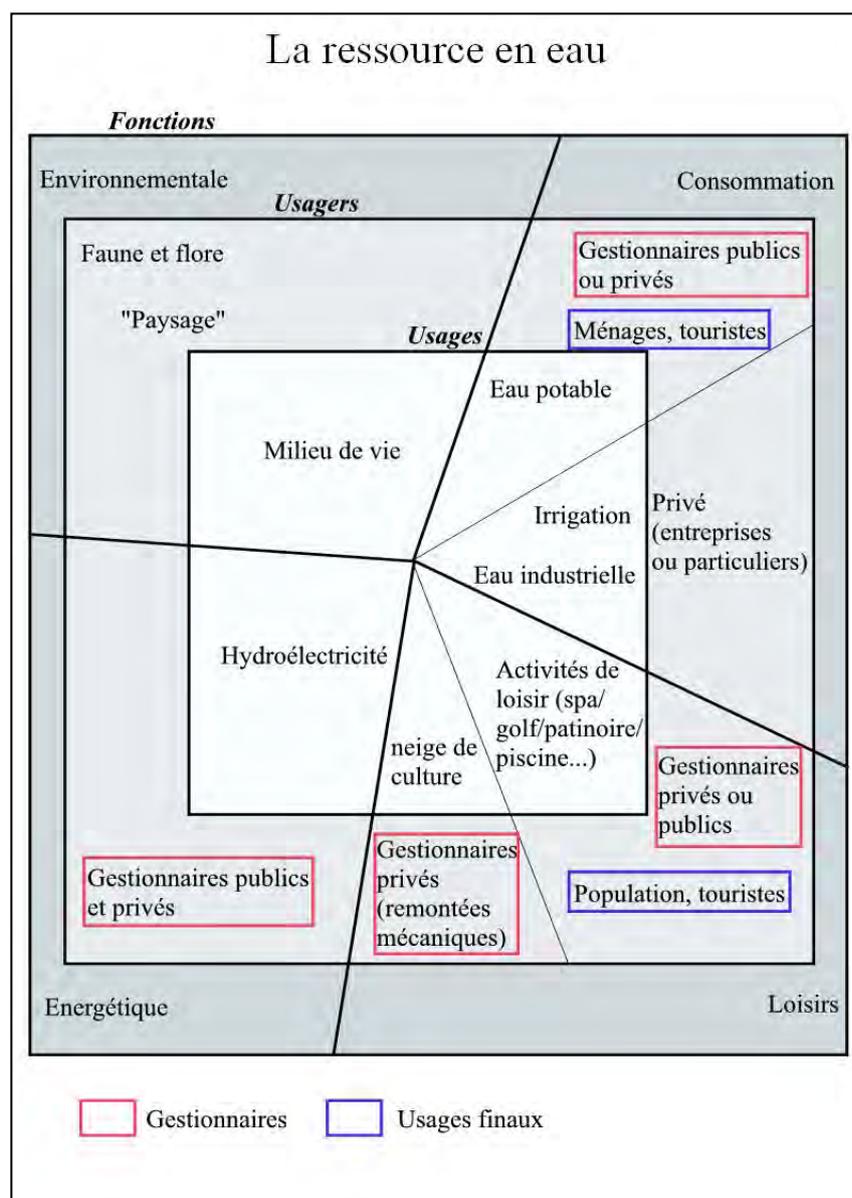


Figure. 5

Les fonctions et usages de l'eau dans une station de montagne.

L'eau possède plusieurs fonctions, définies par exemple par Reynard (2000a) et Reynard et al. (2001b) : milieu vital, approvisionnement en eau potable, production de biens économiques, production d'énergie, transport et absorption de déchets et de sédiments, support d'activités économiques ou récréatives, récréation, thermalisme, transformations géomorphologiques et réserve stratégique. L'eau est à la fois un bien et un service (Reynard et al., 2001b). L'usage de la ressource est donc la mise en application d'une ou plusieurs fonctions de l'eau qui interagissent par des relations de complémentarité et de rivalités. Nous proposons de répartir les différentes fonctions de la ressource selon quatre domaines principaux (Fig. 5) : les fonctions environnementales, de consommation, énergétiques et de loisir. Pour chacune de ces fonctions, différents usagers (public, privé, milieu aquatique...) utilisent la ressource sous la forme d'usages très variés (neige artificielle, eau

potable, irrigation, eau industrielle, hydroélectricité, alimentation...). Mais cette diversité des fonctions, et par là même des usages, est souvent à l'origine de problèmes de gestion de la ressource et parfois de rivalités pouvant mener à des conflits. La ressource en eau peut ainsi être définie comme multifonctionnelle, soumise à différents usages et usagers dont les niveaux de demande et les situations de rivalités potentielles diffèrent (Calvo-Mendieta, 2005).

On peut aussi définir une ressource secondaire, qui désigne la possibilité de remobiliser tout ou une partie des eaux utilisées et retournées au milieu après usage, c'est-à-dire d'utiliser l'eau plus d'une fois. Il faut alors bien différencier la ressource globale mobilisable et la ressource secondaire qui résulte de la ressource globale. L'introduction de cette dernière notion complique là encore la notion d'offre et de demande et donc de gestion de l'eau. Certains auteurs parlent d'usages *in situ*, c'est-à-dire dans l'hydrosystème (baignade...) et d'usages *ex situ*, qui ont lieu à l'extérieur de l'hydrosystème (consommation, dérivation...) (Musy et al., 2013). L'eau peut ensuite être restituée avec une qualité pouvant être altérée (prélèvements) ou non restituée (consommation).

1.2.2.3 La gestion de la ressource

Le Larousse définit « la gestion » comme une action ou manière de gérer, d'administrer, de diriger, d'organiser quelque chose. Cette définition peut tout à fait être adaptée à celle de la gestion de la ressource en eau. En effet, la ressource en eau, définie précédemment, est une offre de la nature répartie, distribuée entre différents utilisateurs. La gestion doit permettre d'administrer et d'organiser cette distribution afin de limiter les conflits tout en tenant compte des différents utilisateurs et en répondant à leurs attentes.

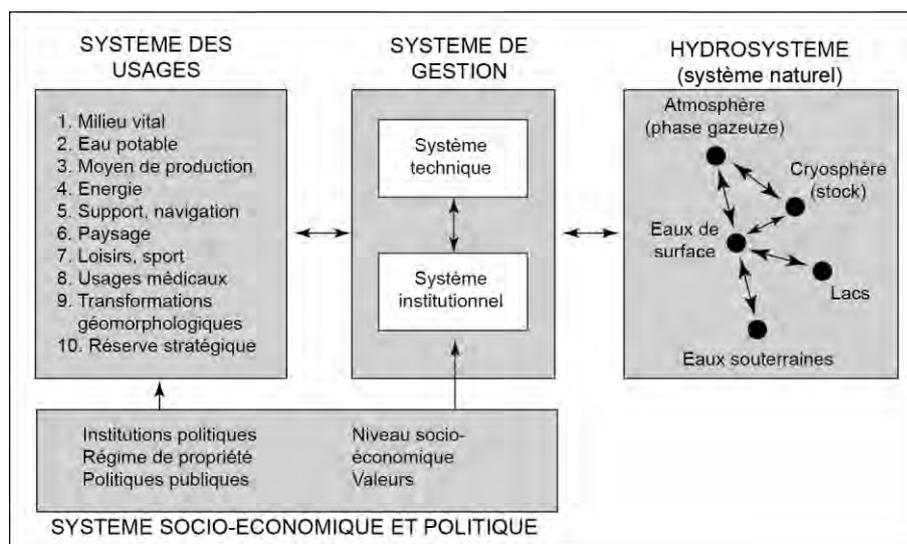


Figure. 6
Structure simplifiée d'un système de gestion des ressources en eau. (Musy et al., 2013).

Selon Durand (1997), la gestion vise à maintenir le fonctionnement d'un territoire assurant le renouvellement de ses différentes ressources tant d'un point de vue

économique qu'à des fins écologiques. La ressource considérée comme un bien est administrée par une ou plusieurs personnes (propriétaire, collectivité, société...) (Fig. 6).

L'utilisation de la ressource suppose des prélèvements, du stockage et du transport. La gestion doit donc s'adapter aux différents types de ressources exploitables (souterraines, de surface...), tenir compte des interactions entre la ressource et les usages et répondre à la demande et aux attentes de chacun. Cette gestion est réalisée par différents acteurs privés ou publics, à différents niveaux d'échelle (locale, régionale, nationale...). Ces acteurs de la gestion sont très variés ; ils ont chacun un rapport particulier à la ressource en eau, qui dépend non seulement de leur histoire, de leur connaissance mais aussi de l'utilisation de cette ressource. La gestion qu'ils vont réaliser sera donc très différente, ce qui complique la gestion globale et la concertation entre les différents acteurs. La gestion des ressources en eau est complexe par le nombre d'acteurs concernés et qui s'affrontent parfois du fait de leurs intérêts divergents. Ces acteurs sont de trois types : les propriétaires, les utilisateurs et les gestionnaires. Ainsi, les divergences de points de vue concernent les acteurs privés (exemple des gestionnaires d'eau potable) et publics ; les différentes entités administratives (collectivités territoriales locales, régionales, nationales, et les entités internationales) et les différents organismes et utilisateurs (gestionnaire de l'eau potable, industriels, agriculteurs...). L'Etat joue un rôle important dans les décisions et régleme nte l'utilisation et la gestion de la ressource. Finalement, ce troisième groupe a plutôt un rôle de régulation et de contrôle du premier groupe tout en tenant compte des exigences et des recommandations du second. Dans ce sens, il a pour fonction d'atténuer les tensions entre ces deux groupes et parfois même entre les différents acteurs d'un même groupe. Mais comme le précise B. Charnay (2010), à ce jour, aucune structure n'a le monopole de la gestion de l'eau, cette gestion se faisant à la fois à l'échelle régionale, départementale et communale et chacun ayant sa part de responsabilité dans la gestion de l'eau. Cette multiplicité des acteurs de l'Etat ne facilite pas la cohérence des politiques de gestion en raison du manque de concertation, du chevauchement de données, du manque de clarté sur les rôles de chacun. Le concept de gouvernance de l'eau s'appuie sur une telle complexité d'acteurs privés et publics qui fragilise le système (Vitali, 2003).

Dans les stations de moyenne montagne, la gestion peut-être « intentionnelle », c'est-à-dire une initiative entreprise par un acteur pour faire évoluer l'état du milieu dans un sens, qui s'oppose à la gestion « effective » résultant d'un ensemble d'actions anthropiques qui affectent l'environnement (Mermet, 1992).

On peut mentionner également le concept de gestion intégrée des ressources en eau (GIRE), concept empirique qui existe depuis déjà une quarantaine d'années en France. C'est à partir du Sommet mondial pour le développement durable qui s'est tenu à Rio de Janeiro en 1992 et de l'Agenda 21 qui en a résulté que l'on a commencé à s'interroger sur la mise en application de ce principe. La gestion

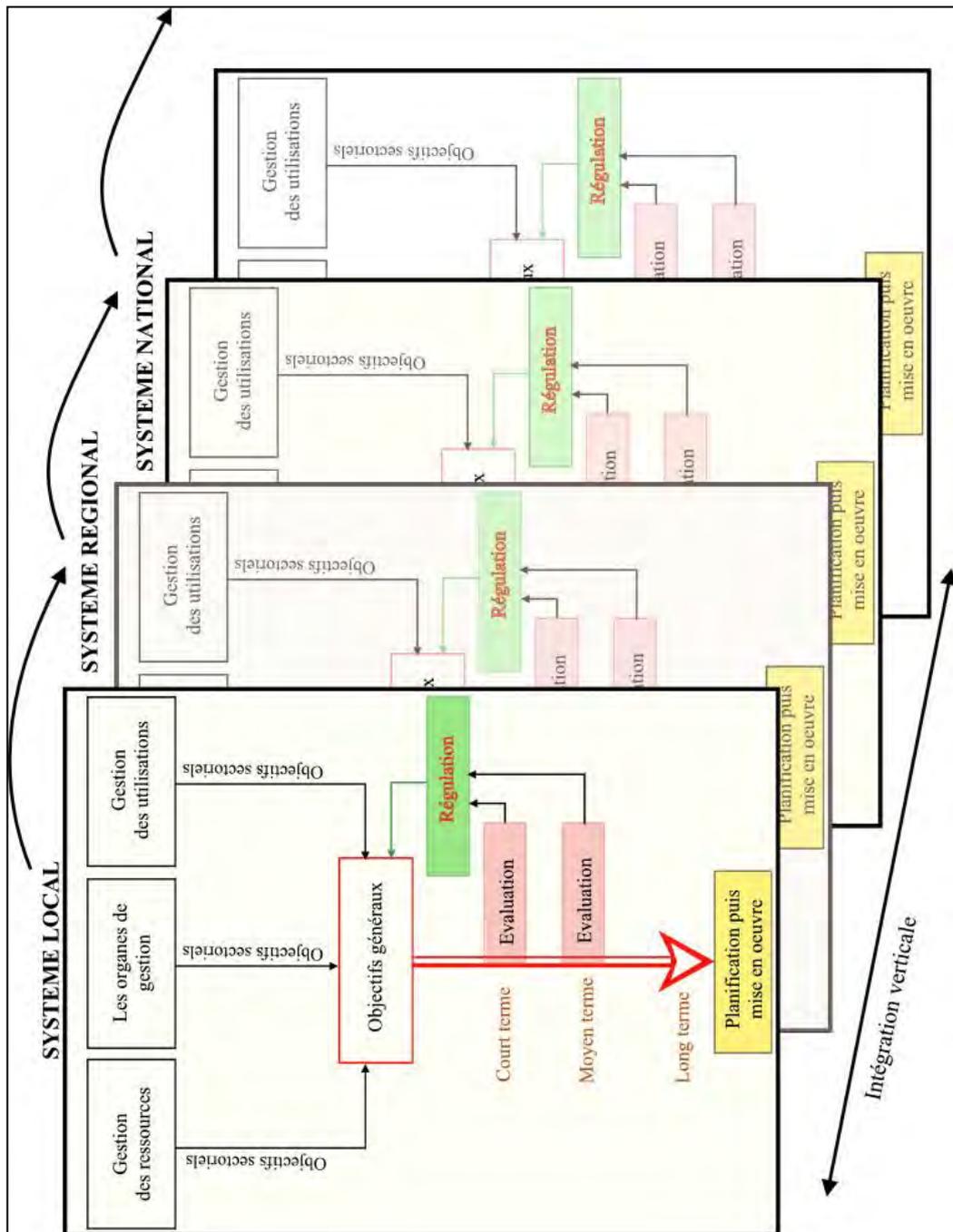
intégrée des ressources peut-être définie d'après le Partenariat mondial pour l'eau comme « un processus qui encourage la mise en valeur et la gestion coordonnée de l'eau, des terres et des ressources associées, en vue de maximiser le bien-être économique et social qui en résulte d'une manière équitable, sans compromettre la pérennité des écosystèmes vitaux » (WWAP, 2009). Le cadre spatial de la gestion intégrée des ressources est en principe celui du bassin versant (Lasserre et Brun, 2007). Le cadre du bassin versant permet de trouver une adéquation entre le fonctionnement hydrologique des hydrosystèmes et leur gestion (Musy et al., 2013). La notion de gestion intégrée englobe la notion de partage de la ressource mais aussi celle du développement. Ce concept est régulièrement repris dans les différents congrès sur l'eau et notamment en 2010 durant les Etats généraux de l'eau en montagne à Megève.

Le concept de la GIRE ajoute au concept de « gestion de l'eau » les notions d'organisation, d'interdépendance, de hiérarchisation, de coordination et d'intégration (Reynard, 2000). Il s'agit non seulement d'une intégration horizontale de la ressource, des usages et des acteurs mais aussi d'une intégration verticale des différentes échelles de gestion (Fig. 7). Cette gestion intégrée signifie une implication de tous les acteurs, aussi bien ceux qui participent à la prise de décision que ceux affectés par ces décisions, du niveau local à l'international. La gestion intégrée vise une gouvernance efficace de l'eau qui intègre une dimension territoriale afin de prendre en compte le contexte institutionnel, socioéconomique et politique (Marcelpoil et Boudières, 2006). La dimension économique est indissociable du concept de gestion intégrée. En effet, celle-ci s'appuie sur la mise en place de systèmes de financement reposant sur la contribution et la solidarité des consommateurs et pollueurs. La connaissance du système est un volet essentiel à la GIRE (Descroix et Lasserre, 2003). Il s'agit d'adapter les demandes aux ressources. Or la connaissance des systèmes est souvent lacunaire. Et certains auteurs émettent des réserves quant à la durabilité des plans de gestion proposés dans le cadre de la GIRE (Allan, 2003 ; Molle 2006).

Enfin, on peut également mentionner le concept de gestion durable, qui doit permettre de répartir et limiter si nécessaire les différentes utilisations afin de conserver la ressource dans le temps et conserver la satisfaction des différents acteurs utilisant la ressource. Trois piliers de la gestion doivent être pris en considération : économique, environnemental et social (Brundtland, 1987). Cette approche serait alors l'administration de biens (la ressource en eau) pour répondre à des objectifs de développement économique et parallèlement à des objectifs de protection de l'environnement. Certains auteurs contestent cette acception. Les différentes parties prenantes justifient leur vision du développement durable en fonction de leurs intérêts (Rumpala, 1999). Cette conception place l'économie au centre des préoccupations (Boutaud, 2004). Les biens naturels (eau, sol, air..) n'ont de valeur que par les services qu'ils rendent à l'homme. Cette approche sous-entend que les ressources naturelles peuvent être totalement utilisées dans la mesure où

elles sont transformées en capital transmis aux générations suivantes (c'est la durabilité « faible ») (Dietz et Neumayer, 2007). A l'inverse, la durabilité « forte » souligne que le maintien du stock de ressources naturelles doit être recherché. L'utilisation des ressources peut dans ce cas conduire à des irréversibilités graves (Daly et Farley, 2011).

Figure. 7 Double processus d'intégration verticale et horizontale de la gestion des ressources en eau. (D'après E. Reynard, 2000. (Modifié)).



1.2.3 Le concept d'hydrosystème

L'hydrosystème peut être défini comme un système composé de l'eau et des milieux aquatiques associés dans un secteur géographique délimité, notamment un bassin versant. L'hydrosystème est composé de plusieurs éléments, l'eau courante, l'eau stagnante, les éléments semi-aquatiques, les éléments terrestres qui interagissent entre eux. L'action anthropique joue un rôle déterminant car elle peut modifier le système.

Les hydrosystèmes interagissent très fortement avec les sociétés. Avec l'accroissement de la population, le développement des stations de sports d'hiver, et l'augmentation des surfaces enneigées, les menaces qui pèsent sur les hydrosystèmes de montagne ont fortement augmentées. Il en résulte une tendance à l'augmentation des impacts des activités humaines, non seulement sur le fonctionnement mais aussi sur la qualité des hydrosystèmes. Cet hydrosystème peut se caractériser par des flux et des stocks dont plusieurs notions permettent d'en analyser les composantes.

Les flux, désigne un ensemble d'éléments évoluant dans un sens commun. Un flux peut donc être entendu comme un déplacement (quelle qu'en soit sa nature) caractérisé par une origine, une destination et un trajet. Les flux en hydrologie caractérisent le déplacement des écoulements dans l'espace et dans le temps. Ce déplacement temporel peut être défini par la notion de régime hydrologique.

Les stocks d'eau sont de plusieurs natures en fonction de l'échelle spatiale considérée. A l'échelle planétaire du cycle de l'eau, on dénombre trois réservoirs dans lesquels l'eau peut être stockée plus ou moins longuement : l'atmosphère, l'océan et le réservoir continental. A l'échelle continentale, ces réservoirs sont multiples et variés, du micro organisme au lac en passant par le réservoir sol. La notion de réservoir introduit l'idée d'un stockage plus ou moins important pour une durée plus ou moins longue. Ces réservoirs peuvent être naturels, tels qu'ils viennent d'être définis, ou anthropiques. Dans le cas de réservoirs anthropiques, les volumes stockés et la durée de stockage dépendent des besoins en eau des différentes activités à l'origine de la mise en place de ce stock d'eau.

Le régime hydrologique désigne à toute échelle de temps, l'ensemble des variations de l'état et des caractéristiques d'une formation aquatique qui se répètent régulièrement dans le temps et dans l'espace et passent par des variations cycliques, par exemple saisonnières (Barczak, 2007). Ce concept a été caractérisé comme les variations saisonnières des moyennes interannuelles des débits mensuels avec une typologie basée sur les dates (les saisons) des moyennes mensuelles maximales (Pardé, 1933). Plus récemment, une importante généralisation a été proposée grâce à des variables seuillées. Il s'agit de représenter de manière synthétique l'ensemble des propriétés pertinentes des chroniques, grâce à des variables seuillées et intégrées pour toute durée d . Ces durées sont ordonnées selon une métrique probabiliste T (période moyenne de retour) (Maniguet, 1997).

Cette notion traduit le fait que certaines caractéristiques hydrologiques présentent un comportement plus ou moins stable ou homogène soit sur le plan géographique soit sur le plan temporel. Ce concept introduit une certaine stationnarité (phénomènes qui se reproduisent identiquement à eux-mêmes dans le temps) qui pose problème en hydrologie quelle que soit l'échelle considérée, en raison de la forte variabilité saisonnière mais aussi du changement climatique qui prévoit une variation des paramètres climatiques et de la ressource en eau dans les années à venir (Oberlin et Hubert, 1999). Mais cette notion de régime reste particulièrement intéressante pour caractériser un phénomène particulier (crue, étiage...). La notion de débit est un des éléments de définition et de description des régimes. Le débit est une grandeur qui mesure la quantité d'eau, exprimée en volume, traversant une section définie pendant une unité de temps (Cosandey, 2007). L'échelle des mesures de débit est variable, de la seconde à l'année. Le mot débit désigne soit des concepts descripteurs (débit d'une rivière, d'une source, d'une nappe souterraine), soit des concepts analytiques (débit de base, débit caractéristique, débit unitaire, débit spécifique). La chronique des débits est constituée des écoulements de base non influencés (provenant de la vidange des nappes et des écoulements rapides de crue (qui répondent directement aux précipitations) qui se combinent tout au long de l'année hydrologique (Cosandey et Robinson, 2000). Le débit de base correspond aux écoulements provenant de la vidange des réserves du bassin, souterraines ou superficielles. Il correspond à l'écoulement qui se produit dans un cours d'eau sur une période en l'absence d'influences (pas de précipitations).

Appliqué à un ouvrage de captage (prise d'eau, puits, forage), le mot débit a le sens de capacité, d'aptitude à fournir, à produire. Le décalage pluie-débit est extrêmement variable, parfois nul ou parfois important, mais dépend de « l'âge de l'eau », notion utilisée par C. Cosandey et M. Robinson (2000) pour définir la durée de séjour de l'eau dans le bassin versant. Ce séjour peut être allongé par les aménagements anthropiques de stockage, type barrage ou réservoir. Ces barrages occupent les lits des rivières, naturels ou artificiels, remplis avec l'eau de la rivière dérivée par un canal (Garnier et al., 1998). Les aménagements anthropiques sont divers, il s'agit d'une part des aménagements de production d'énergie (hydroélectricité), des aménagements de régulation des flux (barrages), des aménagements de captage et de stockage et des aménagements de protection des populations contre les inondations (digues...). Les impacts anthropiques sont divers et peuvent venir modifier le volume des écoulements, leur répartition spatiale et temporelle. La notion de régime hydrologique influencé correspond à cette modification temporelle des volumes écoulés par les activités anthropiques. De manière générale, ces aménagements anthropiques peuvent avoir pour vocation première la volonté de modifier les écoulements ou au contraire la vocation première est tout autre et les modifications hydrologiques sont involontaires. Pour réduire les impacts de ces aménagements, le débit réservé est le débit minimum à maintenir en permanence dans un cours d'eau au droit d'ouvrage. Le débit réservé a été instauré pour préserver les équilibres biologiques et les usages de l'eau à l'aval. En effet les

ouvrages de prise d'eau peuvent modifier considérablement les écoulements en les diminuant, voire les asséchant. L'affaiblissement du débit peut avoir des effets négatifs sur la flore et la faune mais aussi sur les usages en aval. Le concept de débit réservé a donc pour objectif de préserver le milieu aquatique et de répartir l'eau entre les différents acteurs de l'amont à l'aval.

L'échelle d'analyse privilégiée en hydrologie est celle du bassin versant plus ou moins vaste. C'est Philippe Buache, en 1752, qui a le premier formalisé le concept en théorisant le système de la répartition du relief terrestre en liant le réseau hydrographique et l'orographie (Lagarde, 1998). Dans ce système, les montagnes délimitent les bassins fluviaux. Le bassin versant peut-être défini comme l'aire d'alimentation d'un cours d'eau et ses tributaires en amont d'un exutoire (Cosandey, 2003). Dans le cadre d'un sol imperméable, ou d'un sol perméable peu profond, le bassin versant est délimité par la ligne de crête qui le sépare des bassins voisins (bassin hydrographique). Dans le cas inverse le bassin tient compte des écoulements souterrains dépendant du contexte géologique (bassin hydrogéologique). Généralement, on admet le bassin versant hydrographique comme limite du bassin versant. Le bassin versant est désigné en anglais par plusieurs termes « watershed », « catchment » et « drainage basin » qui admettent des différences de tailles des bassins. Le terme catchment est généralement utilisé pour des bassins de petite taille et celui de « drainage basin » pour des systèmes de grande taille (Messerli et Ives, 1999). En français il n'existe qu'un seul et même terme, celui de bassin versant. La délimitation du bassin versant renvoie toujours à une vision particulière du territoire et de sa finalité, et s'apparente à un acte d'objectivation (Vanier, 1997). Ce découpage cherche donc à fonder la connaissance objective des principes de catégorisation, de classification et d'action (Hamel, 2008). Les éléments caractérisés au sein de cette échelle d'observation sont de deux natures, des éléments physiques et des éléments anthropiques. Et la nature des précipitations est un élément clé dans la compréhension du comportement hydrologique (Hingray et al., 2009). D'autres paramètres sont particulièrement importants, comme le sol, la géologie, la topographie, la végétation... A l'échelle des bassins versants alpins, ceux-ci montrent une forte saisonnalité. Mais le bassin exprime aussi les effets physiques des activités humaines. En effet le bassin versant est à la fois une unité naturelle et le support du système anthropique (usages, prélèvements...) (Romagny et Cudennec, 2006). Dans une finalité de gestion, le cadre idéal devrait être celui du bassin mais, au début du XXème siècle, rares sont les pays qui ont appliqué cette échelle de gestion (Hamilton et King, 1984). D'après Hamilton et King, l'unité hydrologique du bassin versant est la plus appropriée pour les études pour plusieurs raisons. On peut citer quelques-unes de ces raisons qui nous intéressent tout particulièrement dans le cadre de ces recherches :

- Les bassins versants ont des tailles différentes et en conséquence ils sont l'objet de scénarios de développement différents ;

- Les relations économiques entre l'amont et l'aval peuvent être analysées au travers des coûts et des bénéfices qui résultent des activités à l'intérieur du bassin ;
- Le bassin versant peut-être une unité de planification et de gestion à l'intérieur de laquelle les considérations sociales et culturelles ne sont pas toujours incompatibles avec l'utilisation du bassin versant ;
- Les diverses utilisations de l'eau doivent être intégrées dans un schéma de gestion tout au long du cours d'eau.

Dans les années 1990-2000, plusieurs pays ont adopté cette échelle de gestion (Maroc, Brésil...) comme en témoigne les travaux de Graefe (2011-2013). L'auteur souligne les problèmes liés à ce choix d'échelle de gestion car dans la plupart des cas, les échelles de gouvernances territoriales ne correspondent pas au bassin naturel. Les avantages du cadre spatial du bassin versant présentés par Hamilton et King (1984) peuvent être repris pour d'autres échelles de gestion, notamment l'échelle gouvernementale. Celles-ci sont aujourd'hui indispensables pour gérer les ressources en eau. En effet, c'est principalement parce que l'eau est au cœur de l'activité économique et que sa gestion s'effectue aujourd'hui par filières ou usages (eau potable, neige de culture, irrigation...), dont le nombre de ces usages ne cessent de croître augmentant la pression sur la ressource, que des conflits apparaissent. Ce cloisonnement est particulièrement vrai dans les régions de montagne. Les enjeux politiques et économiques poussent à la constitution d'une vision et d'une connaissance globale de l'eau. Cette vision d'ensemble n'est réalisable qu'à l'échelle d'un territoire où la globalisation des connaissances et l'optimisation économique de la ressource et de son utilisation est possible (Ghiotti, 2006). Ce cadre d'étude est donc celui du bassin versant qui doit répondre à tous ces critères. Mais le choix du bassin comme cadre de gestion est discutable, notamment en raison des nombreux transferts entre bassin versant. En raison de l'augmentation des connectivités entre bassin et de la complexité de la gestion, ce cadre est trompeur pour l'identification de solutions pour les problèmes de nature politique (Graefe, 2013). De plus, le découpage par bassin versant ne tient pas compte des découpages territoriaux existants. Ainsi, dans ce cadre du bassin versant, la GIRE passe d'une gestion politique par les collectivités territoriales à une gestion par les autorités de bassin. Ainsi cela entraîne une dépolitisation de la gestion des ressources en eau (Swyngedouw, 2009). Enfin la gestion par bassin versant basée sur des critères naturels peut entrer en concurrence avec d'autres modes de gestion à l'échelle régionale pourtant mieux adaptés aux activités économiques (tourisme par exemple) (Molle, 2006).

Cependant, la gestion par bassin se substitue progressivement à la gestion territoriale de l'eau (découpage administratif). Mais ce changement lent et progressif témoigne des conflits, des ajustements multiples et souvent à établir entre « la sphère publique », la « sphère privée » et la « sphère communautaire ». L'eau est devenue un facteur de développement en particulier dans le contexte actuel (Ghiotti,

2006). Mais ce découpage doit mettre en avant les enjeux liés à la territorialisation de la politique de l'eau. Il doit réguler les usages en atténuant la concurrence accrue et parfois conflictuelle entre les fonctions du territoire (productives, touristiques, agricoles, urbanistiques, environnementales...) et la gestion des ressources (foncières, ressources en eau, biodiversité, paysages...). En effet comme le définit A. Moine (2006), ces acteurs et leurs fonctions interagissent.

1.2.4 Un territoire de montagne

Pendant longtemps, le terme de territoire a été apparenté à celui d'espace, mais cette définition très large ne renvoie pas la diversité des sens associée au territoire (Di Méo, 1998). D'après P. Baud et al., (2003), trois définitions peuvent être données au mot « territoire », ces définitions ne s'excluant pas mutuellement. Le territoire désigne premièrement un découpage administratif, « un espace ayant une autorité compétente ». Un territoire se définit également comme une étendue limitée par des frontières et abritant une population particulière : une nation. « L'Etat possède l'autorité territoriale, c'est-à-dire l'autorité politique sur tout cet espace ». Enfin, le troisième sens du terme désigne tout espace socialisé, approprié par ses habitants, quelle que soit sa taille. Dans cette dernière définition, le territoire résulte donc de l'œuvre des hommes qui s'inscrit dans l'espace, en le transformant selon des pratiques individuelles et collectives. C. Raffestin (1989) définit la territorialité comme l'ensemble des relations entretenues par un groupe, et par conséquent par les individus qui y appartiennent, avec l'extériorité et l'altérité dans la perspective de satisfaire leurs besoins et d'atteindre la plus grande autonomie possible compatible avec les ressources du système. Ces différents territoires s'emboîtent à différentes échelles (le territoire communal dans le territoire national par exemple). D'après, Messerli et Ives (1999), la montagne peut se définir par la verticalité des versants et l'altitude. Il existe donc deux façons de la définir :

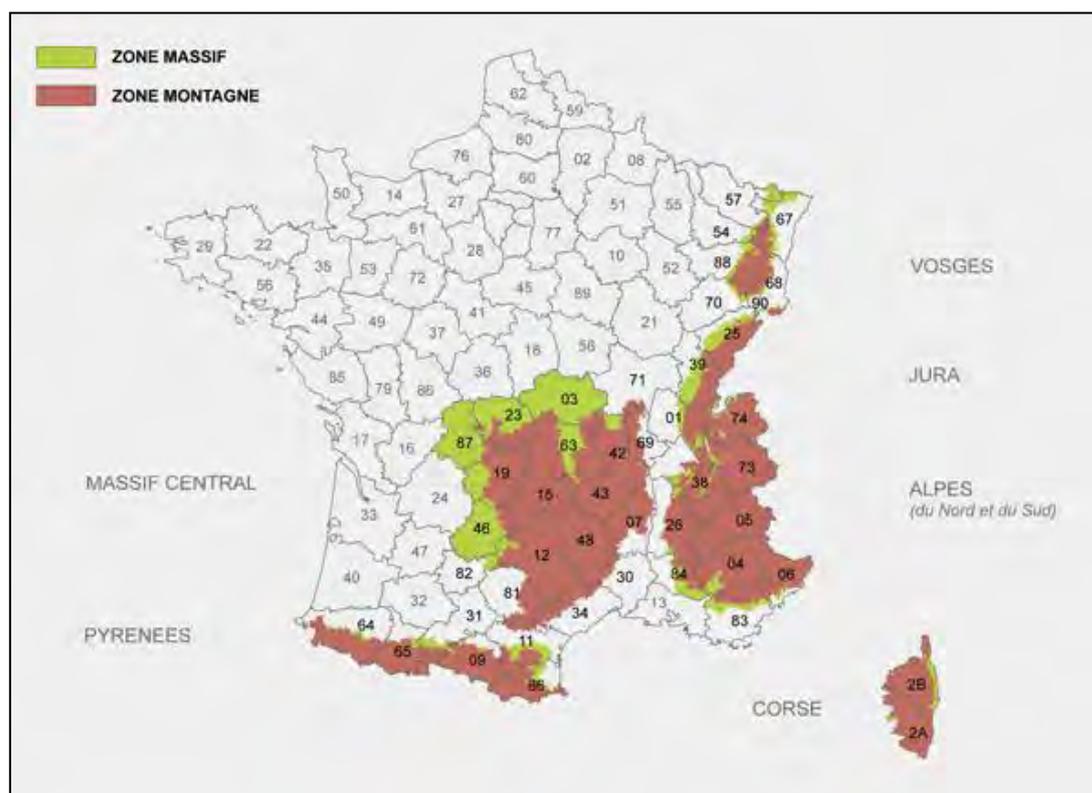
- C'est un relief ou un ensemble de reliefs de la surface de la Terre.
- L'ensemble des éléments d'une structure paysagère différenciée, éléments situés en contrehaut du lieu d'où on les observe.

De manière plus générale, les montagnes peuvent se définir par des spécificités physiques qui leur sont propres : l'altitude, les pentes, les volumes, le climat, l'écosystème, l'hydrologie. L'unité de montagne se comprend dans plusieurs sens. D'abord, pour les Alpes, une unité géographique puisqu'elle a été divisée selon les auteurs en Préalpes, massif centraux, zones internes... mais aussi en unités géologiques où l'on distingue zones internes, externes, massifs cristallins, zone charriée, (Chardon, 1984). Ces distinctions montrent la notion de masse montagneuse qui a amené à distinguer les zones de montagne en fonction de leurs altitudes.

Les zones de montagne sont précisées par une directive de la Communauté économique européenne (article 3.3, directive CEE n°75/268, 1975). La zone de

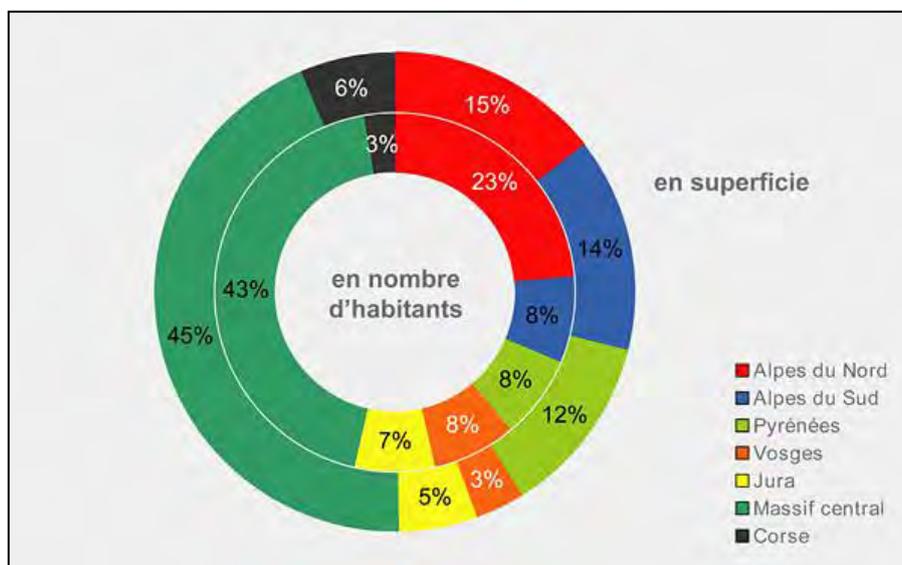
montagne comprend les communes caractérisées, du fait de l'altitude, par des conditions climatiques difficiles se traduisant par une période de végétation sensiblement raccourcie. Mais plus généralement, les communes d'altitude moindre (environ 80 % du territoire français), caractérisées par de fortes pentes (supérieures à 20 %) appartiennent également aux zones de montagne. Cette définition s'est enrichie au fur et à mesure et distingue aujourd'hui plusieurs unités géographiques (du piémont à la haute-montagne). Une seconde classification a été proposée par ODIS France (2007). L'ensemble des communes ayant une altitude supérieure à 700m (600m pour le massif des Vosges) ou une pente moyenne supérieure à 20% forment les zones de montagne. Ces communes ont été classées par application du décret 77-566 du 3 juin 1977 et les critères de classification ont été fixés par l'arrêté du 28 avril 1976. Les massifs correspondent quand à eux aux zones de montagne et aux zones qui leur sont immédiatement contiguës, le tout formant une entité géographique, économique et sociale (limite définie par le décret du 14 janvier 2004). La zone de montagne constitue 22,8 % de la superficie totale du territoire français, dont 6,6 % pour les Alpes (Fig. 8 et Fig. 9) ; et 90.7 % du territoire Suisse (Commission européenne, 2004). La moyenne montagne par opposition à la haute montagne, se caractérise par des sommets ne dépassant pas 2000 m, des versants rarement très escarpés, couverts de prairie et de forêt (Chardon, 1984). Mais ces notions de hautes et moyennes montagnes sont subjectives et difficiles à cerner. Officiellement, en France, deux délimitations administratives se superposent : les zones de montagne et les massifs.

Figure. 8 Les zones de montagne définies par ODIS France. (Carte ODIS France, 2006, http://www.afit.fr/La_montagne_francaise.408.0.html).



Le massif englobe, non seulement les zones de montagne, mais aussi les zones qui leur sont immédiatement contiguës : piémonts, voire plaines si ces dernières assurent la continuité du massif. Cet élargissement prend en compte les interactions et les échanges entre les territoires d'altitude et les plaines, ce qui permet de mettre en place des projets d'aménagement du territoire plus pertinents (Communauté économique européenne, 1975). En France, on compte six massifs : Vosges, Jura, Alpes, Massif central, Pyrénées et Corse. Il faut préciser que cette notion de massif est une approche uniquement française pour mener la politique de la montagne dans une unité administrative compétente.

Figure. 9 Le pourcentage de superficie des zones de montagne et le pourcentage du nombre d'habitants des différentes zones de montagne française.(Graphique ODIT France, 2006, http://www.afit.fr/La_montagne_francaise.408.0.html).



En Suisse, les limites ont été officiellement définies par la loi cantonale d'introduction de la LIM de 1975 (LIM). Plus de 50 régions appartenant à une vingtaine de cantons sont communément désignées comme région LIM, soit deux tiers du territoire suisse. Ces régions sont formées et regroupées suivant leurs caractéristiques géographiques et économiques comparables et leur volonté de partager les «tâches qui leur incombent». L'ordonnance 912.1 sur le cadastre de la production agricole et la délimitation de zones du 7 décembre 1998 définit son propre champ spatial. Selon cette ordonnance, les zones de montagne concernent environ un quart de la population. Les limites sont proposées en fonction de trois facteurs : les conditions climatiques, les voies de communication et la configuration du terrain. Ces régions de montagne sont constituées de quatre catégories, des sites bien situés (zone 1) aux sites défavorisés (zone 4) (OCDE, 2002). La LIM a été abrogée au 1^{er} janvier 2008 dans le cadre de la mise en place de la Nouvelle Politique Régionale (NPR) par le Secrétariat d'Etat à l'économie (SECO). La NPR a pour objectif d'aider les régions rurales, montagneuses et frontalières à améliorer leur compétitivité et à générer de la valeur ajoutée. La réduction des disparités est censée découler indirectement d'une

meilleure compétitivité régionale (OCDE, 2011). Alors que les politiques antérieures (LIM) étaient axées géographiquement sur une échelle infracantonale, la nouvelle politique régionale s'applique aux cantons et régions. Les régions prennent leurs propres initiatives afin d'améliorer la compétitivité et de générer de la valeur ajoutée et les cantons sont les interlocuteurs principaux de la Confédération et assurent la collaboration avec les régions (Confédération suisse, 2011).

Les rapports des sociétés au milieu montagnard ont beaucoup varié au fil du temps ; les montagnes ont d'abord été craintes, comme au Moyen-âge, puis reconnues, à nouveau délaissées comme à l'époque classique où elles s'apparentent à des lieux maudits, et enfin convoitées. N. Broc (1991) dans une étude sur les montagnes au siècle des Lumières, décrit les premiers pas de la géographie scientifique des montagnes, objets de crainte et de répulsion jusqu'alors. Fondée sur des observations précises sur le terrain et non plus sur des théories de « savants de cabinet », une observation détaillée de la structure, de l'origine et de l'érosion est proposée. Les phénomènes spécifiques des milieux montagnards sont évoqués pour la première fois, le climat, la végétation, les neiges éternelles et les glaciers. L'étude aborde aussi le rapport entre les hommes et les milieux. Dans ce contexte du XVIII^e siècle, on abandonne un système de pensée qui privilégiait l'illusion optique et la dénivellation au détriment des vraies altitudes que l'on apprend à mesurer. Mais les connaissances nouvelles se sont accompagnées de violents débats théoriques et méthodologiques qui opposaient les « praticiens de la montagne » partisans de la mesure et de l'expérience (on peut citer de Saussure, Deluc...), « les géographes » partisans des théories sur la formation des espaces et des grands systèmes d'interprétation, les « neptuniens » partisans d'une explication du relief et des structures géologiques, et les « plutoniens » adeptes d'une origine volcanique et tectonique (Debardieux, 1992). La montagne peut être définie par ses caractéristiques physiques ; c'est une forme de relief saillante caractérisée par des altitudes, des formes et des volumes qui font l'objet de conventions variables selon les contextes. Le terme est d'un usage scientifique populaire extrêmement courant (Lussault et Lévy, 2003).

Aujourd'hui, le contexte idéologique et esthétique intervient directement sur les analyses de la montagne, perçue comme une barrière politique (frontière naturelle), un réservoir ou un château d'eau, un domaine vierge et naturel, un refuge, une ressource (hydraulique), un espace touristique, ou encore un patrimoine... (Veyret, 2002). Aujourd'hui, les populations ne s'approprient plus l'espace montagnard comme elles le faisaient autrefois, en subissant parfois l'aléa naturel, mais elles tentent de le maîtriser pour exclure les risques affectant les populations locales et surtout les populations occasionnellement utilisatrices de l'espace. L'espace montagnard étudié comme un espace touristique, réduit les possibilités de gestion par les populations locales au profit d'acteurs divers à différentes échelles (régionale, nationale, internationale...).

Il existe une grande diversité d'approches de l'objet montagne, dont certaines sont mentionnées par Y. Veyret (2002). La montagne peut-être perçue comme un référent spatial d'une étude, comme cadre d'étude de phénomènes individualisés, comme système d'interaction localisé, comme terme géographique de différenciation, comme objet géographique, ou bien encore comme représentation sociale ou culturelle. Dans le cadre de cette étude, l'objet d'étude « montagne » est appréhendé comme un système d'interactions localisé. En effet, la montagne constitue le cadre spatial de l'étude où plusieurs phénomènes (climatiques, géomorphologiques, anthropiques...) sont en interaction et permettent d'expliquer localement certaines manifestations.

Enfin, la montagne est aussi le cadre de pratiques touristiques et notamment de l'activité ski. Pour les touristes, l'attrait de la pratique, sous l'aspect ludique ou sportif, prime sur le paysage ou les cultures locales. Dans ce contexte, ces diverses pratiques s'accommodent des divers aménagements et équipements conçus pour faciliter et optimiser les activités. Deux courants ont ainsi vu le jour. Le premier perçoit la montagne comme théâtre de l'imagination et de l'aménagement moderne entraînant de fortes transformations (Dérioz et Bachimon, 2009). Un second, relayé par les mouvements écologistes, défend l'idée d'une inscription douce de la présence humaine sur le milieu, au nom de son intégrité et de sa valeur esthétique (Fondation pour l'action culturelle internationale en montagne (FACIM), 2009). Elle s'exprime par des projets de protection ou par des projets de développement contrôlé. Finalement, les populations montagnardes ont droit au développement à condition que celui-ci ne se fasse pas au détriment des équilibres écologiques ni au détriment des populations situées en contrebas. Dans ce cadre, les régions de montagne bénéficient d'une attention particulière de la part des gouvernements afin de protéger et de gérer les ressources et l'espace montagnard dans son ensemble. En France, la loi sur le développement et la protection de la montagne (1985) (dite loi montagne) favorise à la fois le développement des régions de montagne tout en limitant les impacts sur le milieu. Cette loi a pour objectif de proposer une reconnaissance des territoires de montagne fondée sur l'affirmation de leurs spécificités. De nombreux textes réglementaires sur l'urbanisme, la protection contre les risques naturels, l'agriculture et l'environnement en résultent. Ces objectifs soutenus par des dispositifs institutionnels et administratifs sont multiples : pour n'en citer que quelques exemples, le maintien de la population, le développement durable, la parité avec les autres territoires nationaux et la préservation de l'environnement. En Suisse, la Nouvelle politique régionale (2008) a pour objectif de promouvoir les régions de montagne. Elle doit permettre de créer des conditions favorables au développement économique et accroître la compétitivité dans les régions de montagne ; favoriser l'exploitation des potentiels régionaux ; contribuer au maintien de l'occupation décentralisée du territoire et préserver les particularités socio-culturelles et la diversité du pays ; garantir le développement durable des régions de montagne ; renforcer la coopération entre communes, sous-régions et régions.

Les accords internationaux, comme les conventions de chaîne de montagne, sont des outils importants pour la mise en œuvre de politiques de la montagne (Villeneuve et al., 2002). Ces accords peuvent s'avérer précieux pour la reconnaissance de la région concernée comme ayant des caractéristiques environnementales et culturelles spécifiques. Le premier accord international fut la Convention alpine, signée en 1991, et ratifiée par l'ensemble des États alpins (l'Allemagne, l'Autriche, la France, l'Italie, le Liechtenstein, Monaco, la Slovénie ; la Suisse n'a pas ratifié cet accord) ainsi que par l'Union européenne. Les protocoles établis par cette convention concernent l'énergie, l'agriculture de montagne, les forêts de montagne, la protection de la nature et la préservation des paysages, l'aménagement régional et le développement durable, la protection du sol, le tourisme et le transport. A l'échelle des Alpes, les accords européens ont conduit à la création d'un certain nombre de programmes en faveur du développement des zones de montagne. Quasi toutes les frontières nationales montagneuses des 28 États membres actuels de l'UE sont couvertes par un ou plusieurs programmes Interreg. Ces programmes visent entre autre, à développer la coopération transfrontalière dans une zone traversant une frontière montagneuse. Le programme européen LEADER a pour objectif de contribuer à répondre aux préoccupations locales (la valorisation des ressources, la promotion de nouvelles activités...) (Borsdorf et Braun, 2008). Ce programme permet de soutenir des actions innovantes et favorise la coopération entre territoires et la participation d'acteurs publics et privés. Ce programme vise à faire des territoires ruraux des pôles équilibrés d'activité et de vie.

Les territoires de montagne induisent parfois une concentration spatiale des pratiques et des usages qui peuvent avoir un impact particulièrement important sur la gestion des ressources. De plus, les logiques d'amont et d'aval sont particulièrement directes, comme l'évoque B. Charnay (2010), tant spatialement que temporellement (forte réactivité des territoires de montagne aux modifications). Tous ces éléments doivent faire l'objet d'une attention particulière dans toute pratique d'aménagement de l'espace montagnard.

1.3 LES HYPOTHESES DE DEPART

Ce travail a été réalisé en cotutelle de thèse avec le partenariat de deux universités (l'université Paris IV Sorbonne et l'université de Lausanne) et avec le soutien financier de la société EIFFAGE pour les trois premières années et de la Fondation Eau Neige et Glace pour la quatrième année. Il a donc fallu répondre aux diverses attentes de ces partenaires.

L'objectif de cette recherche est de définir et de caractériser la production de neige de culture afin d'observer d'éventuelles conséquences sur le cycle hydrologique et la ressource en eau au sein d'un territoire de montagne. Ce choix de sujet se justifie

par la volonté de vérifier ou de démentir les nombreuses accusations que l'ont peut entendre régulièrement dans les médias au sujet de l'enneigement artificiel. La question posée est donc précise et vise à identifier des impacts de la production de neige sur les hydrosystèmes, s'il en existe. Il s'agit des impacts observés aujourd'hui ou envisageables à long terme, et notamment en prévision d'un changement climatique.

Une approche géographique au travers d'un ancrage spatio-temporel permet de répondre à la question posée. Ce sujet fait appel aux diverses disciplines de la géographie physique pour étudier les données du milieu naturel, climatologie, géomorphologie, géologie, biogéographie, mais également aux disciplines spécifiques à la géographie humaine, économie, tourisme, aménagement et occupation des sols... La géographie environnementale désigne l'étude des géosystèmes, des systèmes produits par les interactions du relief, du climat, des eaux, des sols et des sociétés. Elle analyse les géosystèmes et la manière dont les hommes doivent composer avec les ressources, les contraintes et les risques du milieu dans lequel ils vivent. Le champ d'étude est celui du milieu de vie où l'homme est acteur de l'espace et peut avoir une influence sur la nature. Les disciplines issues de la géographie humaine et plus précisément de la géographie sociale permettent d'expliquer tout ce qui fonde l'univers social, comme les pratiques récréatives (sport, culture...). Enfin des notions économiques et politiques facilitent la compréhension des situations qui influencent la production de neige de culture.

La question qui motive ma recherche est la suivante :

La production de neige a-t-elle des impacts sur la ressource en eau et l'hydrosystème de montagne ? On peut également se demander, si impacts il y a, si ils sont acceptables ou non.

Pour répondre à la question posée, deux approches sont menées :

La première porte sur la gestion intégrée de l'eau, elle étudie la gestion de l'eau pour la production de neige en lien avec les divers usages du territoire de montagne considéré ;

La seconde porte sur l'impact de l'enneigement artificiel sur l'hydrosystème et son fonctionnement.

A partir d'un travail bibliographique et des premières observations dans les stations de ski, il est possible d'envisager plusieurs réponses plausibles à la question de recherche (Fig. 10). Ces hypothèses constitueront un point de départ pour les recherches et seront vérifiées au cours de la thèse.

- **1^{ère} hypothèse** : La production de neige nécessite l'utilisation de volumes considérables qui pèsent sur la ressource globale d'une station de sport d'hiver.

Il s'agit de quantifier le volume global utilisé pour la production de neige au sein des différentes stations étudiées et la ressource globale disponible pour ces deux usages.

- **2^{ème} hypothèse** : Le développement des surfaces d'enneigement et des stations de ski va entraîner une augmentation importante des volumes d'eau utilisés.

Les surfaces enneigées et le nombre d'installations d'enneigement n'ont cessé de croître ces dernières années. La plupart des stations sont aujourd'hui équipées. Parallèlement, les volumes d'eau mobilisés sont de plus en plus importants.

Il s'agit d'observer la progression des surfaces enneigées ces dernières années et les volumes d'eau associés, puis d'estimer la progression de l'enneigement dans les années à venir. Le changement climatique est à prendre en considération, car la production de neige dépend de deux facteurs, la température et l'eau. La production de neige est aussi parfois perçue comme une mesure d'adaptation au changement climatique.

- **3^{ème} hypothèse** : Le captage de l'eau pour l'alimentation des canons à neige se fait à partir de plusieurs sources. En effet, il existe plusieurs modes de prélèvements directs, à partir de sources naturelles (rivières, nappes phréatiques, lacs), ou indirects (pompages dans les réservoirs d'eau potable, les retenues collinaires et les barrages hydroélectriques). Associé à une pression démographique élevée en saison hivernale qui coïncide avec la période d'étiage des sources et des cours d'eau, cela diminue localement et temporairement la ressource disponible pour les différents usages.

- **4^{ème} hypothèse** : L'intensité de ce nouvel usage qu'est la production de neige peut créer des conflits d'usage avec les autres utilisateurs de la ressource et des pénuries d'eau. La mobilisation d'un volume d'eau toujours plus important pour la production de neige de culture sur une période très courte n'est pas sans effet sur la disponibilité de la ressource en eau dans un bassin versant de moyenne montagne.

La planification des besoins en eau pour la production de neige est insuffisante et les volumes mobilisés ne sont pas toujours connus des acteurs. Les différentes utilisations répondent à une logique sectorielle avec des prévisions sur un temps court. Cela complique la gestion.

Il s'agira de décrire les différentes activités prélevant dans la ressource et les motivations des acteurs, puis de quantifier les prélèvements par rapport à la

ressource disponible. Cela permettra de tester la compatibilité des différentes activités en hiver.

- **5^{ème} hypothèse** : Le risque concerne principalement les conflits d'usage autour du secteur de la production de neige et celui de l'alimentation en eau potable de la station.

Des coupures se sont déjà produites sur les réseaux d'alimentation de l'activité neige mais aussi pour l'eau potable. Certains territoires ont de ce fait déjà été amenés à arbitrer ces deux usages. Ce fût le cas pour la station des Gets en 2007 qui a dû faire face à une situation de pénurie d'eau potable. Le maire a immédiatement ordonné l'arrêt des pompages pour la production de neige et la priorité fut donnée à l'alimentation en eau potable. .

Il s'agira d'évaluer précisément les systèmes de gestion au sein de ces deux activités et d'évaluer les quantités prélevées pour tester leur compatibilité.

- **6^{ème} hypothèse** : Les captages réalisés par les divers secteurs, que ce soit l'alimentation en eau potable, la production de neige, la production hydroélectrique, l'irrigation ou d'autres usages touristiques de l'eau (irrigation des golfs...) se font sans concertation et répondent aux besoins propres à chaque secteur.

La planification des besoins répond à une logique à court terme. L'absence de communication entre les différents acteurs peut conduire à des conflits. Aucun acteur tant au niveau local que régional n'a de vision globale du système de gestion de l'eau et des prélèvements. Cette vision globale tant au niveau des flux (quantitatif) que du fonctionnement du système naturel (hydrosystème) et anthropique (usages de l'eau) est indispensable à une gestion cohérente des ressources. Il s'agira d'évaluer les modes de gestion de chacune des activités présentes.

- **7^{ème} hypothèse** : Les retenues collinaires ont un impact sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant.

L'été, les retenues collinaires sont réalimentées par captage de l'eau de fonte et les précipitations. Cette eau est stockée dans ces retenues jusqu'à la saison d'hiver où elle sera mise à disposition pour la production de neige. Cette eau stockée modifie le fonctionnement hydrologique naturel du bassin et manque temporairement aux territoires situés à l'aval. Même durant la période estivale, des coupures d'eau potable peuvent ainsi se produire, ce qui laisse penser que la production de neige de culture est responsable de l'épuisement temporaire de la ressource en eau.

Il s'agira de s'intéresser au fonctionnement de l'hydrosphère en intégrant un nouveau paramètre de stockage anthropique.

- **8^{ème} hypothèse** : La neige artificielle est un élément majeur du cycle hydrologique naturel. On peut ainsi parler d'un cycle hydrologique artificiel. Et on peut envisager une modification spatio-temporelle du cycle naturel.

Une partie de l'eau sort temporairement du cycle puisqu'elle est stockée dans les réserves durant les périodes où la ressource est abondante, avant d'être restituée sur les pistes pour l'enneigement selon les besoins. On peut donc envisager une modification spatio-temporelle du cycle naturel. Cette eau prélevée et stockée est parfois transférée vers un autre bassin versant.

Il s'agira de quantifier les prélèvements et les restitutions et de définir les périodes de prélèvements et de restitution de l'eau dans le bassin versant.

- **9^{ème} hypothèse** : L'impact de la production de neige sur les hydrosystèmes est important, notamment par les captages directs dans les écoulements de surface réalisés durant les étiages hivernaux entraînant une baisse significative du débit en aval pouvant engendrer des conflits entre l'amont et l'aval d'un bassin versant.

Du fait de l'importance des prélèvements, les débits à l'aval sont considérablement modifiés. La gestion amont-aval est mise à mal, entraînant des conflits entre les différentes activités du bassin versant parfois à une échelle relativement vaste.

Il s'agira de quantifier les prélèvements sur le volume global des écoulements à différentes échelles spatiales d'étude, afin d'évaluer la compatibilité de la production de neige avec les différents usages de l'eau dans un petit bassin versant mais aussi au sein de grands bassins versants.

- **10^{ème} hypothèse** : Le cadre légal est insuffisant.

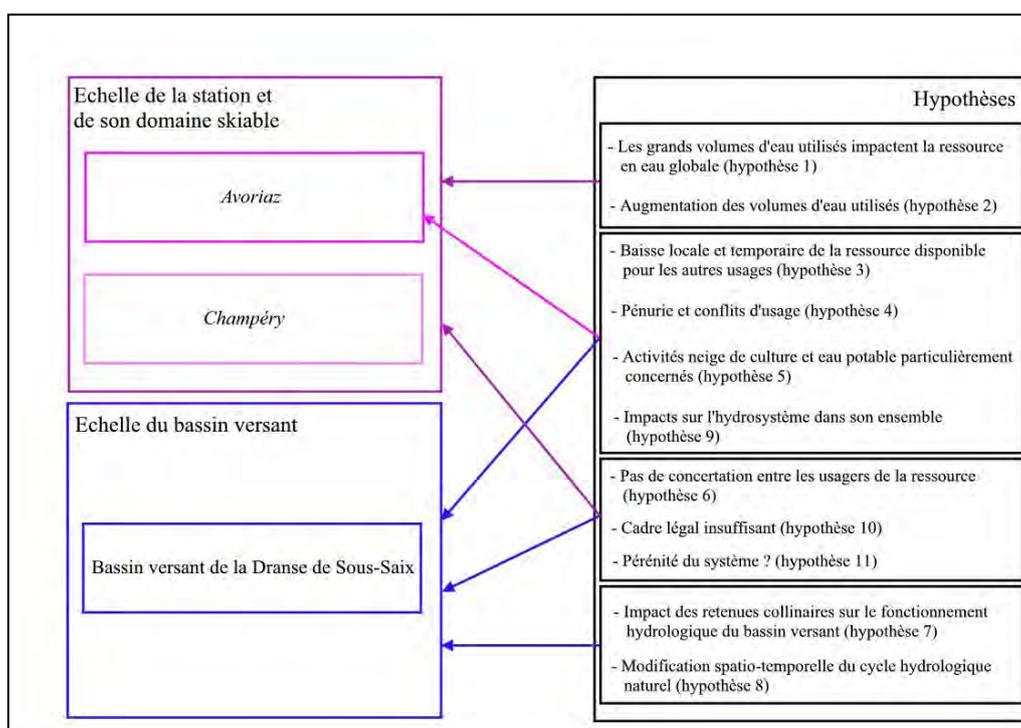
Cet usage récent de l'eau en station de montagne n'est pas encore pris en compte par la législation et les réglementations existantes sur les prélèvements d'eau ne sont pas toujours appliquées.

Il s'agira d'évaluer l'efficacité de la législation existante en France et en Suisse et de comparer ces réglementations, leurs applications et leurs effets sur la production de neige et les prélèvements d'eau. L'intérêt est de définir quelles sont les réglementations qui sont aujourd'hui les plus pertinentes et les plus efficaces, pour limiter les impacts des prélèvements d'eau pour la production de neige sur l'hydrosystème.

- **11^{ème} hypothèse** : la pérennité de ce système se pose surtout en vue du changement climatique annoncé.

La neige de culture est employée en station de sports d'hiver comme un moyen de lutte contre les effets du changement climatique (diminution de la ressource neige). Les conditions climatiques nécessaires à la production de neige ne seront plus réunies pour permettre l'enneigement mécanique des stations (les conditions thermiques en particulier). La question de la ressource disponible sera plus présente car celle-ci risque d'être fortement diminuée. Cette stratégie à court terme n'est pas pertinente, car elle ne permettra pas à long terme de pérenniser le système touristique du modèle tout ski.

Figure. 10 La méthodologie de réponse aux hypothèses.



Toutes ces hypothèses ont été élaborées à partir de discours d'associations de protection de la nature et de lectures de la presse. Ces hypothèses peuvent paraître engagées, mais elles s'inscrivent dans une volonté d'affirmer ou de réfuter ces propos souvent mis en avant dans les débats. Il s'agit de questions d'actualité et de société et il convient d'y répondre le plus objectivement possible.

1.4 ORGANISATION DE LA RECHERCHE

1.4.1 Traitement des données et méthodologie

La complexité de ce sujet et la polémique qu'il suscite depuis quelques années nous amènent à aborder cette analyse sous la forme d'une approche systémique. En effet, dans le but d'avoir une vision globale et objective pour répondre au mieux à la problématique, il était important de prendre en compte tous les éléments ayant un lien plus ou moins évident avec la production de neige. L'approche systémique était la plus adaptée puisqu'elle peut se définir comme suit :

« Ensemble organisé d'interactions entre des éléments ; du grec systema : qui tient ensemble, mais avec l'idée d'union (syn) en un tout organisé voire stable, histani, comportant la racine sta. Un système a une structure, que s'efforce de représenter le schéma de système ou modèle logique généralement sagittal, figurant les éléments (ou boîtes, voire boîtes noires), les liaisons orientées entre ceux-ci, les points de distribution ou d'amplification » (Brunet et al., 2002).

E. Morin et J.-L. Lemoigne (1999) introduisent dans la définition l'homme comme élément du système, ainsi il s'agit d'une *« unité globale organisée d'interactions entre éléments, actions ou individus »*.

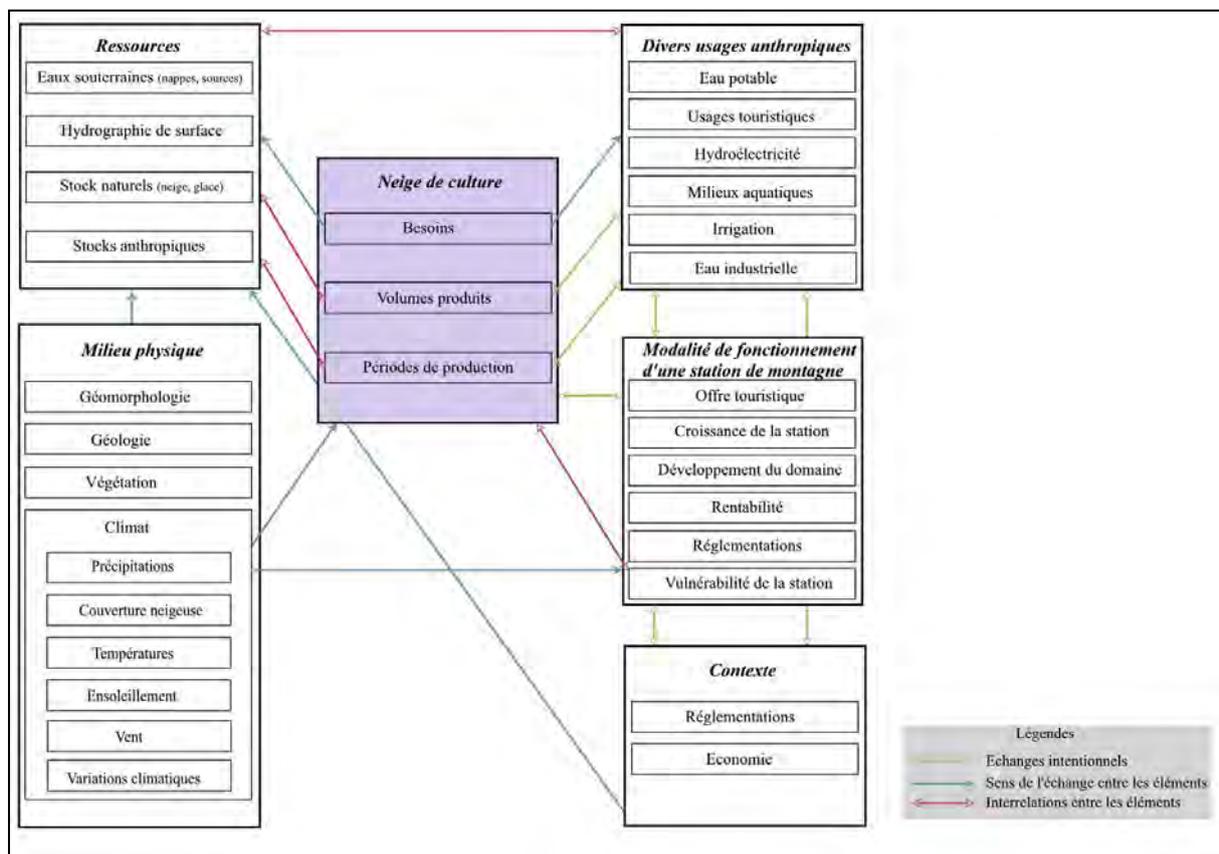
L'adjectif systémique caractérise donc un ensemble organisé ou agissent et interagissent les éléments (De Rosnay, 1975). Cette approche systémique peut se définir selon quatre concepts, le premier étant l'interaction entre tous les éléments du système. Le second est la totalité, car il s'agit bien d'un ensemble d'éléments qui ne peuvent être indépendants les uns par rapport aux autres et sur lesquels on porte une vision globale. Le troisième est l'organisation. Tous les éléments du système sont hiérarchisés et cette hiérarchie nous permet de comprendre le fonctionnement du système. Et enfin, le concept de complexité caractérise à la fois la complexité du système et les incertitudes liées à certains paramètres, voire à l'ensemble des paramètres. Il est difficile d'identifier toutes les composantes d'un système et les interactions qui agissent entre elles. Un système est un ensemble d'éléments interdépendants, c'est-à-dire liés entre eux par des relations telles que, si l'un est modifié, les autres le sont aussi, et par conséquent, tout l'ensemble est transformé (Bernoux, 1985).

Dans le cadre de notre étude, les éléments principaux qui constituent le système sont : la neige de culture, le climat, la ressource en eau, les divers usages et la station de ski (Fig. 11). L'élément « neige artificielle » est le point central de l'étude, il peut être défini à partir de trois sous paramètres (besoins, volumes produits, périodes de production). C'est à partir de ce point central que l'on cherche à définir les liens. Pour chacun de ces éléments existe un sous-système composé de sous-éléments qui viennent complexifier le schéma. Pour l'élément ressource en eau, le sous-système se compose de flux et de stocks naturels sous forme solide (neige,

glace, pergélisol) et sous forme liquide (l'eau souterraine et les nappes, les lacs et l'hydrographie de surface) ainsi que des stocks anthropiques. Le sous-système « climat » se compose quand à lui des paramètres pluviométrie, couverture neigeuse, températures, ensoleillement, vent et variations climatiques. Au même titre que le climat, la géologie et la géomorphologie sont des facteurs importants. Le sous-système « divers usages » se caractérise quand à lui par les divers usages de l'eau dans une station de montagne (eau potable, usages touristiques, hydroélectricité, milieux aquatiques, irrigation, eau industrielle). Enfin le sous système « station de montagne » peut être défini par des paramètres économiques et sociaux (offre touristique, croissance de la station, développement du domaine, rentabilité, réglementation et vulnérabilité de la station). Le réseau de relations entre tous les éléments de ce système et des sous systèmes est particulièrement complexe. On peut prendre l'exemple du climat pour lequel chaque sous-élément, que ce soit la température ou les précipitations, agit sur les possibilités de produire de la neige, mais aussi sur la fonte de ce stock neigeux. On peut également citer la qualité de l'enneigement dont dépend bien souvent la production de neige qui agit indéniablement sur l'offre de la station et sur son développement. A l'inverse, le développement de la station permet la production de neige souvent coûteuse.

Figure. 11 Le système « ressource en eau » d'une station de moyenne montagne.

L'élément central du système a été défini comme étant celui de la neige de culture, également point central de l'étude.



Nous ne nous attacherons pas dans ce travail à décrire de façon méthodique le système de production de neige (méthodes de production, sources d'approvisionnement en eau...) et ses enjeux à l'échelle de la France, car cette approche a déjà été réalisée de façon explicite par P. Paccard dans ses travaux de recherche sur la gestion durable de l'eau en montagne (Paccard, 2010). Il y a développé la problématique de l'enneigement artificiel dans une optique de gestion durable de l'eau en montagne à l'échelle de trois grandes stations de ski du massif alpin. Notre travail se placera davantage dans une approche systémique afin d'appréhender au mieux les diverses répercussions de la production de neige sur l'hydrosystème en s'appuyant sur des données concrètes et des mesures à une échelle plus fine.

Afin de répondre au mieux à la problématique posée au départ, nous avons fait le choix d'établir deux systèmes d'analyse dans lesquels les paramètres seront quasiment les mêmes. (Fig. 12 et Fig. 13) C'est la limite externe des deux systèmes qui varie. Pour le premier système, la limite choisie est celle de la station (Avoriaz et Champéry). Elle se justifie par la volonté d'analyser la ressource en eau dans sa globalité et le poids de l'enneigement artificiel parmi les divers usages d'une station de moyenne montagne. Les limites correspondent donc au cadre économique, social et urbain de la station. Pour le second système, ces limites sont définies à partir du cadre du bassin versant de la Dranse de Sous Saix. Ce choix se justifie par la volonté de mener une étude hydrologique stricto sensu pour laquelle il était nécessaire de connaître le fonctionnement du bassin versant et donc ses frontières. Ces limites sont bien évidemment plus ou moins perméables avec le système extérieur.

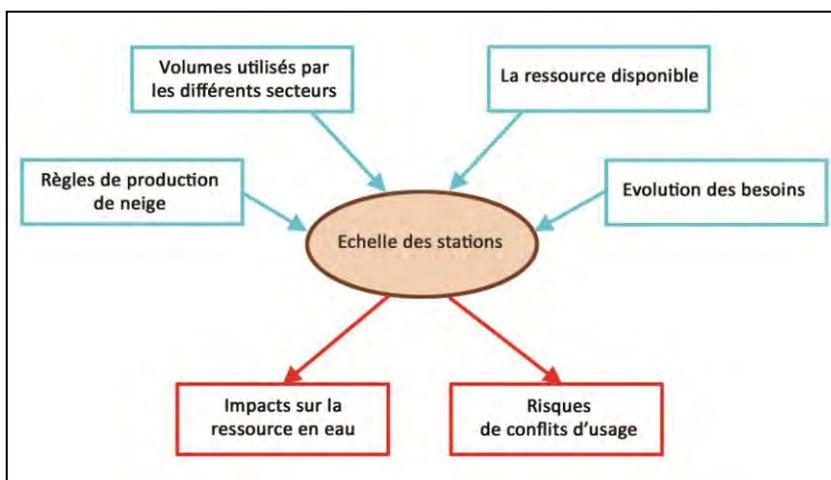


Figure. 12 Le système « ressource en eau » à l'échelle des stations d'Avoriaz et de Champéry.

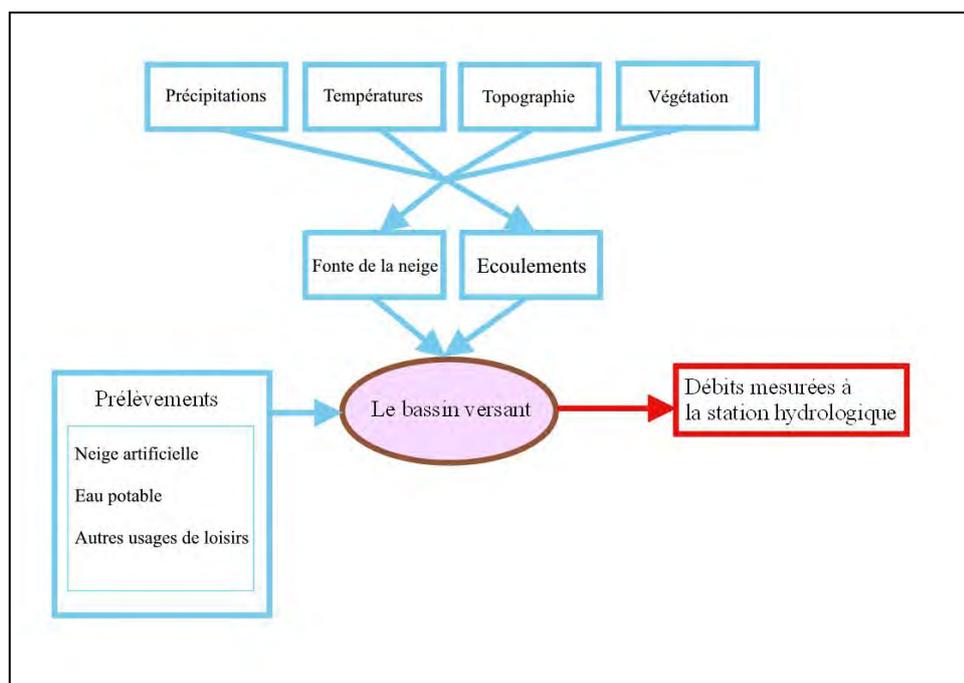


Figure. 13 Le système « ressource en eau » à l'échelle du bassin versant et ses impacts sur le cycle hydrologique.

Cette approche nous permet également de mener cette étude à trois niveaux d'échelle spatiale : l'échelle internationale représentée par la comparaison du fonctionnement pour une station suisse (Champéry) et une station française (Avoiriaz), l'échelle de la station pour une approche approfondie du fonctionnement à Avoiriaz et l'échelle du bassin versant pour une représentation du fonctionnement hydrologique. Cette étude multiscalaire nous paraît la plus pertinente pour avoir une vision globale de la production de neige et de ses conséquences sur le milieu en termes de ressource en eau globale et de fonctionnement de l'hydrosystème.

1.4.2 Méthodes

« Les ressources en eau mondiales ne peuvent pas être protégées et gérées sans que l'on connaisse leur quantité et leur qualité, et les besoins pour la consommation ; il en est de même pour la ressource en eau des montagnes » (Messerli et Ives, 1999). C'est bien là la problématique de notre étude. A l'échelle locale, les stations doivent gérer la ressource pour satisfaire les différents usages ; cependant nous avons mis en avant l'absence d'information et d'échange de données sur les volumes prélevés. Cette absence de transmission des données est pourtant contradictoire avec la volonté de bien gérer la ressource et pose le questionnement de la pertinence et de l'efficacité de la gestion réalisée par les stations. C'est ce à quoi nous tâcherons de répondre par un travail méthodologique et de terrain.

L'étude a débuté par un travail bibliographique à l'échelle internationale, nationale, régionale et locale. Le corpus de documents variés (articles de journaux, magazines, revues scientifiques, ouvrages, thèses...) a permis d'étayer les hypothèses de départ et de faire le point sur les connaissances dans ce domaine.

L'étude de terrain a pour objectif de confronter les hypothèses de départ aux réalités de terrain. Cette recherche s'appuie sur une double approche menée en parallèle sur le terrain à grande échelle, c'est-à-dire sur de petits territoires, la station et le bassin versant.

La première méthode, à l'échelle de la station, consistait à collecter un certain nombre de données pour répondre à la première partie de notre travail de recherche sur les implications de la production de neige sur la ressource en eau et les divers usages. Cela nous a mené à conduire des entretiens avec différents acteurs. Nous avons ainsi rencontré les directeurs et responsables des pistes et de l'enneigement de la société de remontées mécaniques d'Avoriaz (SERMA, Société d'Exploitation des Remontées Mécaniques d'Avoriaz) et de Champéry (Télé Champéry-Les Crosets). Nous avons également contacté la Lyonnaise des eaux, au siège régional, puis local. Le caractère sensible de ce sujet a nécessité la mise en confiance des acteurs passant par la présentation claire et dépassionnée de nos objectifs. Au premier abord, ces entretiens devaient nous permettre de collecter un certain nombre de valeurs et de statistiques sur l'enneigement et l'eau potable. Mais ils nous ont aussi permis de comprendre le fonctionnement des systèmes (interactions entre les différents usages et acteurs...). Ces entretiens se sont également poursuivis auprès de différents acteurs (maire de Morzine, Direction départementale des territoires de Haute-Savoie, Association pour l'indépendance d'Avoriaz, population locale (commerçants et résidents) et touristique (tourisme de ski)). L'objectif de ces entretiens était dans un premier temps d'obtenir des informations et des points de vue sur la production de neige.

Ce sujet impliquant les usages de l'eau ne peut être déconnecté de son environnement hydrologique, climatique et socio-économique, qui en justifie l'approche systémique adoptée. Afin de mieux appréhender les interactions de la pratique de l'enneigement avec son milieu et les différents usages, nous avons aussi collecté les données statistiques climatiques (températures minimales et maximales, températures moyennes journalières, vent, ensoleillement, volume des précipitations totales, hauteurs de neige fraîche) à partir de la base d'information MétéoFrance (Climathèque et centre de climatologie MétéoFrance de Chamonix). Ces données ont ensuite été traduites, par une série de calculs, à l'échelle du bassin versant.

La seconde méthode avait pour objectif de focaliser cette fois-ci le travail à l'échelle du bassin versant. Il s'agissait de quantifier un certain nombre de paramètres du système. Dans ce cadre d'étude et afin de répondre au manque de travaux et d'informations sur ces questions d'enneigement, les données hydrologiques nécessaires à la réalisation de ces travaux (hauteur d'eau, débit, température de l'eau) ont quant à elles été mesurées dans la Dranse de Sous-Saix sur quatre années hydrologiques (octobre 2008 à septembre 2012) grâce à l'installation d'une sonde de mesure hydrologique (Hymadd) et de jaugeages au sel (EasyFlow). (Fig. 14). Ces deux mesures ont été effectuées au niveau du téléphérique des Prodains, à l'aval de la station d'Avoriaz (Fig. 15). La sonde Hymadd a collecté les

données de température de l'eau et de hauteur d'eau au pas de temps horaire. Elle a fonctionné en continu du 1^{er} septembre 2010 au 18 juillet 2012¹. L'appareil EasyFlow nous a permis de réaliser la mesure du débit selon la méthode par dilution de traceur. Le principe général de cette méthode consiste à injecter en un point du cours d'eau une solution concentrée de sel (le traceur). En aval, à une distance suffisamment grande pour que le mélange avec l'eau de la rivière soit bon, la concentration du traceur est mesurée pendant toute la durée de passage du nuage de traceur.

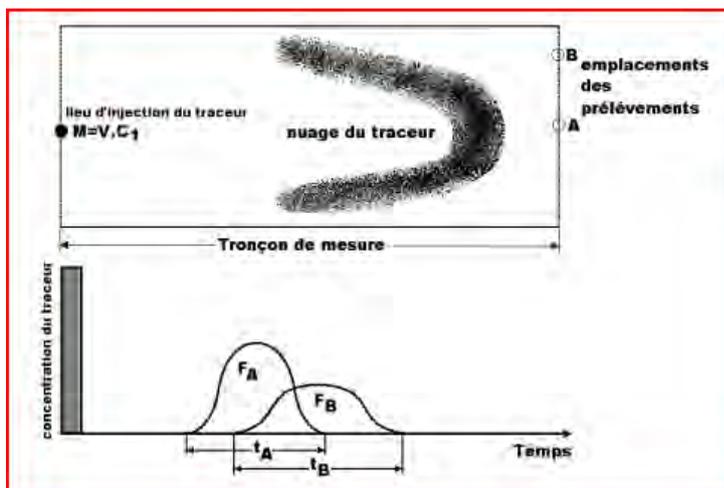


Figure. 14 Schéma du principe du jaugeage au sel (MADD Technologie).



Figure. 15 Sonde Imadd posée dans la Dranse de Sous-Saix en aval de la station d'Avoriaz. Installation en septembre 2008. (Clichés E. Magnier).



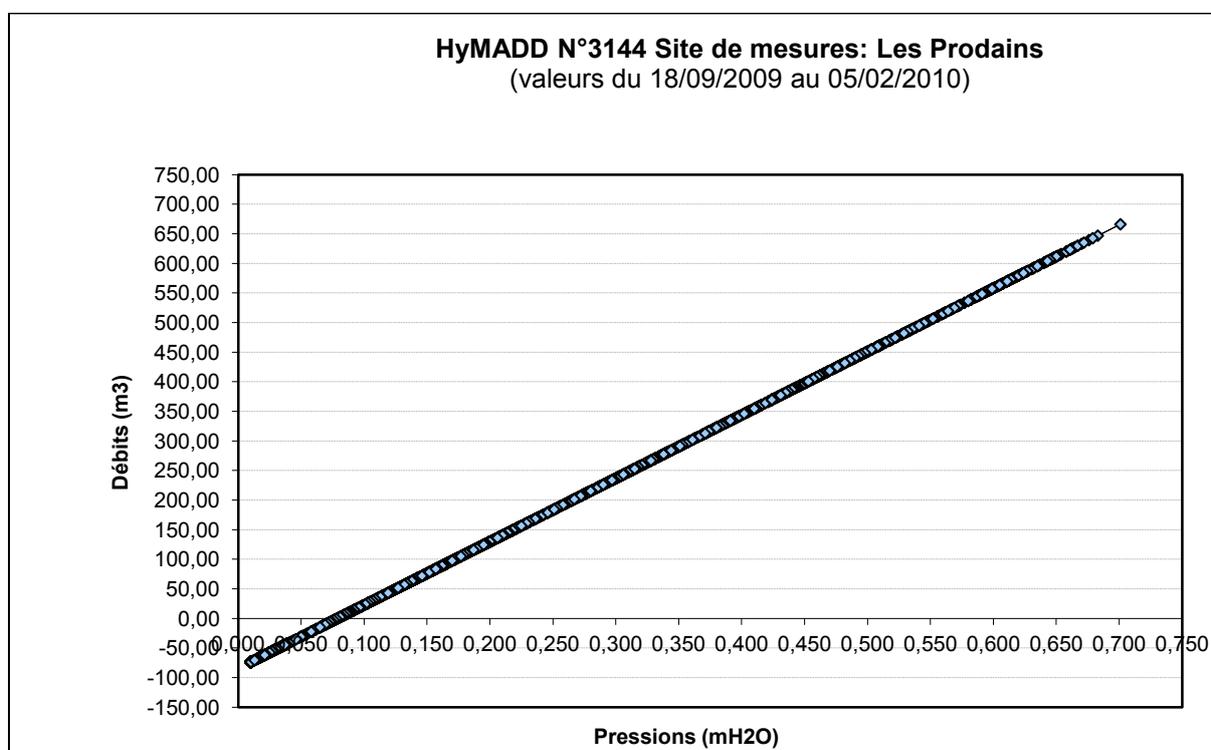
Les jaugeages au sel ont été réalisés ponctuellement avec des mesures étalées sur les trois années d'études de 2010 à 2013. Il était particulièrement important d'effectuer ces mesures dans des conditions d'écoulement différentes (période de

¹ A cette date, la sonde est tombée en panne. L'échantillon des données devait au départ s'étendre jusqu'au 30 septembre 2012.

fonte des neiges, étiage d'hiver, orages estivaux...). Plus le nombre de jaugeages est important, plus les risques d'erreurs dans la réalisation de la courbe de tarage sont faibles. Les courbes de tarage sont réalisées à partir du nuage de points obtenu en plaçant, sur un repère orthonormé, les couples Hauteurs-Débits résultant des jaugeages (en abscisse la hauteur d'eau enregistrée et en ordonnée les débits). Grâce aux jaugeages effectués, la fonction de la courbe de tarage est la suivante (Fig. 16) :

$$y = 070.8 x - 84.56$$

Figure. 16 Courbe de tarage obtenue à partir des données de jaugeage et de la sonde Hymadd.



A partir de la fonction de la courbe, les valeurs de hauteur d'eau mesurées toutes les heures par la sonde Hymadd ont été converties en débit horaire. En raison du nombre important de données, et pour une meilleure lisibilité des résultats, ces valeurs horaires ont été traitées pour être transformées en moyennes, de façon à calculer les débits journaliers et mensuels

Toutes ces observations et mesures sur le terrain nous ont permis de quantifier les volumes d'eau entrant et sortant du bassin versant et prélevés par les divers consommateurs et nous ont ainsi permis de répondre à la seconde question posée, les impacts de la production de neige sur le fonctionnement de l'hydrosystème, en nous appuyant sur des valeurs précises, ce qui constitue une avancée au regard des études déjà réalisées sur la même thématique.

Les nombreux échanges et communications sur ces recherches et les premiers résultats ont permis dans un premier temps de maintenir un climat de confiance avec les différents acteurs présents. Ce climat de confiance était indispensable pour obtenir les informations nécessaires à l'étude. Mais ces échanges ont également permis de faciliter la rencontre entre ces acteurs mais aussi envers un public varié (chercheurs, étudiants, collectivités locales, sociétés privées, population locale et touristique, associations diverses...). Cette difficulté à obtenir des informations a souvent été déplorée dans les travaux de recherche (Dugleux, 2002 ; Paccard, 2010) mais aussi par le président du SNTF, C. Farauto (SNTF, 2008).

Notre thèse devait donc pallier à ces lacunes en diffusant les résultats au fur et à mesure afin de rassurer et d'améliorer les connaissances de chacun dans ce domaine afin de limiter la diffusion d'idées non fondées. On peut citer en exemple, le séminaire sur la gestion de l'eau en montagne, organisé à Morzine en partenariat avec l'université de Lausanne (Fig. 17). Ce séminaire a réuni les acteurs de l'eau en montagne, les acteurs de l'enneigement artificiel, des membres des collectivités territoriales (maires de station et Direction départementale), des scientifiques et des aménageurs.



Figure. 17 Affiche du séminaire organisé à Morzine.

Ces échanges ont été tout aussi intéressants que le travail de terrain, car ils ont permis de nous confronter aux préoccupations concrètes des acteurs dans les stations.

1.4.3 Biais des données et biais de la méthode

Réaliser des mesures fiables en montagne est largement reconnu comme quelque chose de difficile, comme le soulignent B. Messerli et J.D. Ives (1999).

En premier lieu, la difficulté d'accès des sites de mesures et le climat sont deux facteurs qui limitent le rassemblement des données. En effet, la sonde Imadd mise en place dans le cours d'eau ne pouvait plus être atteinte durant la saison d'hiver car recouverte de plusieurs mètres de neige. Quand aux jaugeages dans le cours d'eau, ils n'étaient tout simplement plus possibles, faute de débit suffisant. En effet pour effectuer ces jaugeages il fallait descendre une pente abrupte jusqu'au cours d'eau, mais la hauteur de neige (parfois plusieurs mètres) rendait les conditions trop dangereuses. Par ailleurs, le régime nival de la Dranse de Sous-Saix implique des débits nuls durant plusieurs semaines en hiver.

La question de la fiabilité des données doit également être soulevée. Ces mêmes conditions climatiques posent la question de la fiabilité des mesures effectuées par les instruments. Toujours pour la sonde Imadd, les grandes variations de débit observées durant l'année (cours d'eau à sec une partie de l'année, hausse rapide et importante du débit lors des orages) posent la question de la validité des données enregistrées par la sonde. De plus, les enregistrements ont été réalisés sur une courte durée (quatre ans), ce qui est un frein à la représentativité objective des résultats.

Concernant les données recueillies auprès des divers organismes, deux questions se posent. La première concerne la fiabilité des données mesurées, notamment des données de précipitations et de hauteur de neige relevées par MétéoFrance et les sociétés de remontées mécaniques. La neige recueillie dans le collecteur peut rester un certain temps sous les influences extérieures comme le rayonnement solaire ou le vent avant d'être comptabilisée, ce qui peut engendrer des sous-estimations importantes de l'équivalent en eau (Leblanc, 2001). Les ordres de grandeur des erreurs par défaut sont les suivants (Leroy, 2000):

-10 % pour des vents de 2 m/s ;

-30 % pour des vents de 5 m/s ;

-45 % pour des vents de 10 m/s ;

-80 % pour des vents de 20 m/s.

Le vent est connu comme étant l'élément dominant pour l'accumulation et la distribution de la neige sur le territoire alpin (Sevruk, 1997). Le vent va aussi redistribuer la neige, créant des amas neigeux bloqués par des barrières ou des

constructions et balayant les zones à découvert. Les hauteurs mesurées ne sont donc pas toujours représentatives. La deuxième question posée est celle de la fiabilité des entretiens et données obtenues lors de ces entretiens. Il a été très difficile de gagner la confiance de certains acteurs afin d'obtenir un certain nombre de chiffres pour l'étude. Les points de vue de ces différents acteurs ne sont bien souvent pas objectifs et sont biaisés par les besoins de chacun, les conditions de travail et les objectifs de la société à laquelle ils appartiennent. Il a donc été difficile de rester le plus objectif possible dans la rédaction des comptes-rendus de ces différentes rencontres. Il est important de préciser que certaines données qui nous ont été transmises avaient été notées quotidiennement à la main ; là encore se pose la question de la fiabilité de ces chiffres, car dans ces conditions, une erreur est tout à fait possible.

Il est essentiel de mettre en avant le manque évident de données aussi variées qu'elles soient (hydrologiques, consommation en eau, climatiques) induites par le peu de stations de mesures (postes MétéoFrance et MétéoSuisse, instruments de mesure utilisés par les différents organismes) et la transmission de données que ce soit à l'échelle locale (mairie), à l'échelle régionale, cantonale ou nationale (Agence de l'eau, Direction Départementale de l'Équipement pour la France et Confédération suisse, Service cantonal de l'aménagement du territoire pour la Suisse...). A une époque où la demande en eau est de plus en plus forte et variée, il est étonnant de voir que dans la majorité des cas, les sociétés ou les collectivités territoriales ne sont pas capables d'estimer la ressource et de quantifier les prélèvements. Pourtant, il est indispensable d'estimer la ressource en eau pour gérer le stock d'eau disponible et éviter les catastrophes (pénurie d'eau, coupure d'eau potable, conflits).

Conclusion chapitre 1

L'objectif de ce premier chapitre était d'exposer et de définir les principaux termes utilisés pour répondre à la problématique de départ. Ainsi les notions de neige de culture et de neige artificielle ont été définies et nous ont permis de constater une certaine dualité non seulement dans le choix de la sémantique mais aussi et surtout au sein des différents acteurs présents dans une station de montagne. Les concepts de ressource en eau, d'hydrosystème et de gestion de la ressource ont ensuite été définis. Et enfin la notion de territoire de montagne a été expliquée.

Un deuxième objectif était de décrire les motivations et les objectifs de la recherche. Cette recherche s'insère dans la volonté de répondre aux accusations et aux critiques formulées par les associations de protection de l'environnement et les médias et d'infirmer ou de confirmer ces propos. L'objectif principal de la recherche est de mettre en avant d'éventuels impacts de la fabrication de neige sur la ressource en eau d'une station de moyenne montagne et sur l'hydrosystème. Le second objectif est de quantifier le poids de la production de neige sur la ressource en eau parmi les divers usages de l'eau. Et le dernier objectif est de caractériser ces impacts sur les hydrosystèmes. Pour répondre à ces divers objectifs, la question posée au départ était la suivante : quels sont les impacts de l'utilisation de la neige de culture sur la ressource en eau ?

Plusieurs hypothèses ont été élaborées à partir d'un travail bibliographique à plusieurs échelles et de premières observations sur le terrain, présentés dans ce chapitre. Ces hypothèses constituent le point de départ de la recherche.

Pour répondre à la question posée, l'approche systémique a été choisie en étudiant deux systèmes aux caractéristiques similaires. Le premier système a été celui de la station (Avoriaz et Champéry) et le second celui du bassin versant. Une série d'enquêtes sur le terrain, de recueils de données et de mesures à partir d'instruments permettent de quantifier les différents éléments et les flux des deux systèmes d'analyse. Ce chapitre a également permis de souligner la difficulté d'obtenir des données, ce qui est lié à la tension existant autour de cette thématique. Cette difficulté a été renforcée par les contraintes naturelles relatives à un espace montagnard (climat et topographie) qui n'ont pas toujours facilité la prise de mesures. La question de la fiabilité des mesures et des données a d'ailleurs été mentionnée à plusieurs reprises.

Après avoir défini les concepts et précisé les objectifs de notre recherche et la méthodologie adoptée, il nous faut désormais décrire et expliquer le principe de production de la neige ; c'est l'objectif de notre prochain chapitre.

CHAPITRE 2. L'ENNEIGEMENT ARTIFICIEL

Introduction chapitre 2

Après avoir décrit le contexte théorique de notre recherche et la méthodologie, il est important de définir le cadre de cet usage qu'est l'enneigement artificiel.

Dans un premier temps nous analyserons les modalités de l'enneigement artificiel, c'est-à-dire le fonctionnement d'un canon et plus généralement d'un réseau d'enneigeurs. Puis, pour comprendre le fonctionnement de ces canons, nous définirons les conditions de production, que ce soit les conditions climatiques nécessaires ou bien les modes et les lieux de prélèvement. Il s'agit de montrer l'intérêt de cet outil pour les stations, d'un point de vue économique et touristique.

Dans un second temps, l'historique de cette pratique sera abordé afin de mieux comprendre les objectifs et les intérêts de chacun et de porter un regard neutre sur cette pratique. Les stations équipées et les surfaces enneigées artificiellement n'ont cessé de croître ces dernières années. Nous ferons le point sur la situation en France, en Suisse et à l'échelle de l'arc alpin en prenant également d'autres exemples de stations dans le monde. Le changement climatique et les tendances d'évolution dans les années à venir seront également abordés.

Enfin, nous nous attacherons à décrire les raisons d'enneiger mécaniquement. La montagne est à la fois un espace de développement économique et un espace environnemental à protéger. Ces deux intérêts semblent être les deux principales sources de conflits. Cette dernière partie a pour objectif d'identifier les différents acteurs et les différentes parties prenantes impliquées. Le point de vue de chacun et les arguments avancés seront expliqués avec le plus d'objectivité possible. Cette analyse s'appuie sur les différents documents publiés dans les journaux, les revues et sur internet mais aussi sur de nombreux entretiens.

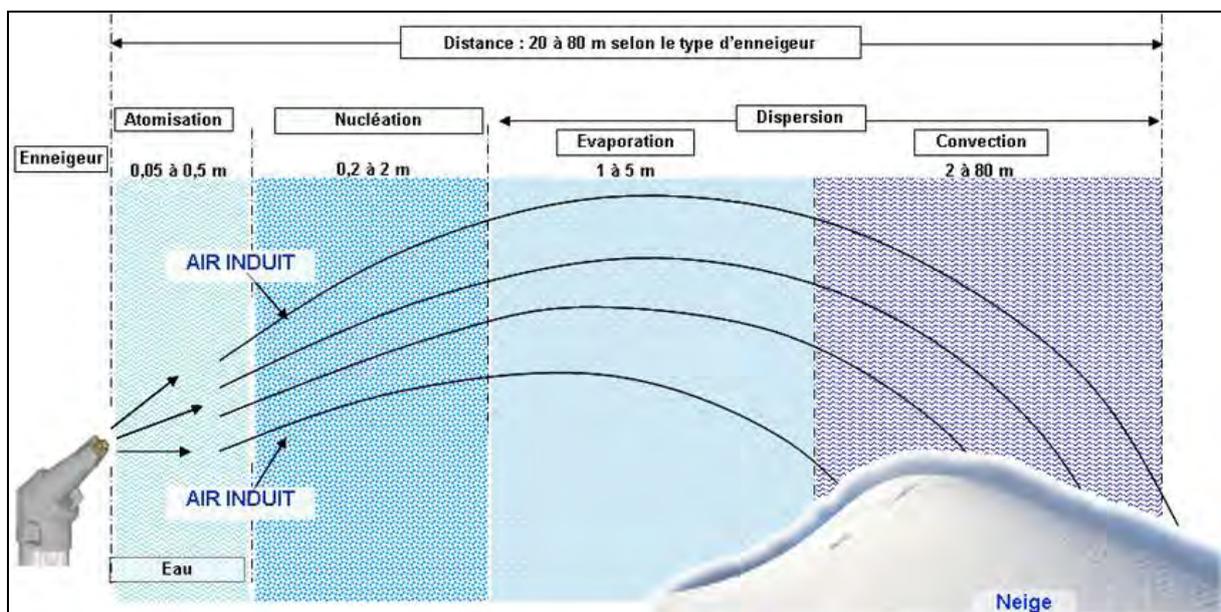
2.1 LES MODALITES DE L'ENNEIGEMENT

Le principe de fonctionnement d'une installation de production de neige est régulièrement expliqué par la SNTF au travers de publications internet et de brochures distribuées en station. Ce principe a également été développé de nombreuses fois dans les diverses recherches sur cette thématique (CIPRA, 2004 ; Paccard, 2010). Il est cependant nécessaire de faire le point sur ces principes de fonctionnement dans le cadre de cette recherche dont le thème central est l'enneigement artificiel.

2.1.1 Le fonctionnement d'un canon

Le principe de fabrication de la neige est relativement simple. Il consiste à pulvériser dans un air ambiant froid de l'eau sous pression (10 à 40 bars) à basse température (-2 à -3°C). En même temps, de l'air froid (-30°C) est projeté afin que les gouttelettes d'eau cristallisent et s'agglomèrent. Le phénomène ici appliqué est celui de la détente adiabatique sur de l'eau vaporisée. Plusieurs étapes sont nécessaires depuis la pulvérisation de l'eau jusqu'à la formation du flocon de neige (Fig. 18)

Figure. 18 Schéma des différentes phases de production de neige. (SNTF, 2002).



La première étape est celle de l'atomisation : l'eau est pulvérisée dans un petit orifice et forme de micro gouttelettes d'eau qui sont envoyées dans l'air ambiant.

La nucléation. Cette étape consiste à mélanger de l'eau et de l'air sous pression, avec une infime quantité d'eau. Le peu d'eau va, avec la pression de l'air, s'atomiser

en de minuscules particules. Au contact de l'air froid, ces particules vont geler. Ces premiers microcristaux sont nécessaires pour que les fines gouttelettes puissent s'agglomérer par la suite.

L'insémination. Les deux jets se rencontrent, le jet de noyaux de nucléation et le jet d'eau. Cette rencontre se fait à l'intérieur du canon pour les systèmes à basse pression et à la sortie du canon pour les installations à haute pression. Les gouttelettes formées à l'étape 1 vont se solidifier en présence des noyaux de nucléation.

La dispersion. Elle se décompose en deux étapes. L'évaporation commence. Une partie de l'eau s'évapore en surface, ôtant de la chaleur aux zones environnantes ; de ce fait, une autre partie des gouttelettes refroidit et se congèle. La gouttelette échange alors de la chaleur avec l'air ambiant (convection) et tombe au sol sous forme de petits cristaux et conglomérats de glace, ce qui forme la neige artificielle. Plus l'air est froid, plus la production de neige sera performante.

Depuis le canon jusqu'au sol, les gouttelettes peuvent parcourir entre 20 et 80 m suivant le type de canon.

Il existe à ce jour deux technologies d'enneigeurs, les monofluides (système à basse pression) et les bifluides (système à haute pression). En réalité, les termes de haute et basse pression ne sont pas exacts. Les monofluides, à savoir les systèmes à basse pression, requièrent souvent une plus grande pression de l'eau que les systèmes à haute pression pour obtenir de la neige.

- Les monofluides. (Fig. 19 et Fig. 20)

Figure. 19 Canon monofluide monté sur bras amovible. (Cliché : Hiver 2007. E. Magnier).

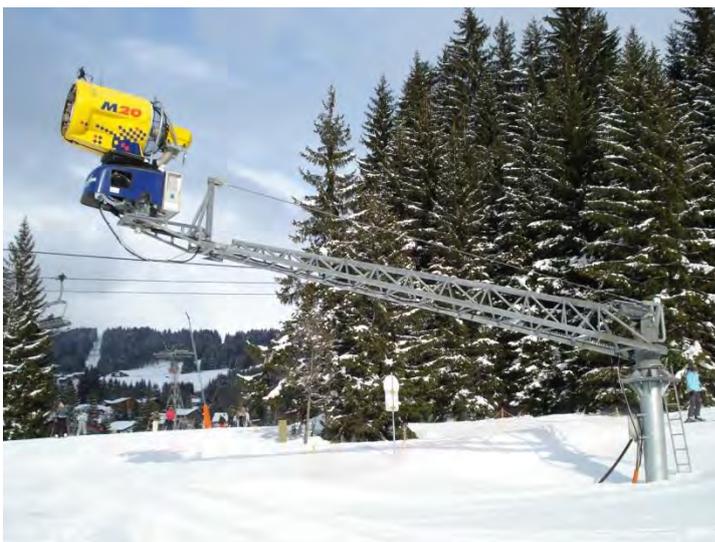


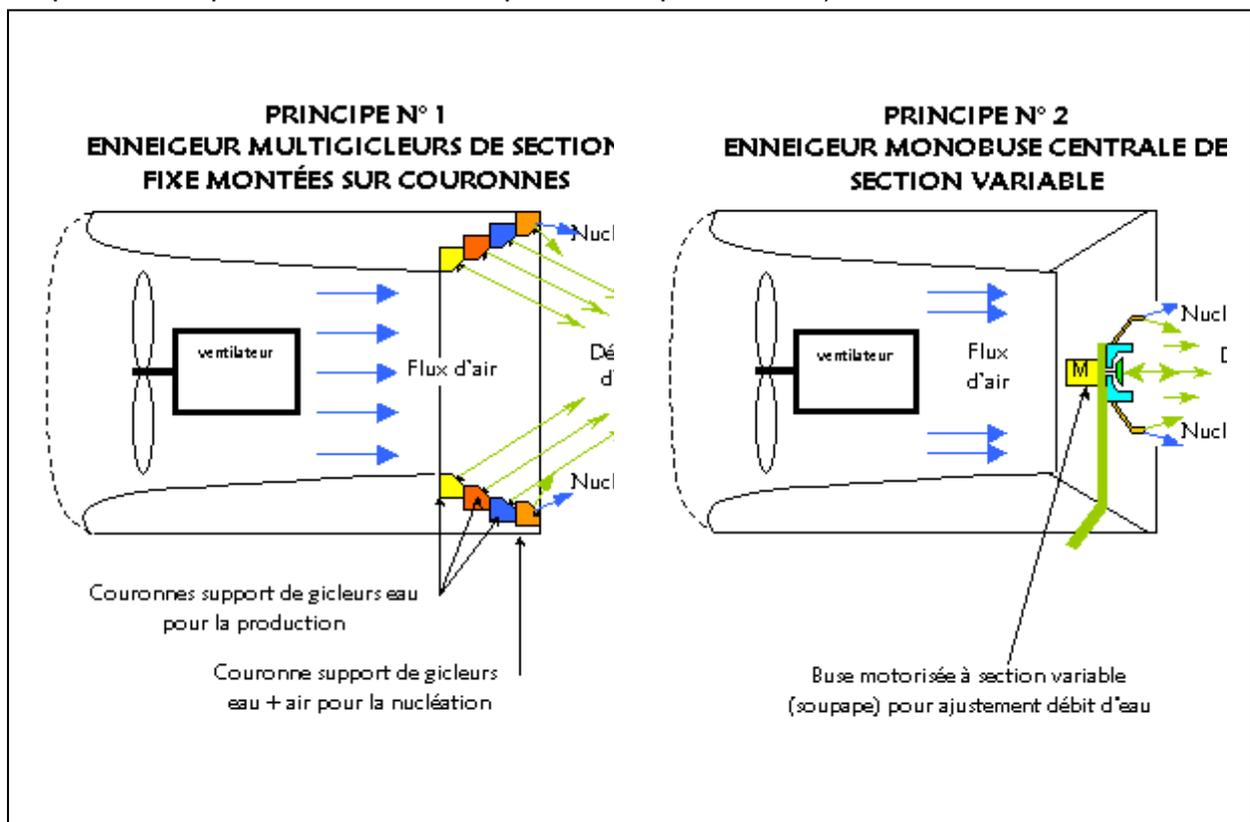
Figure. 20 Canon monofluide monté sur roues. Champéry printemps 2011. (Cliché E. Avril 2011, Magnier).



Les systèmes monofluides sont appelés ainsi car ils ne nécessitent que l'arrivée d'un seul fluide, l'eau sous pression, l'air étant fourni par un ventilateur. Ces enneigeurs sont en règle générale montés sur des supports mobiles (châssis avec roues ou luge). Ils peuvent être également implantés en hauteur sur des mâts de 4 à 6 mètres ou sur des bras articulés. Leur fonctionnement peut être manuel, autonome (automatisme embarqué) ou dépendant d'un système de gestion centralisé.

L'eau arrive sous pression (10 à 65 bars) et est pulvérisée au moyen de multiples gicleurs de section fixe ou variable disposés en général sur une ou plusieurs couronnes (principe 1) ou au moyen d'une buse centrale (principe 2) (Fig. 21).

Figure. 21 Les enneigeurs monofluides multigicleurs (principe 1) et monobuses (principe 2). (Source : Site internet de l'ANPC : <http://www.anpnc.com/recueil/Chapitre%205-p52-56.htm>).



Un flux d'air produit par un ventilateur électrique (10 à 25 kW) propulse les gouttelettes ainsi formées. La nucléation indispensable à la cristallisation des gouttelettes est produite séparément. Un gicleur spécifique utilisant de l'air et de l'eau sous pression (l'air comprimé est produit par un compresseur embarqué de 3 à 5 kW) permet la formation de ces noyaux qui sont ensuite propulsés dans le jet principal.

L'avantage du système monofluide est sa capacité de production. Le débit de neige de -4° à -10°C peut atteindre 60 m^3 pour les monobuses contre 40 m^3 au maximum

pour les autres canons. Les monobuses sont très appréciés pour leur simplicité et leur fiabilité. Les multigicleurs sont quand à eux très appréciés pour leur besoin en pression d'eau faible et leur capacité de démarrage en marginal (température proche de la limite de production). Les monofluides sont en revanche pénalisés par leur poids, leur encombrement, leur prix, le travail important de réglage et la maintenance nécessaire. Le monogicleur est de plus sensible à la pression d'eau et le multigicleur est sensible à la qualité de l'eau chargée (turbidité). Ils sont également très sensibles à la congélation du ventilateur lors de températures extérieures négatives.

Mais ce sont avant tout des canons très mobiles (montés sur des roues ou patins) qui permettent de limiter l'impact visuel dans l'espace (ils peuvent être rangés après utilisation) et également d'enneiger des espaces où les canons fixes pourraient difficilement être implantés (centre-ville des stations ski aux pieds comme Avoriaz).

- Les bifluïdes (Fig. 22)

Figure. 22 Bifluïdes sur le domaine de Morzine Pleney. (Cliché : Printemps 2009, E.Magnier).



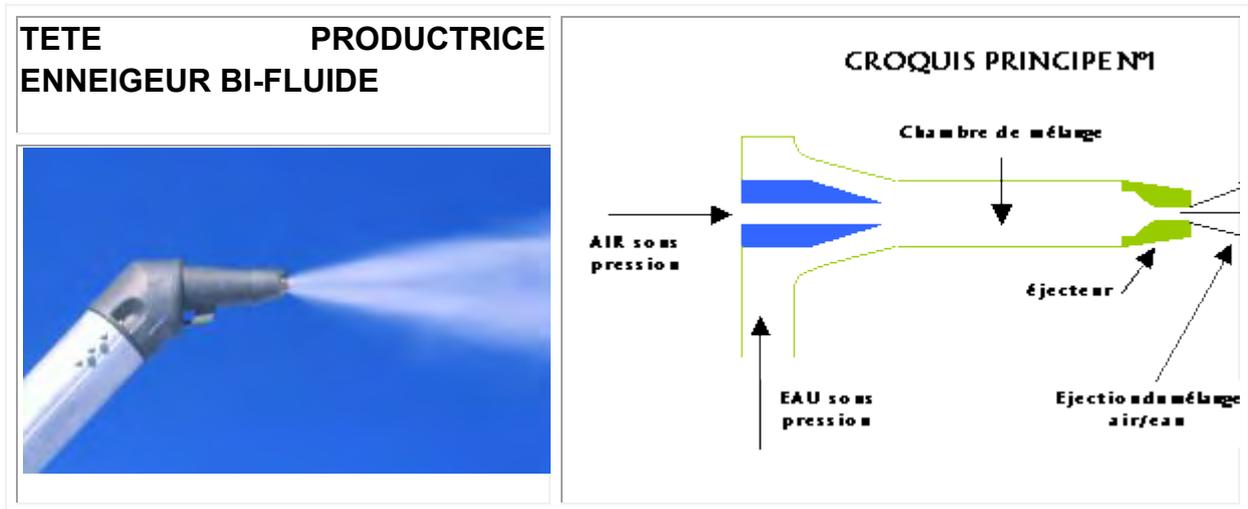
Ils sont appelés ainsi car ils utilisent deux flux, un flux d'eau sous pression et un flux d'air comprimé. Ils sont toujours fixes et montés sur de grandes perches disposées en bordure de piste. Ce sont les enneigeurs les plus couramment utilisés en France. Ils peuvent être implantés au-dessus du niveau du sol (3 m) ou en hauteur (perche de 6 à 12 m). Ils sont généralement associés pour leur fonctionnement à un système de pilotage à distance.

Il existe deux principes de fonctionnement.

Le premier principe est celui du mélange interne (Fig. 23). L'air et l'eau sont introduits sous pression (6 à 12 bars) dans une chambre de mélange. La détente de l'air à la sortie de la chambre ainsi que son refroidissement produisent la fragmentation de l'eau à la sortie de l'éjecteur ainsi que des germes de nucléation. La production de

l'enneigreur sera proportionnelle au débit d'eau, lequel peut être modulé par une vanne de réglage.

Figure. 23 Les canons bifluides à mélange interne. (Source : ANPC : <http://www.anpnc.com/recueil/Chapitre%205-p52-56.htm>).

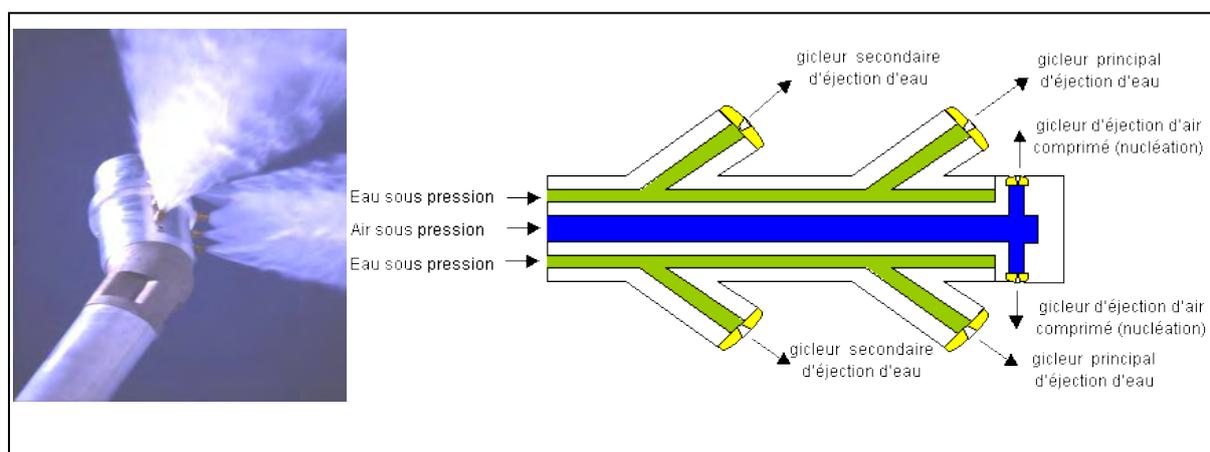


Ces types de canon possèdent une tête productrice.

Ce type d'enneigreur possède de nombreux points négatifs ; il est très consommateur en air comprimé, son niveau sonore est élevé (de 68 à 72 dB à 50 m de face contre 63 dB maximum pour les autres canons) et les températures d'eau élevées altèrent ses performances. Il est par contre très apprécié pour sa régulation linéaire du débit garantissant une qualité de neige constante.

Le second principe est celui du mélange externe (Fig. 24). Un à plusieurs gicleurs entraînent la pulvérisation de l'eau sous pression (15 à 65 bars). L'air comprimé est expulsé séparément de l'eau par des gicleurs spécifiques. Par la détente de l'air et son refroidissement, il se forme des germes de nucléation au contact du flux d'eau.

Figure. 24 Les canons bifluides à mélange externe. (Source : Site internet de l'ANPC : <http://www.anpnc.com/recueil/Chapitre%205-p52-56.htm>).



Ces canons se caractérisent par la présence d'une tête à multigicleurs.

Ce type d'enneigreur a une forte dépendance à la pression de l'eau (surtout dans les faibles températures), à la température de l'air (-5°C contre -2 à -3°C pour les autres canons). En revanche, son rapport énergétique est un avantage.

Les bifluïdes sont très appréciés pour leur facilité d'exploitation (légèreté, simplicité, fiabilité), leur prix peu élevé et la faible maintenance nécessaire.

À l'origine, les deux systèmes étaient utilisés exclusivement près du sol mais aujourd'hui, ils sont parfois montés sur de grandes perches qui offrent une plus longue distance de projection des cristaux de neige.

Les canons les plus récents sont capables de produire plusieurs types de neige : sous-couche, neige molle... Néanmoins, la neige naturelle et la neige de culture se caractérisent par une différence de densité. En effet, la neige fraîche pèse entre 50 et 100 kg/m³ (soit une densité de 0,05 à 0,1), alors que la neige de culture est plus dense et pèse de 400 à 500 kg/m³ (soit une densité de 0,4 à 0,5). Il faut préciser qu'au-delà de 500 kg/m³, le skieur a l'impression de glisser sur de la glace, ce qui est très désagréable.

Une troisième technologie existe pour fabriquer de la neige ; il s'agit du système Frigo-France (Fig. 25). Ce système permet de s'affranchir des conditions climatiques grâce à la production de neige sous une tente, quelle que soit la température extérieure de l'air. Ce système est très peu utilisé car il est très onéreux et très contraignant au sein d'un domaine skiable (fabrication de neige sur de petites surfaces, espace fermé au ski pendant la production). Dans la même idée, il existe également des cryo-canons et des canons à glace. Ces deux systèmes sont utilisés pour fabriquer de la neige à des températures supérieures à 0 °C, mais, en raison de leur coût, ils ne sont pas employés pour l'enneigement de grandes surfaces ; ils le sont pour des événements spéciaux comme le tournage de films. Quand aux additifs, utilisés dans certains pays, ce sont des produits à base de protéines végétales qui permettent de produire de la neige à des températures plus élevées. En effet, une bactérie appelé *Pseudomonas syringae*, facilite la cristallisation de noyaux dès -2°C. Le produit le plus connu parmi tous ceux existants est le Snomax (Fig. 26). Ces produits ne sont actuellement pas utilisés en France et ne le sont plus en Suisse. Mais à ce jour, aucune loi n'interdit ou ne réglemente l'utilisation d'adjuvants ; cependant les exploitants de domaines skiables se sont engagés depuis 2005 à ne plus utiliser ce type de produit.

Figure. 25 Tente à neige au stade de France en 2007.
(Cliché : Décembre 2010, E. Magnier)



Figure. 26 Vente de Snowmax en Espagne.
(Source : <http://www.losproductosnaturales.com>)

2.1.2 Les conditions climatiques de production

Plusieurs paramètres doivent être réunis pour que la production de neige soit possible :

- De l'eau froide mise sous pression pour alimenter les canons (environ 1 m³ d'eau pour 2 m³ de neige). Si l'eau a une température de 1 ou 1,5° C, la cristallisation sera plus rapide que si celle-ci atteint 5 à 6° C. Mais l'utilisation de coupe pression et le frottement des molécules dans les conduites tendent à réchauffer légèrement la température de l'eau, ce qui diminue proportionnellement la qualité de neige qui sera dès lors plus humide.
- De l'air comprimé.
- Une température ambiante de l'air négative. Si la température de l'air est supérieure à -1°C, la production ne peut se faire (une température supérieure, à -1°C est trop proche du point de fusion et confère un risque trop important pour les gouttelettes de ne pas se cristalliser). Lorsque le ciel est couvert, l'air se réchauffe légèrement (effet de serre), ce qui peut empêcher la cristallisation.

Plus la température de l'air ambiant se rapproche de 0°C, plus la production d'air comprimé doit être importante (Fig. 27).

- Une faible humidité de l'air. Les conditions idéales correspondent à une hygrométrie de l'air inférieure à 50 %. Même s'il est possible de produire de la neige à partir de -2°C humide (-2°C sec et 100 % d'hygrométrie) avec les canons les plus modernes, la qualité de la neige sera mauvaise dans de telles conditions. Car dans le cas d'une saturation hygrométrique de l'air, les gouttelettes n'arriveront pas à se cristalliser et tendront à geler en éclaboussant le sol. La neige alors très humide se transformera en tapis de glace. A l'inverse, en cas de taux d'hygrométrie très bas (de l'ordre de 30 à 40 %), il sera possible de fabriquer de la neige à plus de 0°C .

Figure. 27 Les besoins en air pour la production de neige. (Badré et al., 2009).



Les besoins en air sous pression varient fortement en fonction de la température humide de l'air ambiant.

- Un vent faible pour éviter la dispersion trop importante des cristaux de neige fraîchement formés.

Les enneigeurs actuels permettent une mise en route à partir d'une température humide de l'air ambiant inférieure à -4°C pour la technologie bifluide et inférieure à -2°C pour la technologie monofluide. D'après une enquête, ces conditions ne sont que très rarement réunies ; dans la réalité, les professionnels estiment qu'ils ne disposent que de 500 à 600 heures de fonctionnement par saison (T. Champion, 2002). Mais la température de l'air n'est pas le seul paramètre qui conditionne la production de neige ; il faut également tenir compte de l'humidité de l'air. En croisant

ces différentes données, on peut observer trois périodes : la première correspond aux phases où il n'est pas possible de produire de la neige (températures sèches supérieures² à 4°C ou taux d'hygrométrie trop important (100 % avec une température de -2°C) ; la seconde correspond à des périodes de production de neige de qualité moyenne (températures sèches comprises entre -6°C avec 100 % d'hygrométrie et 3°C à 10% d'hygrométrie) ; et enfin une dernière période de production optimale (températures humides³ inférieures à -6.5°C) (Tab. 1).

La fabrication de neige est donc un exercice complexe pour lequel les conditions de température et d'humidité sont très importantes.

Tab. 1 Les températures idéales pour la fabrication de neige. (Source : <http://www.ilneige.net/meteo.html>).

Tableau des températures humides											
Bonne qualité		La neige est de tres bonne qualité quand la température humide est en dessous de -7°C									
Qualité moyenne		Entre -3 et -6°C température humide il est possible de faire de la neige. Elle a un aspect humide mais est idéale pour faire un sous couche stable.									
Pas de neige		Au dessus de -3 °C température humide il est impossible de faire de la neige.									
Temp seches (°C) \ Humidité	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	
-9	-12,16	-11,8	-11,44	-11,08	-10,74	-10,38	-10,02	-9,68	-9,34	-9	
-8	-11,36	-10,98	-10,6	-10,22	-9,84	-9,46	-9,1	-8,72	-8,36	-8	
-7	-10,58	-10,16	-9,76	-9,36	-8,96	-8,56	-8,16	-7,76	-7,38	-7	
-6	-9,8	-9,36	-8,92	-8,5	-8,06	-7,64	-7,22	-6,82	-6,4	-6	
-5	-9,02	8,56	-8,1	-7,64	-7,2	-6,74	-6,3	-5,86	-5,42	-5	
-4	-8,26	-7,76	-7,28	-6,8	-6,32	-5,84	-5,38	-4,9	-4,44	-4	
-3	-7,5	-6,98	-6,46	-5,96	-5,44	-4,94	-4,44	-3,96	-3,48	-3	
-2	-6,76	-6,2	-5,66	-5,12	-4,58	-4,04	-3,52	-3	-2,5	-2	
-1	-6,02	-5,44	-4,86	-4,28	-3,72	-3,16	-2,6	-2,06	-1,52	-1	
0	-5,3	-4,68	-4,06	-3,46	-2,86	-2,26	-1,68	-1,12	-0,54	0	
1	-4,58	-3,92	-3,26	-2,62	-2	-1,38	-0,76	-0,16	0,42	1	
2	-3,86	-3,16	-2,48	-1,8	-1,14	-0,5	0,14	0,78	1,4	2	
3	-3,16	-2,42	-1,7	-1	-0,3	0,38	1,06	1,72	2,38	3	
4	-2,46	-1,68	-0,92	-0,18	0,56	1,26	1,98	2,66	3,34	4	
TEMPERATURE HUMIDE (Chiffres en noir) en °C : C'est la température enregistrée par un thermomètre ou le bulbe est recouvert d'une mèche imprégnée d'eau. Les températures humides sont toujours inférieures aux températures sèches et le seul cas où elles sont identiques est avec une humidité relative à 100%.											

Plusieurs paramètres sont croisés (températures sèches, humidité de l'air). C'est donc la température humide de l'air qui définit la possibilité de produire de la neige et la qualité de neige produite

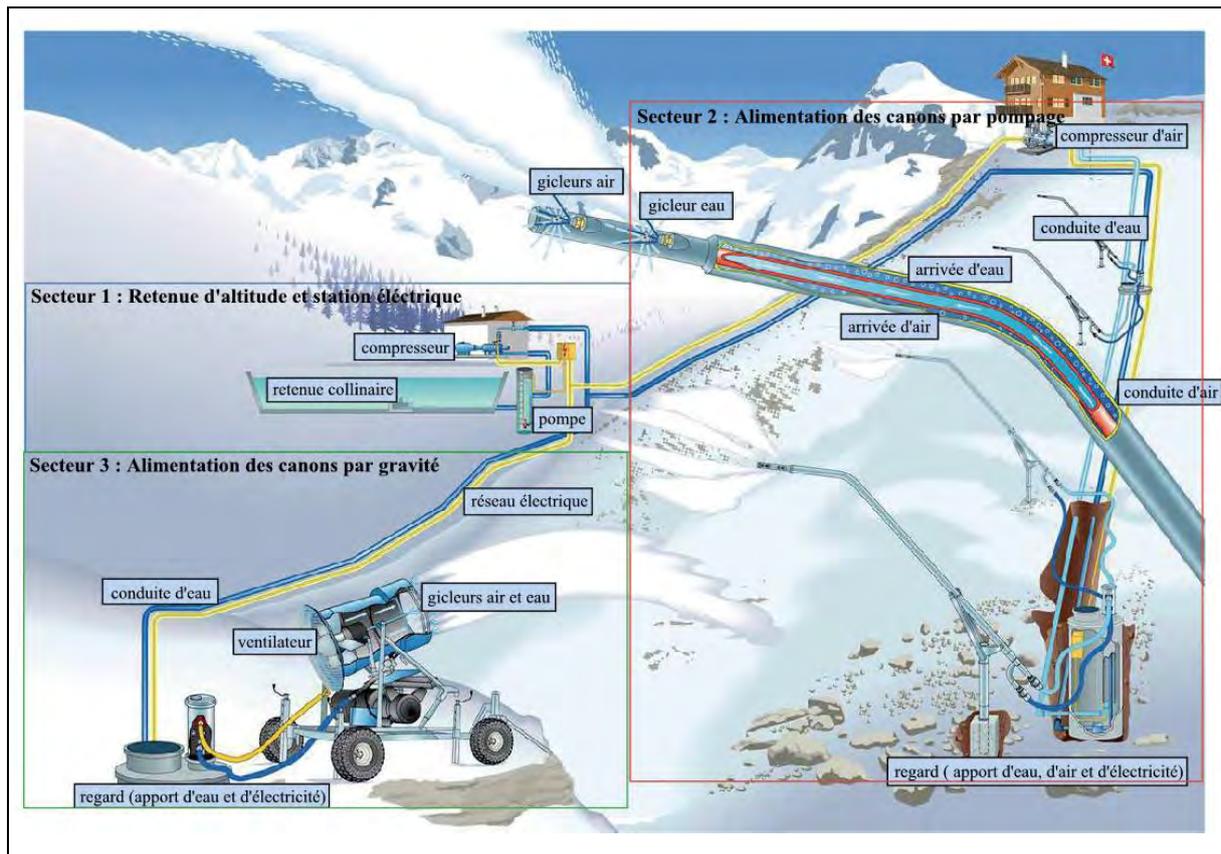
² Valeur indiquée au thermomètre ordinaire à l'abri du rayonnement.

³ Valeur qui met en relation la température sèche de l'air et son pourcentage d'humidité relative

2.1.3 Le fonctionnement d'un réseau d'enneigeurs

Les canons à neige ne sont que la partie visible du réseau d'enneigement (5 à 20 % des coûts en termes d'investissement). Celui-ci se compose de nombreux autres éléments tout aussi importants pour le bon fonctionnement de l'installation (Fig. 28).

Figure. 28 Schéma de l'installation du réseau d'enneigeurs. (D'après P. Paccard , 2010 (modifié)).



Celui-ci se compose de 3 secteurs : un premier secteur d'alimentation en énergie (retenue collinaire et station électrique), un second secteur d'alimentation des canons bifluïdes par pompage associé à un réseau de canalisations (eau, air et électricité) et un dernier secteur d'alimentation par gravité des monofluïdes associé à un réseau de canalisations (eau et électricité).

Dans l'ordre du départ de l'installation à la sortie du canon les éléments sont :

- Prises d'eau et réservoirs d'eau (qui seront détaillés au point 2.2)
- Pompes
- Bâtiments (poste de commande, bâtiments de fourniture d'électricité)
- Installation de fourniture d'énergie et câbles. L'énergie provient d'un local appelé poste électrique à partir duquel l'énergie est distribuée aux enneigeurs au moyen de câbles enterrés.

- Système de canalisation (pour l'eau, l'air et l'électricité) : il s'agit d'un réseau de tuyauteries enterré qui parcourt l'espace afin de relier les différents éléments du réseau.
- Compresseurs (pour les bifluïdes)
- Regards : Les regards sont généralement enterrés, fabriqués en métal ou en béton ; souvent seule la partie supérieure est visible en bordure de piste. Les regards permettent de raccorder les enneigeurs aux différents réseaux (eau, électricité, air, communication).
- Installation de refroidissement (facultatif)
- Système de commande : Les installations d'enneigement automatique sont équipées, suivant le degré d'automatisme, d'un ou plusieurs réseaux de communication permettant le transit des informations (mesures, commandes) nécessaires à la gestion de l'ensemble de l'équipement. Ces liaisons, entre appareils et poste de contrôle, sont dans la majorité des cas réalisées au moyen de câbles spéciaux appelés "BUS" ou câbles dialogues implantés dans des gaines en polyéthylène enterrées. Mais les communications peuvent également s'effectuer par liaison radio ou fibre optique.

La majorité de ces éléments se situe au sein du même local appelé usine à neige (Fig. 29).



Figure. 29 L'usine à neige des Setives sur la station d'Aussois, 2010.

(Source : <http://www.naturemp.org/Sports-d-hiver-et-biodiversite.html>).

Station de mesure météorologique. Certains canons sont équipés d'instruments de mesure (température de l'air, hygrométrie, pression et vent). Lorsque toutes les conditions sont réunies, le canon déclenche automatiquement la production sur le secteur correspondant (Fig. 30).

Poste de commandement. De plus en plus d'installations sont automatisées. Le déclenchement des canons et la gestion de la production se font à partir d'un ordinateur qui permet d'ouvrir et de fermer l'ensemble des vannes (air, eau) et de régler la production des canons (Fig. 31).

Figure. 30 Station de mesure des paramètres climatiques sur un canon bifluide aux Gets, hiver 2007. (Clichés : Janvier 2007, E. Magnier).



Cette station intégrée au canon mesure la température de l'air, le taux hygrométrique, la vitesse et la direction du vent.



Figure. 31 Poste de commande sur le secteur de la Setaz, station de Valloire. (Source : <http://www.ski-valloire.net/dossier/neige.php>).

Pour mettre en place tous ces éléments, il faut réaliser d'importants travaux de terrassement le long des pistes pour enterrer les différents tuyaux, installer les différents bâtiments mais aussi aplanir les pistes afin de réduire les quantités de neige nécessaire.

2.1.4 Les lieux de prélèvement

La production de neige se caractérise par une période d'activité très courte (de novembre à avril). Les volumes d'eau associés doivent donc être disponibles en grande quantité sur une période très courte. Les modes d'approvisionnement des canons sont nombreux et tentent de répondre plus ou moins correctement à cette demande. Il existe ainsi trois modes d'approvisionnement en eau des canons :

- Par prélèvements directs dans la ressource en eau superficielle ou souterraine
- Par l'intermédiaire de tiers qui effectuent des prélèvements dans la ressource. Ce mode de prélèvement souligne souvent une multifonctionnalité de la ressource (production hydroélectrique, eau potable, neige de culture...)
- Par stockage de l'eau derrière des retenues collinaires.

Les stations peuvent avoir recours à un ou plusieurs modes d'alimentation selon la configuration des sites et la disponibilité locale. Mais quel que soit le mode d'approvisionnement, qu'il soit direct ou indirect, on distingue à l'origine trois sources d'alimentation : les cours d'eau, les lacs et l'eau souterraine (Fig. 32).

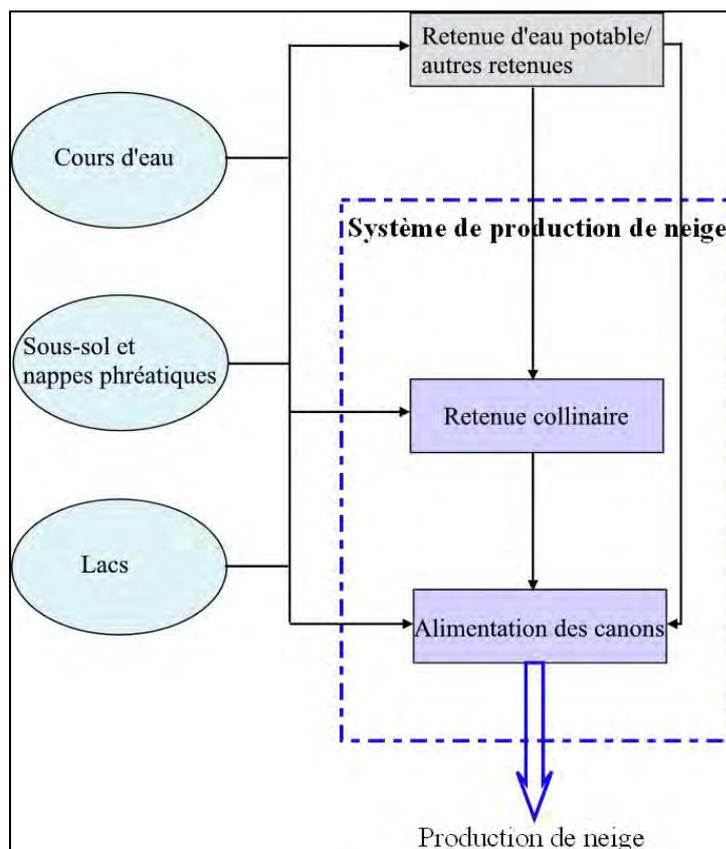


Figure. 32 Les différents modes d'alimentation des enneigeurs. (D'après Badré et al., 2009 (modifié)).

Les prélèvements directs dans les cours d'eau sont de plus en plus rares, les stations ayant davantage recours aux divers stockages permettant ainsi d'améliorer la gestion de la ressource. En France, en 2002, 37 stations effectuent encore des prélèvements directs, ce qui représente un volume de plus de 3 millions de m³, soit plus de 30 % des volumes totaux (Campion, 2002). En 2009, 7 % des installations (28 installations) prélèvent directement dans les eaux de surface ou souterraines (Paccard, 2010) (Fig. 33) Cependant, la part de ces prélèvements directs n'est pas négligeable et coïncide avec les étiages hivernaux des cours d'eau. En Suisse, les prélèvements directs sont particulièrement importants, environ 66 % des prélèvements globaux en 1997 (Mosimann, 1998). Aujourd'hui, ce mode

d'approvisionnement reste majoritaire même si la construction de retenues collinaires se développe dans certains cantons (comme dans celui du Valais). Ces prélèvements sont soumis en France à déclaration ou autorisation mais il n'y a pas toujours de gestion à l'échelle du bassin versant, excepté dans le cadre de la mise en œuvre d'un SAGE ou d'un SDAGE. Il existe ainsi des situations où plusieurs autorisations ont été données indépendamment les unes des autres à plusieurs stations localisées sur un même bassin versant et prélevant sur un même cours d'eau. Sur le bassin de la Dranse de Morzine, les stations de Morzine, d'Avoriaz, et de Saint-Jean d'Aulps la Grande Terche prélèvent dans les ressources sans concertations entre les différentes stations et les différentes activités. Or, comme cela a déjà été précisé, les prélèvements d'une station de montagne, que ce soit pour l'eau potable ou les diverses activités, sont les plus importants en saison d'hiver. Il en est de même pour la production de neige qui requiert des conditions particulières de production. Or, durant cette saison d'hiver, la ressource en eau est au plus bas car les cours d'eau connaissent une période d'étiage. Des prélèvements importants peuvent donc poser plusieurs problèmes, notamment à l'échelle de la disponibilité et du partage de la ressource mais également à l'échelle du bassin versant où l'écosystème est fortement dépendant des écoulements et du niveau d'eau dans les cours d'eau.

Figure. 33 Pourcentage des prélèvements à partir de trois sources (retenues collinaires, cours d'eau, réseau d'alimentation en eau potable) sur les volumes globaux des prélèvements pour la production de neige. (D'après Mosimann, 1998 (modifié) ; Campion, 2002 (modifié)).

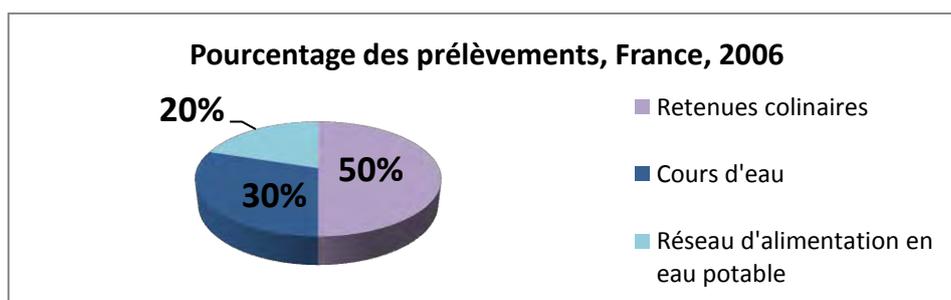
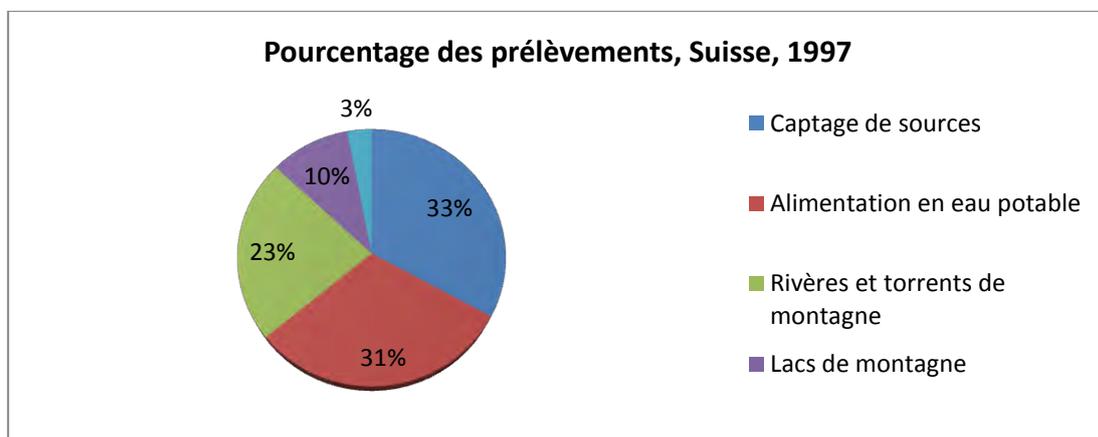
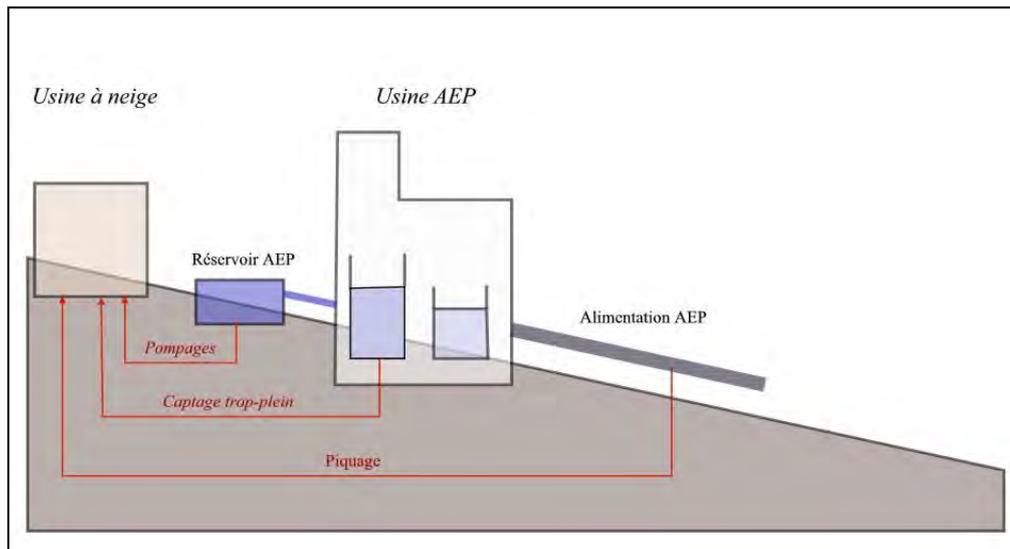


Figure. 34 Les modes de prélèvements pour la production de neige dans le réseau d'eau potable.



Certaines stations utilisent la ressource stockée pour la production d'eau potable (Fig. 34). Ces prélèvements d'eau sont les plus simples à mettre en place car les installations sont déjà existantes ; il faut donc établir un accord avec la société de production d'eau potable. Certaines stations utilisent l'eau rejetée au trop-plein du réservoir d'eau potable, ce qui évite les problèmes de conflits tandis que d'autres stations partagent un même réservoir. La station des Gets (Haute-Savoie) partage un même réservoir pour la production d'eau potable et la production de neige, ce qui fût la cause de problèmes d'alimentation en eau de la station en 2007. En France, en 2002, ce partage de l'eau entre deux grands utilisateurs concerne de nombreuses stations, 35 stations (sur les 161 stations que compte l'étude), soit 2 millions de m³ d'eau prélevés dans les réseaux d'eau potable (20 % des prélèvements globaux (Fig. 33)) (Campion, 2002). Ce mode de prélèvement pose deux problèmes. Le premier est celui de la qualité de l'eau indispensable à la production d'eau potable. Mais une telle qualité n'est pas essentielle pour la fabrication de neige. Le deuxième problème est celui du partage de la ressource. La production de neige est dans ce type d'approvisionnement, totalement dépendante de la production d'eau potable. Lorsque la ressource s'affaiblit, notamment durant certains hivers secs, des conflits peuvent apparaître. En effet, la production de neige s'intensifie pour combler un manque de neige naturelle, entraînant une augmentation des prélèvements. Mais la ressource déjà très basse est également sollicitée par la production de neige. Plusieurs stations ont dû rationner l'eau ces dernières années, ce fut le cas aux Gets en 2007. Aux Arcs les limites sont déjà atteintes (Lacroix, 2009). Même si à l'heure actuelle il n'y a pas eu de coupure d'eau, la situation est à surveiller. Enfin, même s'il faut préciser que la priorité est généralement donnée à l'alimentation en eau potable, une mauvaise gestion peut entraîner des pénuries et peut ainsi nuire à l'activité touristique de la station. Certaines stations ont d'ailleurs subi des coupures d'approvisionnement en eau potable, aux Gets en 2007 par exemple. Enfin cette

méthode est très contraignante pour la gestion de la production de neige car elle doit tenir compte des heures de pointe de production d'eau potable, ayant souvent lieu en fin de journée en saison touristique. Ces quelques heures sont alors perdues alors qu'elles réunissent souvent les conditions adéquates à la fabrication de neige.

Lorsque toutes les conditions climatiques sont réunies, la production de neige est lancée, souvent en début de saison. La gestion de la ressource disponible est donc indispensable à l'organisation des périodes de production et à la gestion du stock de neige. Cette nécessité de pouvoir gérer le stock d'eau explique la création et le développement ces dernières années de retenues collinaires dans les stations. Ces constructions permettent de s'affranchir des accords avec le réseau d'eau potable et ainsi de mieux gérer l'eau. Les prélèvements d'eau permettant le remplissage de la retenue sont étalés dans le temps et la production de neige peut quand à elle se faire sur un minimum de temps aux périodes favorables (grande quantité d'eau disponible immédiatement). L'eau prélevée pour la production n'est donc pas, en théorie, mobilisée en période hivernale. Mais dans la plupart des situations, la retenue est remplie au moins deux fois (dont une fois en hiver), ce qui signifie qu'une partie des prélèvements est tout de même effectuée en période d'étiage. Cette solution est la plus répandue puisque 5 millions de m³ d'eau transitent par ces réservoirs, soit 50 % des volumes prélevés pour la neige. Certaines régions favorisent par diverses politiques la construction de ces ouvrages (Campion, 2002). Mais les volumes stockés n'excèdent que rarement les 100 000 m³ et sont bien insuffisants pour enneiger la totalité des surfaces du domaine. La retenue des Gets (Haute-Savoie), par exemple, stocke 37 000 m³ alors que le volume consommé pour la production de neige est de 140 000 m³ en moyenne, soit un prélèvement de 103 000 m³ pendant l'étiage (Remontées mécaniques des Gets). En effet, d'après la carte des besoins théoriques en eau pour la production de neige et la capacité des retenues associées (Fig. 37), on remarque que les besoins pour la production de neige varient fortement d'une station à une autre, mais la majorité des stations équipées de retenues collinaires sont les stations à fort besoin théorique. L'ensemble de ces ouvrages permet un stockage de 3 667 764 m³ d'eau sur les départements de Savoie et Haute-Savoie (2 086 564 m³ d'eau pour la Savoie et 1 581 200 m³ pour la Haute-Savoie), (DDT Savoie, 2009). La construction d'ouvrage à grande capacité de stockage a considérablement augmenté dans les années 2000. Ainsi, une retenue de 404 000 m³ a été construite sur le domaine des Arcs en Savoie (retenue de l'Adret des Tuffes) (Fig. 35) et une retenue de 300 000 m³ est installée sur le domaine du Grand Bornand en Haute-Savoie (retenue du Maroly) (Fig. 36), (Paccard, 2010). Ces retenues permettent théoriquement de s'affranchir des prélèvements en hiver, mais ce n'est pas toujours le cas (Fig. 38). Presque dans la totalité des situations, les besoins théoriques ne sont pas comblés par le stock d'eau des retenues, qu'il y ait une ou plusieurs retenues au sein du domaine (DDEA74, 2009). On estime que 50 % des besoins sont comblés par l'apport des retenues. Cela montre que les retenues ne résolvent qu'en partie les problèmes d'étiage et de faible ressource en eau en hiver (Campion 2002). Ces retenues font l'objet de

nombreuses critiques. Entre autres, elles sont coûteuses pour les petites et moyennes stations, en investissement comme pour leur fonctionnement. Le montant des travaux de la nouvelle retenue de Maroly (station du Grand Bornand) s'élève, en 2007, à 4,5 millions d'Euros (Montagne Leaders n° 204). Les volumes stockés sont parfois insuffisants pour les besoins en neige des stations et l'assurance de pouvoir les réalimenter en cours de saison hivernale n'est jamais acquise. De plus, leur construction et leur fonctionnement soulèvent des questions d'impacts environnementaux (Marnezy, 2008).



Figure. 35 La retenue de l'Adret des Tuffes en travaux, Arc 2000. (Cliché : septembre 2008, Razel Bec Fayat entreprise).

Figure. 36

La retenue du Maroly, Le Grand Bornand. (Cliché : 2009, Restaurant des Terres rouges au Grand Bornand).



Enfin certaines stations bénéficient de la proximité d'un barrage hydroélectrique et peuvent s'affranchir de la construction de retenues collinaires. L'eau est alors prélevée à partir du bassin du barrage ou en sortie de barrage. Ces prélèvements nécessitent un accord privé avec la société de gestion du barrage. Les stations concernées par ce mode d'alimentation se localisent principalement dans le massif du Beaufortin et la vallée de la Haute Maurienne.

Figure. 37 Besoins en eau théoriques pour la production de neige par saison et volumes d'eau stockés dans les retenues collinaires. (DDEA ; 2009).

Les besoins en eau théoriques pour la production de neige de chaque domaine skiable sont figurés par des cercles ; une partie de ces besoins est stockée dans une ou plusieurs retenues, dont le(s) volume(s) est (sont) ici représenté(s) en bleu.

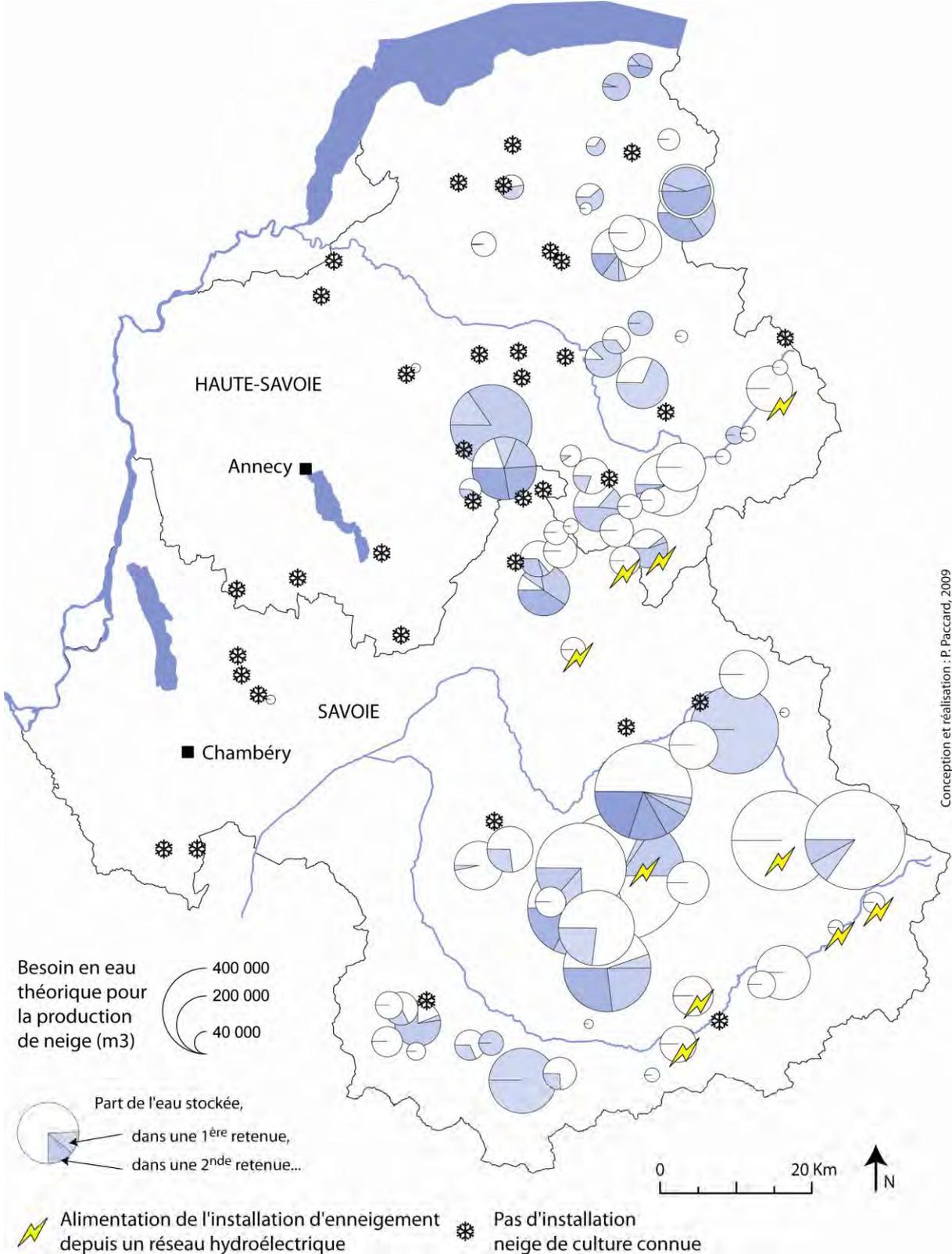
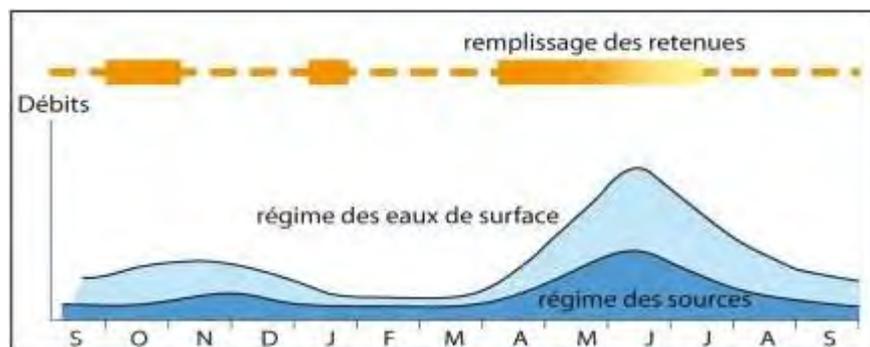


Figure. 38 Disponibilité en eau et utilisation pour la neige de culture et le remplissage des retenues collinaires. (Marnezy et Rampnoux, 2006).



Le régime des cours d'eau est à l'étiage de décembre à mars, en période de plus fort besoin pour la production de neige et d'eau potable. Le remplissage des retenues au

printemps permet de s'affranchir de ces problèmes d'adéquation temporelle. Ainsi, les eaux de fonte sont stockées dans ces retenues pour être réutilisées l'hiver suivant. Un second remplissage ou un réapprovisionnement du stock d'eau est également possible au cours de l'hiver.

2.1.5 La production d'un canon et les volumes d'eau associés

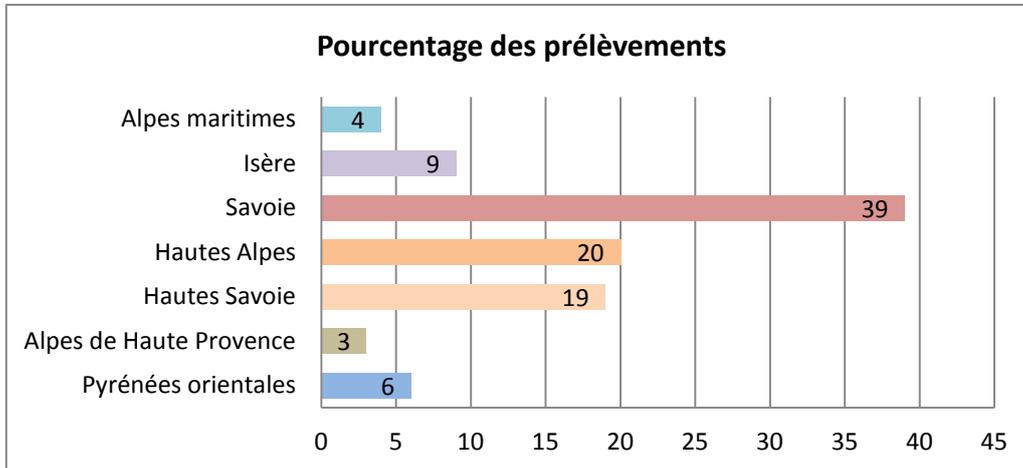
Sur les pistes, on estime que la hauteur mesurée correspond pour moitié à de la neige fraîche et pour moitié à de la neige produite.

L'eau est l'élément indispensable à la production de neige ; on estime qu'il faut environ 1000 litres d'eau pour produire 2 à 2.5 m³ de neige (Teich et al., 2007). Ce rapport évolue en fonction des conditions climatiques et augmente dès que les températures et l'humidité augmentent). Pour obtenir une couverture neigeuse suffisante à la sécurité des skieurs (30 cm de hauteur de neige damée), il faut en moyenne au moins 1000 m³ d'eau pour une couverture de base de 30 cm sur 1 hectare⁴ (Abegg, 2011 ; SEATM, 2002). Ainsi, la consommation d'eau d'une station pour la production de neige est en moyenne de 3000 à 4000 m³/ha et par an. Elle peut atteindre dans certaines situations 8000 m³/ha (Musy et al., 2013). Cette consommation dépend de l'altitude de la station, des conditions climatiques, des conditions topographiques des espaces à enneiger et des conditions d'enneigement naturel. Les différentes campagnes d'enneigement au cours de la saison nécessitent plus ou moins d'eau selon les conditions climatiques. En moyenne on estime qu'il faut 4000 m³ d'eau pour enneiger un hectare sur une saison (CIPRA, 2004). Les volumes prélevés augmentent régulièrement depuis quelques années (Direction Départementale de l'équipement et de l'agriculture de Savoie, 2009). Dans les Alpes françaises, la consommation d'eau est de 20 millions de m³ en moyenne sur une saison (Miquel, 2003a). Cette valeur correspond à la consommation annuelle en eau potable d'une ville de plus de 300 000 habitants comme Nice (France). Mais ces volumes ne sont pas également répartis dans toutes les stations et entre tous les massifs (Fig. 39). Les Alpes du Nord prélèvent presque 70 % des volumes totaux, alors que les autres départements ne dérivent qu'une infime partie de la ressource.

⁴Il est couramment admis que 2m³ de neige sont produits à partir de 1m³ d'eau (Reynaud, 2008).

De nombreuses petites stations ne prélèvent que quelques dizaines de milliers de mètres cubes, tandis que de grands complexes exploitent de gigantesques installations soustrayant plusieurs centaines de milliers de mètres cubes.

Figure. 39 Répartition des prélèvements d'eau dans les différents départements de montagne français. (D'après les données Campion, 2002).



2.2 L'EVOLUTION DE L'ENNEIGEMENT ARTIFICIEL AU COURS DU TEMPS

2.2.1 La naissance d'une pratique

L'histoire de l'enneigement débute dans le Connecticut sur les pentes de Mohawk Mountain. Les premières pistes de ski sont créées par Walt Schoenknecht, mais après deux hivers de très bon enneigement, l'hiver 1949-1950 est relativement peu enneigé. Walt entend alors parler d'un saut à ski près de Salisbury enneigé grâce à un broyeur à glace. Il décide donc d'adapter cette technique et place en bas de la piste de Mohawk Mountain un énorme broyeur à glace dès janvier 1950. Il achète alors 50 tonnes de glace et des camions assurent le transport entre la ville et la montagne. Bientôt 30 camions transportent ces énormes blocs de glace et une chaîne humaine apporte ces blocs jusqu'au broyeur qui pulvérise de minuscules particules de neige. La nouvelle se répand rapidement, et des photographes arrivent sur place (Fig. 40) (Walter, 1980). Les équipes de Pathé et de la Warner Brothers sont venues filmer les premières neiges. La production a duré trois semaines. La saison a certes été très courte mais la publicité réalisée pour la petite station est sans précédent. Mais cette technique n'est pas très pratique car très coûteuse en termes de main d'œuvre, de véhicules et de quantité de glace.



Figure. 40 « The first Artificial Snow Ever Made » titre le journal Yankee. (Walter, 1980).



Cindy Ellis, Franck Ellis et Walt Schoenknecht observant le broyeur de glace en action.

En cette même année 1950, dans le Massachussetts, les frères Tropéano qui ont entendu parler des expériences de Walt Schoenknecht tentent à leur tour de produire de la neige à partir d'un système d'irrigation portable (Fig. 41) (Walter, 1980). Le système, au départ très expérimental, mélange de l'air froid et de l'eau dans des buses. Ce système est très vite installé sur des 4x4 pour étendre les surfaces enneigées (Fig. 42). On se souvient aujourd'hui à tort des frères Tropéano comme inventeurs de la neige artificielle car ils ont très rapidement acheté le brevet auprès de Tey Milford, société qui devient leader dans le marché de la production de neige dès avril 1954. Les deux frères ont ensuite travaillé en collaboration avec la société Tey pour l'amélioration du système. Et très rapidement, durant l'hiver 1955-1956, le système Tey est installé par Walt Schoenknecht à Mohawk Mountain. Peu de temps après, Boston colline et le domaine « Bousquet ski area » dans le Massachussetts deviennent les premiers domaines skiables au monde à fabriquer de la neige pour couvrir plusieurs pentes. D'autres stations des Etats-Unis s'équipent, comme *Steamboat Springs dans le Colorado* (Fig. 43). Le système a régulièrement évolué au cours de ces années et en 1961, le « canon à neige » (Fig. 44) à proprement

parlé, beaucoup plus simple à manier, est breveté et mis sur le marché. Puis les « canons tours » (Fig. 45), premiers canons montés sur perche de 15 à 30 pieds de hauteur (4.5 à 9.1 m) apparaissent dans les années 70. La société York se lance à son tour sur le marché en mettant au point le premier système informatique de gestion des canons à distance en 1986. Un opérateur commande les canons depuis son ordinateur, certains canons sont même autonomes avec une micro station météorologique embarquée. Cette technologie s'exporte dans le monde et dès 1990 les stations françaises mais aussi suisses, allemandes, autrichiennes, italiennes s'équipent.



Figure. 41 Les frères Tropéano et leur canon à neige à partir du système d'irrigation portable (1950). (<http://www.jfbb.com/explore>).



Figure. 42 Le système d'enneigeurs installé sur une jeep pour étendre les surfaces enneigeables, station de Wilmot dans le Midwest, 1952. (<http://home.earthlink.net>).

Figure. 43 Steamboat Springs, Colorado. La petite ville est fière d'utiliser le nouveau procédé pour fabriquer de la neige. (<http://www.ryereflections.org>).





Figure. 44 Premier canon à neige, il pulvérise des cristaux de neige à une distance de plus de 18 m. (<http://www.ryereflections.org>).

Figure. 45 Les premiers « canons tour » sur la colline de Boston Hill. (<http://www.ryereflections.org>).

On peut noter ici l'importance du vent qui balaye la neige en sortie de canon et entraîne une perte importante.



2.2.1.1 En France

L'enneigement des stations est la condition indispensable pour faire venir les touristes et développer l'économie locale. Très tôt, la problématique de l'enneigement s'est posée aux gestionnaires des stations. Des hivers « sans neige » ont toujours existé, on peut citer en exemple les hivers 1929-1930 ; 1972-1973 ; 1983-1984, mais leur signification a beaucoup évolué au cours du temps et du développement des activités. Plusieurs scénarios ont été élaborés par Gauchon (2009). Le premier est celui de l'hiver où la neige arrive tardivement dans la saison (fin décembre voire janvier) ; le second est celui d'un hiver doux en milieu de saison entraînant une fonte importante du manteau neigeux en plein mois de janvier, et enfin celui de l'hiver sec et peu neigeux. Quel que soit le scénario, les conséquences sont toujours importantes sur l'économie du ski. Les stations ont donc cherché très tôt à pallier ce manque de neige. Pour comprendre l'évolution de cette problématique, on peut prendre l'exemple de quatre hivers « sans neige » qui ont fait l'objet d'une analyse détaillée par C. Gauchon en 2009.

- L'hiver 1931-1932. Le tourisme hivernal en station de montagne commence à se développer ; or cet hiver 1931-1932 est un hiver dit « sans neige ». Les stations de montagne commencent alors à mesurer l'importance d'un hiver peu ou pas enneigé sur l'économie du ski et, déjà, le manque de neige

apparaît comme un problème pour le bon développement économique de la station. Pour exemple l'article extrait du Petit Dauphinois du 1^{er} janvier 1932 :

« Les hivers sans neige : jusqu'à présent, l'hiver a été à peu près sec et en somme pas très froid dans notre région. Les skieurs font grise mine et les stations d'altitude sont heureuses lorsqu'elles peuvent comme aujourd'hui annoncer – en exagérant un peu – vingt-cinq centimètres de neige friable. Où sont les neiges d'antan ? »

Les stations dites de haute altitude ont vu leur fréquentation augmenter considérablement et valorisent leur enneigement plus constant. Une première alternative voit déjà le jour pour pallier au manque de neige des stations de moyenne montagne.

- L'hiver 1963-1964 a également été fortement marqué par un manque de neige important.

La problématique des stations de moyenne montagne se pose à nouveau, comme l'illustrent les remarques émises durant le conseil d'administration du comité des stations françaises réuni à Grenoble le 7 février. « Les stations de moyenne altitude risquent de connaître d'énormes difficultés de fonctionnement » (Gauchon, 2009).

Cette année là, l'Etat lance le Plan neige (1964) favorisant la modernisation et la croissance des stations. Ce Plan neige est marqué par plusieurs dynamiques importantes. La première dynamique concerne les développements de grande ampleur des techniques et machines favorisant la pratique du ski (câble pour remonter les skieurs le long des pentes, machines pour tasser et damer la neige l'hiver et préparer les sols l'été). Une deuxième dynamique de ce plan neige concerne l'augmentation de la capacité en termes de lits des stations de ski. Pour rentabiliser les installations, il faut augmenter la fréquentation. Et la troisième dynamique mise en place par ce plan neige est la médiatisation de la pratique du ski mettant ainsi en avant des conditions idéales de neige et de sécurité des skieurs. Mais cet hiver sans neige en pleine période d'essor de l'activité ski remet en question le développement des stations de basse altitude. Certaines stations vont même demander de l'aide au gouvernement en raison des conditions d'enneigement difficiles. En parallèle de cette croissance importante, des premiers tests sont effectués pour pallier au manque de neige de certains hivers : l'idée d'enneiger artificiellement des espaces apparaît en France. La technique a, quant à elle, été reprise de celle déjà utilisée aux Etats-Unis. Les premiers canons à neige apparaissent en 1963 au Champ du Feu (Vosges) (Fig. 46, Fig. 47 et Fig. 48). Cette petite station a réussi à enneiger une piste de 550 m de long. Précurseur dans ce domaine, elle a même tenté, quelques années plus tard (1980), d'installer des canons sur une piste de ski de fond, mais elle n'a pas été suivie. Les essais de neige produite sont nombreux cet hiver-là, mais très peu médiatisés. La presse locale est la seule trace aujourd'hui de ces essais. C'est notamment le cas des essais menés sur la station du Haut-Folin (Saône et Loire) qui s'est dotée de cinq *snowmakers* (P. Paccard ; 2010) ou bien encore de la station de Megève en 1964 (Fig. 49).



Figure. 46 Installation de canons sur la piste de Champ du Feu (Vosges, 1963). (<http://www.lechampdufeu-ski.com>).

Figure. 47 L'installation de production de neige (Champ du Feu, Vosges, 1963). (<http://www.lechampdufeu-ski.com>).

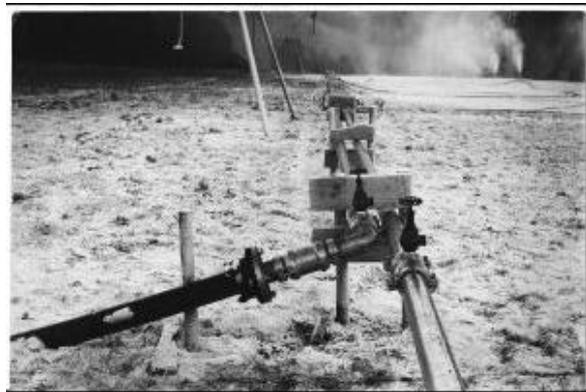


Figure. 48 La piste de Champ du Feu enneigée artificiellement (Vosges, 1963). (<http://www.lechampdufeu-ski.com>).



Figure. 49 Premiers essais de « canons à neige » à Megève (Haute-Savoie). (Le Dauphiné Libéré du 14 janvier 1964).



L'enneigement artificiel connaît alors un essor rapide. Alors qu'en 1973-1974 moins de 10 hectares étaient enneigés (P. Paccard, 2010), en 1979-1980 on ne comptait que 10 stations équipées et 19 hectares enneigés, 35 stations et 70 hectares l'étaient en 1985-1986, et 429 ha en 1987-1988. Dès 1990-1991 la surface équipée avait doublé (910 hectares). Elle était à nouveau multipliée par deux en 1995-1996 (1787 hectares). (Badré et al. 2009). (Fig. 5 et Fig. 51).

Figure. 50 Evolution de la surface enneigable entre 1973 et 2009. (D'après les données de P. Paccard, 2010 ; de Badré et al., 2009, ODIT France, 2009 et Domaines skiables de France 2012).

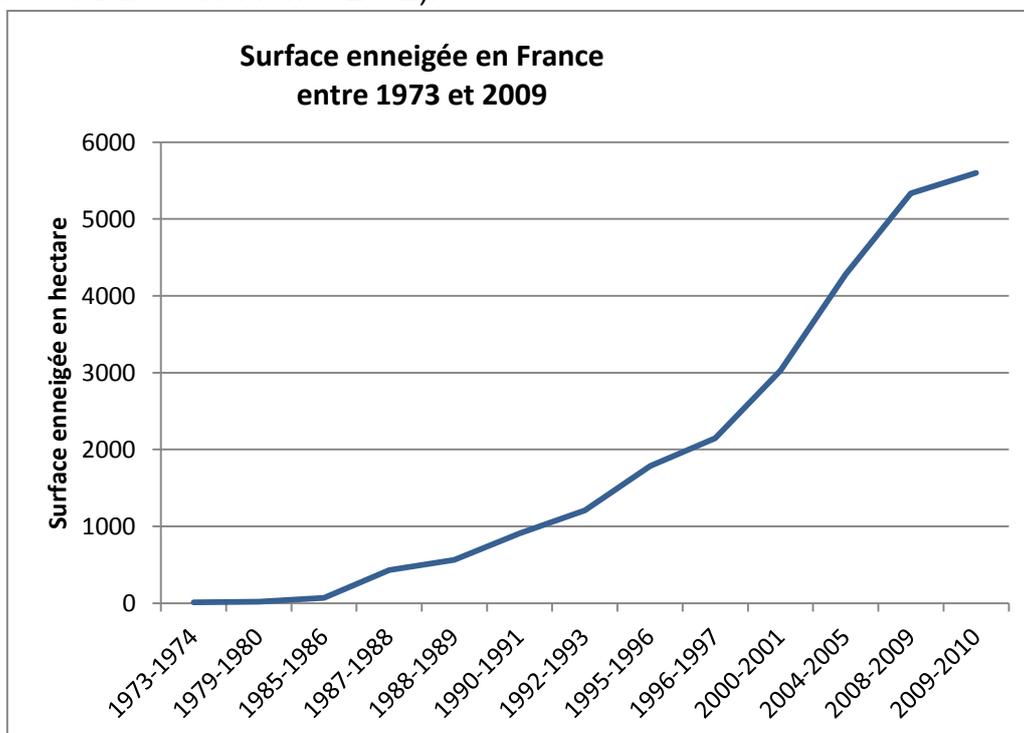
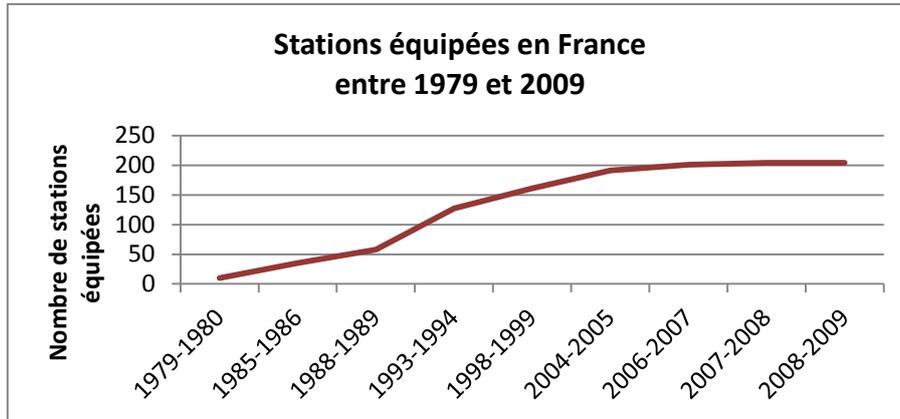


Figure. 51 Evolution du nombre de stations équipées entre 1979 et 2009.
(D'après les chiffres de P. Paccard, 2010 ; de Bardé et al., 2009 et de ODIT France, 2009).



- Hiver 2006-2007. De nombreuses stations françaises se sont désormais équipées en neige artificielle et valorisent cette capacité d'enneigement dans les campagnes publicitaires. Les touristes, très sensibles à cet argument, y voit une garantie de skier dans de bonnes conditions même avec des conditions climatiques peu favorables. Les surfaces enneigées dépassent 4300 hectares ce même hiver (Fig. 51) (ODIT France, 2009).

Les magazines et la presse spécialisée dans les espaces de montagne valorisent eux aussi l'utilisation de la neige de culture. « Cette saison est riche d'enseignements : elle conforte le bien fondé de l'enneigement de culture qui a largement contribué à limiter les dégâts » (Montagne Leaders, 2007).

La montagne est aujourd'hui associée à la pratique du ski et un hiver sans neige peut se révéler catastrophique pour l'économie touristique. Les stations de moyenne montagne semblent être les plus sensibles à ces grandes variations d'enneigement, comme l'atteste la une du journal La Croix du 18 décembre 2007 (Fig. 52) :

« Certaines stations de moyenne altitude vivent au jour le jour »



Figure. 52 La une du journal La Croix du 18 décembre 2007.

Même si la production de neige est d'abord apparue comme un moyen de sauver la saison de ski ; après un développement considérable des installations de production, cette technique atteint aujourd'hui ses limites. Mais ces limites ne semblent pas être un frein au développement des espaces enneigés depuis quelques années. C'est à la fin des années 1980 que se généralisent les installations de production de neige au sein des grands domaines skiables.

L'enneigement artificiel représente en 2009-2010 5600 hectares de pistes, soit près de 23 % de la surface totale de pistes (25 000 hectares) que comptent les 333 stations françaises (d'après le dernier relevé réalisé (Domaines skiables de France, 2012)). En moyenne, les installations permettent de recouvrir 15 % des surfaces skiables d'un domaine, avec des records à 65 % dans certaines stations ; on parle dans ce dernier cas de politique du « tout neige de culture » (Campion, 2002).

Tous les massifs français sont aujourd'hui équipés en neige de culture avec cependant d'énormes disparités. Les Alpes du Nord comptent 92 stations équipées en neige de culture, puis suivent les Alpes du Sud avec 40 stations, à la dernière place on retrouve le Massif Central avec 10 stations (Fig. 53). Ces chiffres ne sont pas toujours représentatifs du pourcentage d'enneigement car ils dépendent du nombre de stations totales dans chaque massif. L'observation de la part des surfaces de pistes enneigées est beaucoup plus significative. En effet, 38 % des pistes des domaines des Vosges sont équipées, contre 21 % dans les Alpes du Nord (Fig. 54 et Fig. 55). A l'inverse, le massif alpin compte de grandes stations qui ont été les premières à s'équiper et à investir dans de vastes installations (Campion, 2002). Il faut également souligner que la majorité des stations équipées sont des stations de moyenne montagne plus sensibles à la variation de l'enneigement. Les domaines de haute montagne sont quand à eux plus faiblement équipés, mais le développement de leurs installations est en très forte progression ces dernières années. Enfin, les stations de faible altitude sont peu équipées probablement car leurs moyens financiers ne permettent pas la création de réseau d'enneigeurs très coûteux.

Figure. 53 Nombre de stations équipées en neige de culture en 2008-2009.
(D'après les chiffres de P. Paccard, 2010).

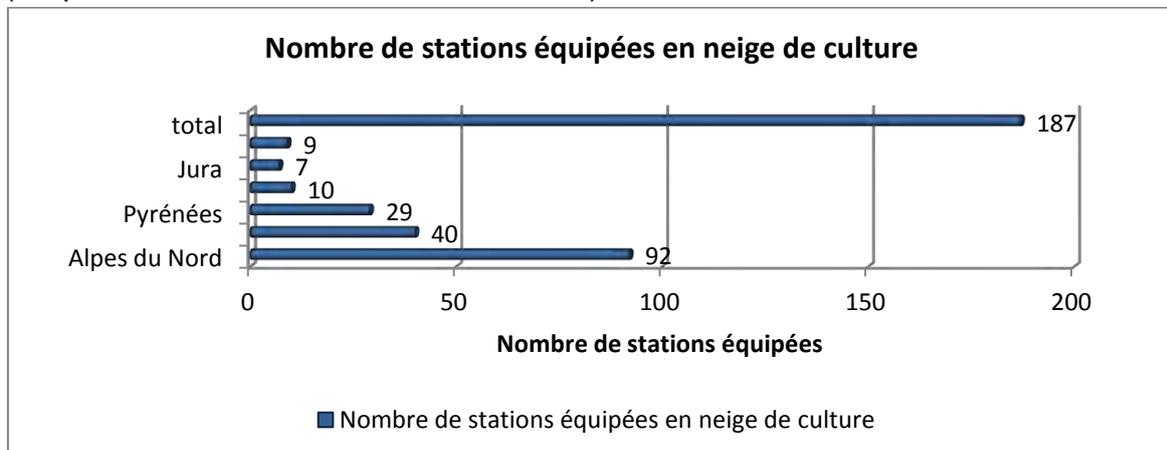


Figure. 54 Répartition par massif des pistes équipées en neige de culture en 2008-2009 (en pourcentage de la surface totale des pistes). (D'après les chiffres de P. Paccard, 2010).

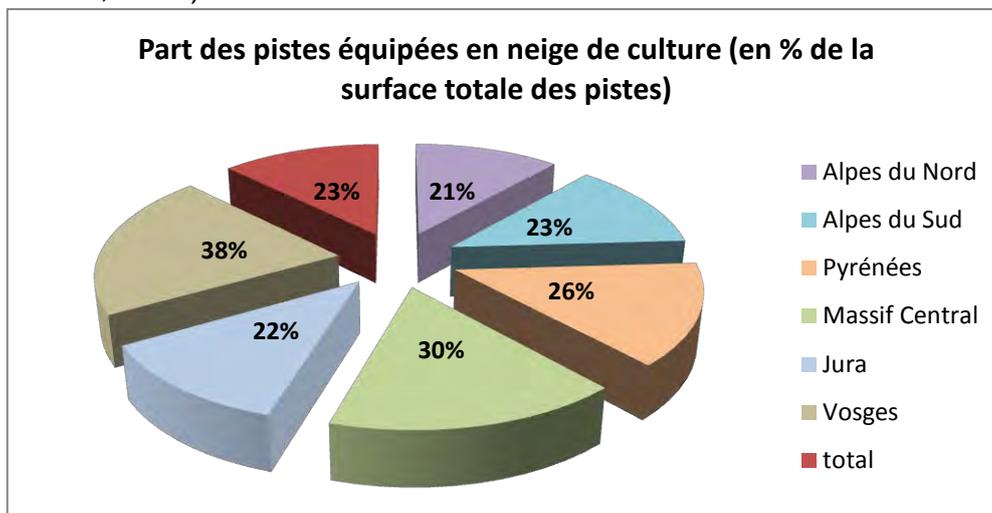
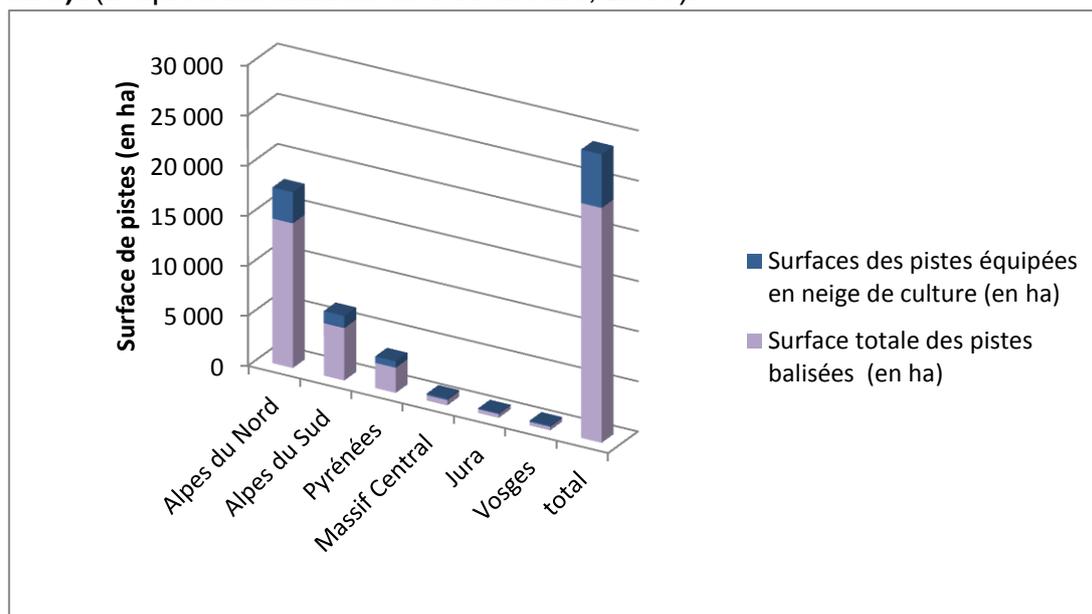


Figure. 55 Surface de pistes équipées en neige de culture en 2008-2009 (en hectare). (D'après les chiffres de P. Paccard, 2010).



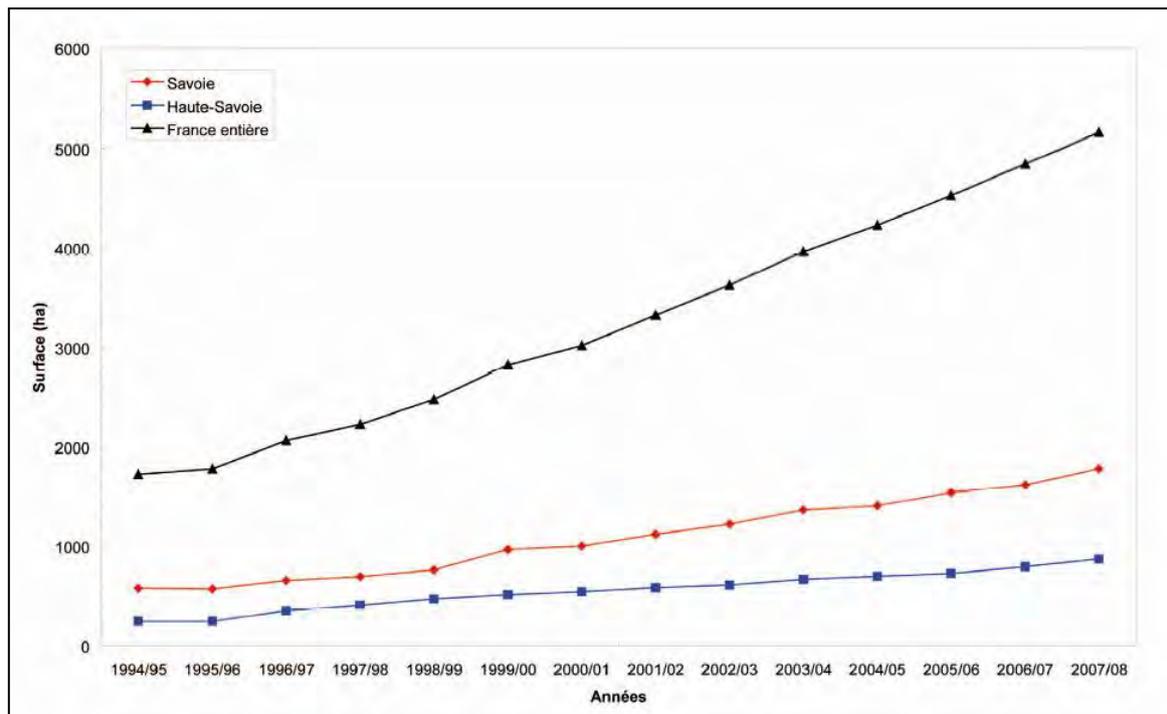
2.2.1.2 A l'échelle du massif alpin français et de la Haute-Savoie

En Haute-Savoie, la première grande station à s'équiper est Flaine en 1973 et très rapidement de nombreuses stations investissent dans les installations de production de neige. Ainsi la station d'Avoriaz investit dans quelques canons à neige en 1990. Cependant, l'année 2006-2007 marque l'apparition des premières limites de l'utilisation de neige. Lorsque l'été et l'automne ont été particulièrement secs, les réserves sont basses à l'approche de l'hiver et la production de neige peut se voir considérablement limitée. Ce fut le cas aux Gets, dans le massif du Chablais, en

2007, entraînant une vive confrontation entre le Maire, qui refusait la mise en fonctionnement des canons pour protéger les réserves d'eau potable, et le directeur de la société d'exploitation des remontées mécaniques qui démissionna au cours de l'hiver (Le messager du Chablais, 1^{er} février 2007). D'autres stations n'ayant pas développé leur installation de production de neige, cherchent divers moyens pour garantir une couverture neigeuse sur l'ensemble des pistes. La station de Saint Jean d'Aulps, non loin des Gets, a mis en place une rotation d'hélicoptères pour transporter l'équivalent de 20 cm de neige vers le haut des pistes (Le messager du Chablais, 4 janvier 2007).

De manière générale, les massifs alpins sont marqués par les mêmes évolutions qu'à l'échelle de la France. La surface équipée a ainsi presque doublé en France depuis 1994 même si cette évolution est moins marquée à l'échelle de la Savoie et de la Haute-Savoie (Fig. 56). En 2008-2009, la Savoie est davantage équipée que la Haute-Savoie, soit 23 % de la surface totale du domaine (Tab. 2) (Direction Départementale de l'Équipement et de l'Agriculture de la Savoie, 2009).

Figure. 56 Evolution des surfaces équipées en neige de culture en Savoie et Haute-Savoie (en hectare) depuis 1994-1995. (DDEA, 2009).



Tab. 2 L'enneigement artificiel en Savoie et Haute-Savoie en 2008-2009.

	Nombre de domaines skiables	Nombre de domaines équipés en neige artificielle	Surfaces de piste enneigées (hectares)
Savoie	55	41	1783
Haute-Savoie	54	38	874
Total	109	79	2657

De nombreux dossiers de projets d'installation de production de neige sont aujourd'hui en cours. Les installations et les surfaces enneigeables vont très probablement encore augmenter dans les années à venir. Des petites stations commencent aujourd'hui à investir dans la production de neige et cette tendance ne devrait pas fléchir dans les années à venir.

2.2.1.3 En Suisse

Les stations suisses se sont équipées très tôt en canons à neige, à l'image de la station de Champéry qui installe les premiers canons en 1988. En 2009, 33 % des domaines suisses sont équipés, soit 7260 hectares (Paccard, 2010 et Lang, 2009). La progression des surfaces enneigées a été particulièrement importante ces dernières années. En 2000, 5 % des surfaces de pistes sont enneigées artificiellement, 10 % en 2003 et 36 % en 2010 (Fig. 57) (Remontées mécaniques suisses, 2010). Mais de manière générale les stations suisses sont moins équipées que les stations voisines d'Autriche et du Tyrol Italien. Elles subissent ainsi une rude concurrence. De grandes disparités existent entre les domaines, ainsi Le Champ skiable entre Adelboden et la Lenk dans l'Oberland bernois est actuellement déjà couvert à 60 % par la neige artificielle (Swissinfo, 2007). Ailleurs, le taux de couverture est plus faible, à l'exemple du canton de Vaud où le pourcentage de pistes de ski enneigées avoisine les 30 %. L'enneigement artificiel et la garantie de pouvoir skier sont devenus un argument concurrentiel des stations de ski, dans le but d'attirer notamment les tour-opérateurs et la clientèle étrangère. Durant les hivers peu enneigés entre 2005 et 2010, le recours à l'enneigement artificiel a permis au mieux de limiter la baisse du chiffre d'affaires des sociétés de remontées mécaniques et de maintenir les périodes d'ouverture des pistes et les taux d'emplois (Observatoire Valaisan du Tourisme, 2012).

Figure. 57 Part de la surface des pistes équipées pour l'enneigement technique en Suisse. (Observatoire Valaisan du Tourisme, 2012).



Dans le Valais, 173 km de pistes sont enneigées artificiellement (sur 908 km, total de pistes que compte le canton du Valais), soit 19.1 % des surfaces de pistes (Probst, 2006).

2.2.1.3 Dans le Monde...

La France est bien loin des pourcentages d'enneigement affichés dans certains pays, ainsi 90 % du domaine des Dolomites et 85 à 100 % des domaines des Etats-Unis sont enneigés artificiellement.

Concernant les pays de l'Arc alpin, d'après le WWF (2008), 90 % des grands domaines skiables disposent d'installations de production de neige. L'Autriche compte 59 % de pistes enneigées (P. Paccard, 2010) (Tab. 3). La province italienne de Bolzano-Tyrol du Sud est la zone de l'arc alpin la plus enneigée avec 80 % des surfaces des pistes de ski couvertes de neige artificielle dès 2004 (CIPRA, 2004). Toutes les données montrent qu'aujourd'hui les 2/3 des pistes enneigeables se situent en Autriche et en Italie. Les Alpes françaises et suisses ne comptent aujourd'hui que 10 % de pistes enneigeables sur la totalité des pistes de l'Arc alpin.

Tab. 3 Part des pistes équipées d'installations d'enneigement dans les pays de l'arc alpin. (P. Paccard, 2010).

	Surface totale des pistes balisées en 2004 (domaines skiables alpins, en ha)	Part des pistes équipées en neige de culture en 2004 (domaines skiables alpins, en ha)	Part des pistes équipées en neige de culture en 2009 (moyenne nationale)
Pays \ Source	CIPRA, 2004, p. 6	CIPRA, 2004, p. 6	Remontées Mécaniques Suisses, 2008, p. 21 Cometto, 2009
Italie	22600	40%	70%
Dolomites	∅	∅	92%
Val d'Aoste	∅	∅	50%
Autriche	23000	40%	59%
Suisse	22000	10%	33%
France	20800	13%	23%
Slovénie	1200	27%	∅
Allemagne	3700	10%	∅
Liechtenstein	5	0%	∅
Espagne	-	∅	34%
Andorre	-	∅	30%

∅ : pas de données

Certains pays commencent à s'équiper, c'est le cas de la Chine avec Pékin et certains lieux plus insolites s'équipent également en enneigeurs, c'est le cas du Ski Dôme de Landgraaf ou bien celui de Dubaï ouvert fin 2005 (Fig. 58).



Figure. 58 Ski dôme de Landgraaf (Pays-Bas). (Cliché : <http://forum.grand-massif.net>).



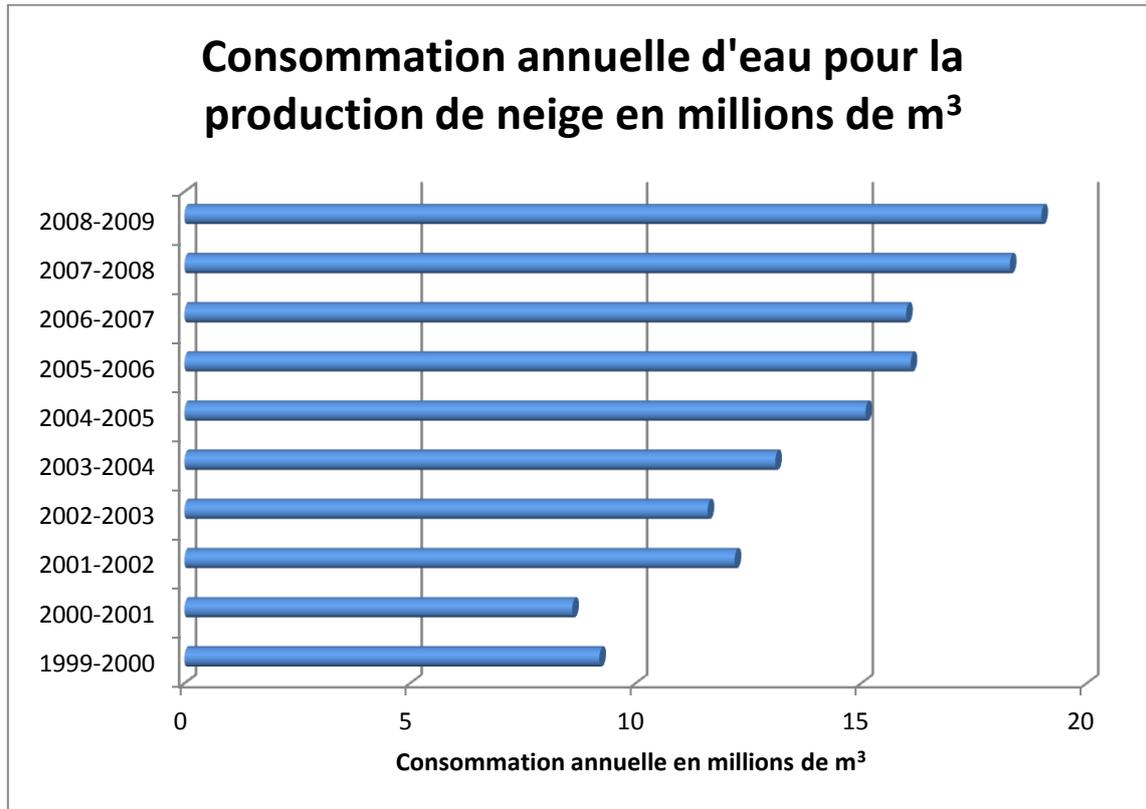
Ski dôme de Dubaï (<http://www.poma.net> et <http://99holidays.com>).



2.2.2 La consommation d'eau

La consommation d'eau augmente proportionnellement à l'accroissement des surfaces de pistes enneigées. Ainsi, à l'échelle de la France en 1999, les prélèvements étaient d'un peu plus de 9 millions de m³ d'eau. En 2008-2009, 19 millions de m³ d'eau ont été nécessaires pour enneiger 5333 hectares, soit une production de neige de 38 millions de m³ (Badré et al., 2009). Ces prélèvements varient très fortement d'une station à une autre en fonction du taux d'équipement de la station et du type d'installation (Fig. 59).

Figure. 59 Consommation saisonnière des installations de production de neige entre 1999 et 2009. (D'après les données ODIT France, 2009 ; Badré et al ; 2009).



A l'échelle de la Savoie et de la Haute-Savoie la tendance est la même. L'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse a ainsi relevé en 2007, 4821 m³ d'eau pompés pour la Savoie et 1523 milliers de m³ d'eau pompés pour la Haute-Savoie, soit 10 774 m³ pour l'ensemble du bassin (Direction Départementale de l'Équipement et de l'Agriculture de la Savoie, 2009). Ces chiffres ne peuvent être considérés comme des valeurs exactes car les chiffres sont transmis par les différents opérateurs de domaines skiables et des erreurs sont possibles. Depuis les années 1990, le nombre de retenues collinaires dans les Alpes augmente très rapidement, rendant encore plus difficile les relevés de pompage pour la production de neige fournis à l'Agence de l'eau ou ODIT France. En 2009, on compte 32 ouvrages en Savoie et 41 en Haute-Savoie soit un stockage de 3 667 764 m³ d'eau (2 086 564 m³ en Savoie et 1 581 200 m³ en Haute-Savoie).

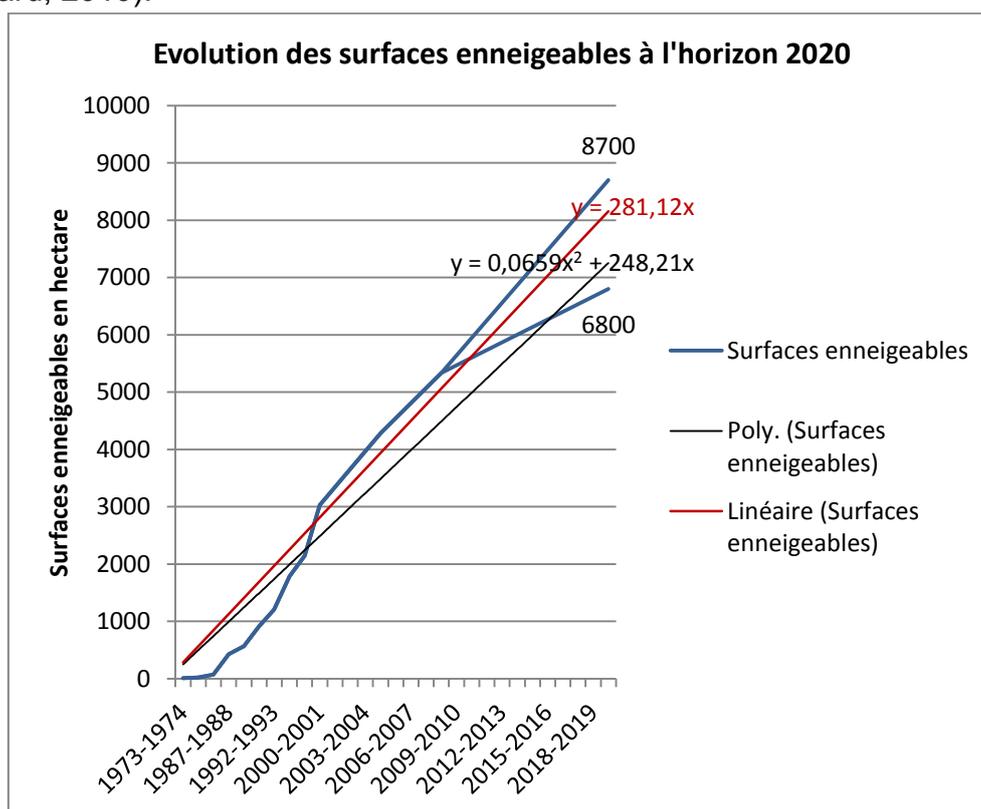
En Suisse, les volumes prélevés sont également importants. En 2008, 18 millions de mètres cubes sont pompés pour la production de neige.

2.2.3 Tendances d'évolution

Le pourcentage de pistes enneigeables augmente très rapidement depuis quelques années et cette croissance devrait se poursuivre dans les années à venir. Deux tendances sont à prévoir :

- Tout d'abord une augmentation des équipements des stations. En effet la majeure partie des stations françaises mais aussi étrangères est déjà équipée en enneigeurs.
- Ensuite à l'échelle de l'Arc alpin. Les stations françaises devraient connaître une croissance beaucoup plus marquée que ses voisins (Italie, Autriche) afin de rattraper le retard qu'elles connaissent aujourd'hui et rester concurrentielles dans les années à venir en terme de fréquentation touristique (il faut préciser qu'aujourd'hui la France ne connaît pas de retard de fréquentation). « L'Italie et l'Autriche sont souvent considérées comme des modèles en vertu de leur potentiel d'enneigement » (CIPRA, 2004). 88.9 % des stations suisses souhaitant augmenter leur nombre de canons d'après une enquête réalisée en 2006 (Lang, 2009).

Figure. 60 Projection de l'évolution de la surface enneigeable. Cette projection a été faite sur la base du développement actuel sans tenir compte des différents critères de variation cités précédemment. (D'après les chiffres de P.Paccard, 2010).



Courbe de tendance linéaire réalisée selon l'équation $y=281,1x$ et courbe de tendance polynomiale d'ordre 2 réalisée d'après l'équation $y=248,2x$. Les courbes de tendances ont été réalisées avec les données pour 2020 sur une surface enneigeable de 6800 hectares, dans une optique de développement modéré.

Si cette évolution continue dans de mêmes proportions, la surface enneigeable des domaines skiables français pourrait atteindre jusqu'à 9000 hectares en 2020, avec un taux d'équipement de 30 à 40 % (P. Paccard, 2010) (Fig. 60). Mais cette

croissance est fortement dépendante de la ressource en eau, du changement climatique, des données financières et de l'avancée des réglementations qui sont autant de paramètres qui peuvent faire varier le développement des installations de production de neige, dans un sens comme dans l'autre.

2.3 LES RAISONS D'ENNEIGER MECANIQUEMENT

2.3.1 Les raisons évoquées aujourd'hui

La raison évoquée au départ justifiant l'utilisation de neige de culture était de combler un manque de neige pour l'ouverture du domaine.

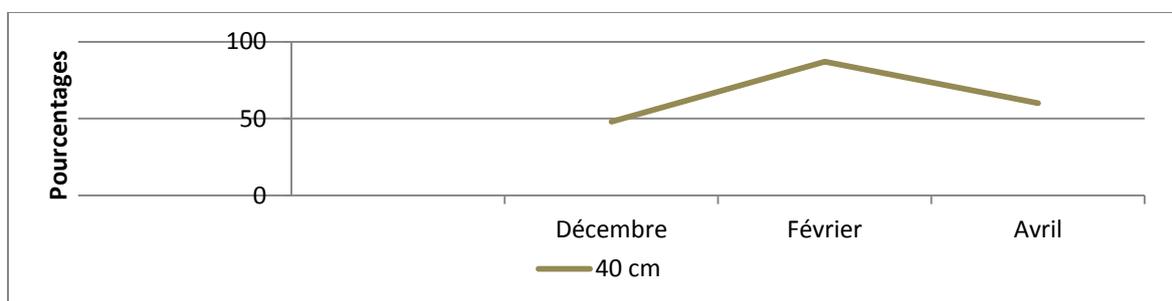
Aujourd'hui, les raisons évoquées sont de plusieurs natures :

- Combler la couverture neigeuse et ainsi assurer la sécurité des skieurs.

La limite de hauteur de neige au sol qui conditionne l'ouverture d'un domaine est de 40 cm, pour une neige damée. Mais cette hauteur peut-être abaissée à 30 cm (toujours pour une neige damée), lorsque le sol est végétalisé. En effet, en présence d'un sol nu, les hauteurs de neige doivent être plus importantes que sur un sol végétalisé car la rugosité du terrain (présence de pierres par exemple) augmente les risques pour les skieurs lorsque la hauteur de neige n'est pas suffisante. Dans ces conditions, et lorsque l'épaisseur de neige n'excède pas 10 cm, la pratique du ski est impossible, sauf si la station possède des installations de production de neige.

Si on observe les probabilités d'occurrence d'une hauteur de neige de 40 cm (courbe rouge) sur une période de 1965 à 2000, on remarque non seulement une grande variabilité interannuelle de l'enneigement mais également une grande variabilité intra annuelle des hauteurs de neige de 40 à 60 cm, principalement en début d'hiver (Fig. 61). On comprend ainsi toute l'importance de l'utilisation de neige artificielle pour les stations en début et fin de saison.

Figure. 61 Probabilité d'occurrence en pourcentage d'une hauteur de neige donnée sur une période de référence de 1965 à 2000. (D'après les données de Abegg, 1996).



Les données sont mesurées par les stations météorologiques, par comparaison des hauteurs de neige sur les pistes des domaines skiables et des hauteurs sur des sites abrités des vents forts.

Mais plus que la hauteur de neige déterminant l'ouverture du domaine, il s'agit du nombre de jours où cette hauteur se maintient, permettant de garder le domaine ouvert à la pratique du ski. Une moyenne de 100 jours avec une couverture neigeuse de 30 cm ou plus assure la viabilité des installations de remontées mécaniques (Abegg, 1996).

- Autre raison évoquée, garantir une saison complète de ski (de décembre à mars ou avril suivant les stations) dans de bonnes conditions de ski.

La fréquentation touristique et les périodes de fréquentation dépendent de la durée de l'enneigement et des hauteurs de neige au sol. On observe plusieurs pics de fréquentation : vacances de Noël, janvier avec une fréquentation étrangère importante dans certaines stations, les vacances scolaires de fin février / début mars, puis une baisse progressive de la fréquentation avant un nouveau pic aux vacances scolaires d'avril (Pâques), qui précède la fermeture de la station. Les week-ends sont également très fréquentés par les populations locales. Si l'assurance neige n'est pas garantie par la station, et si l'ouverture du domaine n'offre pas des conditions idéales de ski aux touristes, c'est toute l'économie de la station qui est mise à mal. L'utilisation de neige artificielle permet d'offrir l'assurance de skier.

- Réalimenter le manteau neigeux durant la saison.

De plus, tout au long de la saison, les remontées mécaniques de plus en plus performantes favorisent une augmentation du nombre de rotations des skieurs, et donc une usure rapide du manteau neigeux. Il faut donc réapprovisionner plus fréquemment la couverture neigeuse. Les secteurs sensibles (versants sud, liaisons entre domaines) et les secteurs très fréquentés (retour vers la station, espaces débutants) sont aussi réapprovisionnés au cours de l'hiver.

- Allonger la saison de ski et augmenter les bénéfices.

Aujourd'hui la SEATM (Service d'Etudes et d'Aménagement Touristique de la Montagne) souligne qu'une « concentration croissante des investissements dans les Alpes du Nord montre bien qu'il ne s'agit pas seulement de pallier les aléas de l'enneigement naturel ». « Nous devons garantir notre domaine en début et basse saison : les tour-opérateurs exigent notre plan d'enneigement artificiel » explique Bernard Genevray, patron de la station de Tignes (Lardreau, 2003).

- Créer une sous-couche.

Depuis quelques années, les stations lancent la production dès que les conditions climatiques le permettent (novembre ou début décembre). Il s'agit de constituer une sous-couche qui permettra un meilleur maintien de la neige naturelle (Fig. 62 et Fig. 63). Cette technique permet de limiter la production de neige au cours de la saison mais elle entraîne une forte consommation d'eau sur une période très courte (période où la demande en eau potable est plus faible). Cette sous-couche permet

de sécuriser les dates d'ouverture de la station et facilite la commercialisation des réservations.



Figure. 62 Création d'une sous couche sur Thyon-Les-Collons (Valais Suisse).

(Cliché : <http://www.remontees-mecaniques.net>).

Figure. 63 Sous-couche à Vars (France). (Cliché : <http://www.varsblog.com/article-le-reseau-de-neige-de-culture-et-ses-projets-d-extension>).



Les stations dites skis aux pieds sont particulièrement sensibles à l'enneigement. Cette formule leur impose d'assurer une couverture neigeuse continue. En effet, la circulation de véhicules y est interdite, tous les déplacements à l'intérieur de la station se font skis aux pieds, ou par traîneaux et chasse-neiges.

Finalement aujourd'hui il s'agit surtout de raisons économiques. La production de neige est devenue un outil de concurrence car c'est un argument pour faire venir les clients de plus en plus exigeants et qui veulent être sûrs de réussir leurs vacances à la neige. Une station dotée de canons à neige peut voir son chiffre d'affaire multiplié par trois ou quatre. « On ne peut pas se permettre de ne pas avoir de neige une année sans porter préjudice aux résultats des années suivantes... » (Campion,

2002). De plus, la présence de neige permet de rentabiliser les investissements d'une station de sports d'hiver (remontées mécaniques, restaurants, activités annexes...). Indirectement, c'est toute l'économie de la station et des vallées voisines qui est tributaire d'un bon enneigement (garantir un travail aux saisonniers, garantir le bon fonctionnement des commerces...). Il faut savoir que pour 1 euro gagné pour les remontées mécaniques, 6 euros de chiffre d'affaire de recettes seraient induits pour le reste des activités de la station (commerces, hébergement, location de matériel, loisirs...). (Campion, 2002)

La production de neige sert également à garantir le bon déroulement des compétitions et des événements. Ainsi la Fédération internationale de ski préconise l'utilisation de neige de culture : « De même, la préparation de base des pistes de Coupe du Monde doit être garantie par des installations d'enneigement ayant une capacité suffisante. » (Fédération internationale de ski, 2011-2012, point 16). Les jeux olympiques d'hiver de 2010 à Vancouver ont démontré l'importance des installations de neige. *France Info* titre son article « Jeux d'hiver : Vancouver sous la neige...artificielle » (*France Info*, 10 février 2010).

Au départ, les canons ne servaient qu'à garantir l'enneigement des domaines existants mais depuis quelques années, ils jouent de plus en plus un rôle crucial dans la « course vers l'or blanc ». La production de neige de culture est un outil économique qui permet d'honorer les contrats existants entre les prestataires de service, la station, et le client. L'augmentation des installations de neige de culture observée depuis quelques années provient d'un changement des mentalités. Au début des années 1980, la neige de culture dans une station était perçue de manière négative. C'était un signe de mauvais enneigement de la station. Aujourd'hui c'est une preuve de modernité et d'assurance de vacances réussies : une « garantie de satisfaction » pour l'utilisateur et une « garantie de résultats » pour le gestionnaire (Campion, 2002).

La production et les moyens mis en place sont de plus en plus conséquents, car ils permettent la constitution partielle ou totale d'un manteau neigeux dont dépendent les bénéfices des stations. De plus, le manque de neige effectif de ces dernières années a contribué à augmenter les besoins en neige de culture, et à accélérer la construction des installations. Les surfaces enneigées augmentent donc très rapidement et s'étendent progressivement vers des altitudes plus élevées grâce aux nouvelles technologies. Ainsi, aujourd'hui, certains glaciers commencent à être équipés en neige de production. La station de Zermatt s'est même équipée d'un canon conçu par une société israélienne, l'IDE Snowmaker, permettant de produire 40 m³ de neige à l'heure et d'enneiger une piste de 500 m entre le glacier de Théodule et la station de Trockener Steg (Le Matin, 20 novembre 2008 et On the Snow, octobre 2008) (Fig. 64). Elle peut ainsi mettre en avant la possibilité de skier 365 jours par an dans la station. (Fig. 65 et Fig. 66)



Figure. 64 Canon nouvelle technologie à Zermatt pour enneiger le retour du glacier de Théodule. (Cliché : <http://fr.onthesnow.ca/news/>).

Figure. 65 Publicité de la station de Zermatt qui met en avant la possibilité de skier 365 jours par an. (<http://www.zermatt.ch>).

Figure. 66 Canons à neige au Trockener Steg (Zermatt) le 3 novembre 2007. (<http://www.remontees-mecaniques.net/>).



2.3.2 Les enjeux de demain

Les stations ont développé la production de neige pour s'affranchir au mieux des variations interannuelles du climat. Mais ces variations existantes sont à ne pas confondre avec les celles du climat sur le long terme auxquelles devront s'adapter les stations. D'autant que ces variations seront amplifiées en montagne. Nous ne proposerons pas de scénarios futurs du changement climatique et de ses impacts car les incertitudes sont grandes, mais nous analyserons les conséquences globales d'un changement probable sur le fonctionnement actuel des stations.

- Le questionnement autour des analyses actuelles

De nombreuses questions persistent autour des changements climatiques qui affecteront les régions de montagne, mais toutes les études s'accordent sur les tendances futures des grands paramètres climatiques d'ici 2100 :

- Les températures. Les scientifiques du GIEC estiment que, durant le 20^e siècle, certains sites de haute altitude ont connu une augmentation des températures moyennes allant jusqu'à 2°C. L'augmentation des températures devrait être davantage marquée dans les parties occidentales des Alpes (plus de 4.5°C). Le réchauffement simulé diminue progressivement vers l'est : il s'échelonne entre + 4.9°C pour Nice (France) et + 2.8°C pour Bolzano (Italie) (ONERC, 2008).
- Les précipitations. Les modèles du GIEC prévoient une diminution des précipitations estivales et une augmentation des précipitations hivernales.
- Les précipitations neigeuses. Aujourd'hui la durée moyenne de l'enneigement est relativement faible dans les Alpes du Sud à 1500 m d'altitude (140 à 100 jours par an) et augmente fortement vers les Alpes du Nord (plus de 170 jours par an). A haute altitude (plus de 2500 m) les conditions sont plus homogènes au sein des massifs.

Ainsi à haute altitude les conditions actuelles sont suffisamment froides pour garantir l'enneigement. Le début de l'enneigement pourrait être un peu retardé et la fonte plus rapide, soit une douzaine de jours d'exploitation en moins (Etchevers et Martin, 2002). En dessous de 2000-1800 m, l'impact devient important. A 1500 m, 1 mois d'enneigement disparaîtrait. La durée d'enneigement passerait alors à 5 ou 4 mois dans les Alpes du Nord et à 3 ou 2 mois dans les Alpes du Sud. L'épaisseur de neige diminuerait aussi fortement, les Alpes du Nord perdant une quarantaine de centimètres et les Alpes du Sud une vingtaine (Etchevers et Martin, 2002).

Il faut cependant rappeler que ces données sont entourées d'une grande incertitude. D'autant plus que de nombreux paramètres à l'échelle locale des domaines de montagne doivent être considérés, comme l'exposition, les altitudes... Ces paramètres font varier localement les effets du changement climatique. Il n'est donc

pas possible d'évaluer avec précision les impacts du changement climatique sur le tourisme sur un seul scénario à échelle régionale. A cette échelle, plusieurs études ont été réalisées pour divers massifs, à l'échelle de la Suisse (Koenig et Abegg, 1997), à l'échelle du Tyrol en Autriche (Steiger, 2007) ou encore à l'échelle d'une station. C'est d'ailleurs cette échelle locale qui est à privilégier. Car les différents scénarios locaux donnent des plages de variations qui restent importantes, jusqu'à plusieurs degrés d'augmentation (Dubois, 2006).

Pour évaluer les impacts du changement climatique sur les stations de montagne, en l'absence de données climatiques et de scénarii précis, il est intéressant d'évaluer la vulnérabilité des stations et des activités dans le cas d'un changement probable.

2.3.1.1 La fiabilité de la limite de l'enneigement développée par l'OCDE

Les projections sur la limite de fiabilité de l'enneigement ont été proposées par l'OCDE et reposent sur plusieurs hypothèses :

Pour exploiter un domaine skiable il faut un manteau neigeux d'une épaisseur de neige minimum au sol de 30 centimètres sur une période d'au moins cent jours par saison (OCDE, 2007). La limite de fiabilité correspond à l'altitude minimale où l'on retrouverait au moins 100 jours de neige avec 30 cm de neige au sol par saison.

Dans les conditions actuelles, 609 domaines skiables sur 666 des domaines alpins sont considérés comme fiables (91%). Les 9 % restants fonctionnent déjà dans des conditions à peine suffisantes. Le nombre de domaines fiables chuterait à 500 dans le cas d'un réchauffement de 1°C, à 404 dans le cas d'un réchauffement de 2°C et à 202 dans le cas d'un réchauffement de 4°C (OCDE, 2007).

Toujours selon l'OCDE, un domaine skiable donné est considéré comme fiable du point de vue de son enneigement naturel si la moitié supérieure de la plage d'altitude dans laquelle il se situe se trouve au dessus de la valeur seuil de la limite de la fiabilité de l'enneigement naturel.

La limite de fiabilité actuelle est de 1200 m pour les départements français de Savoie et Haute-Savoie et pour le canton du Valais (Fig. 67). Cette limite altitudinale remonterait de 150 mètres par degré de réchauffement moyen dans l'hypothèse de l'élévation des températures moyennes. Pour un réchauffement de 1°C, 2°C ou 4°C des températures moyennes, l'altitude passerait de 1200 mètres à respectivement 1350 mètres, 1600 mètres ou 1800 mètres. Ainsi en Savoie et Haute-Savoie 0 et 5 % des stations ne sont pas considérées comme fiables. Pour un réchauffement de +1°C en 2030, 5 % et 27 % des domaines de Savoie et de Haute-Savoie ne seraient plus fiables, pour un réchauffement de +2°C d'ici 2050, 10 et 51 % et d'ici 2100 pour un réchauffement de 4°C, 29 et 81 % ne seraient plus fiables (Fig. 68).

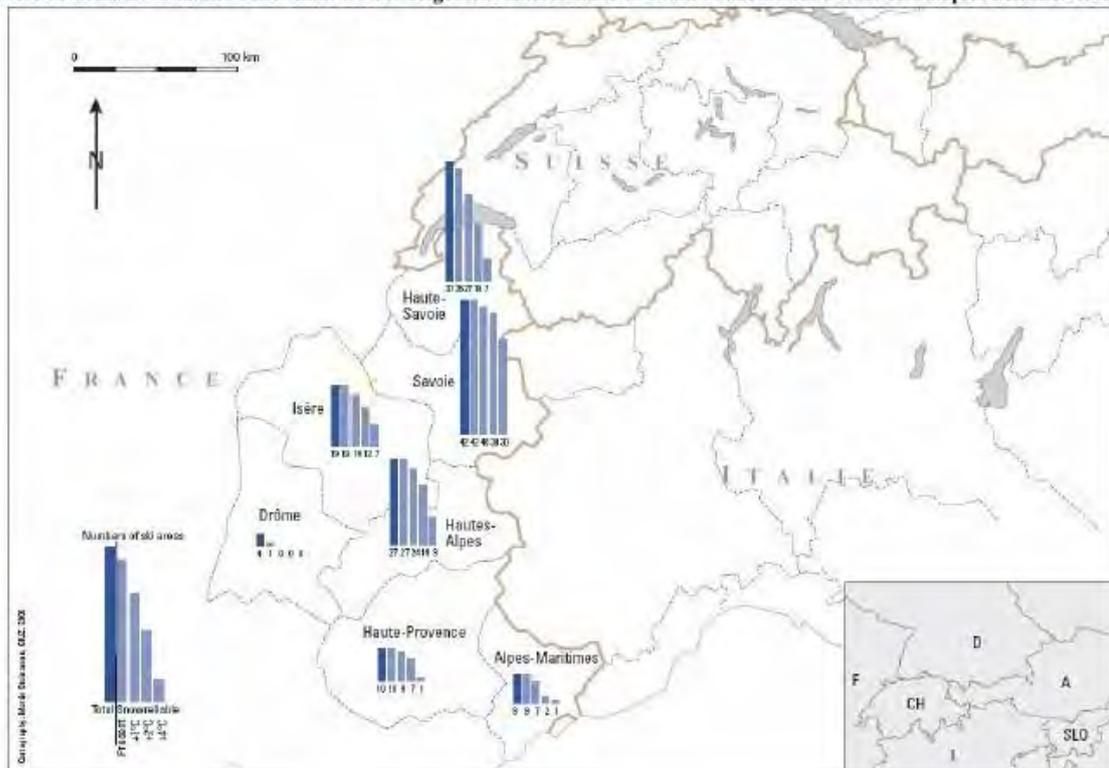
Partie 1 Les ressources en eau et l'enneigement artificiel d'un territoire de montagne : cadre théorique

Limite de la fiabilité de l'enneigement naturel	France	Suisse
1050 m		
1200 m	<ul style="list-style-type: none"> - Isère - Savoie - Haute-Savoie 	<ul style="list-style-type: none"> - Grisons - Alpes vaudoises et fribourgeoises - Valais - Oberland Bernois - Suisse centrale - Suisse orientale
1500 m	<ul style="list-style-type: none"> - Drôme - Hautes-Alpes - Alpes de Haute-Provence - Alpes-Maritimes 	<ul style="list-style-type: none"> - Tessin

Figure. 67 Limite de fiabilité actuelle de l'enneigement naturel dans les zones alpines pour 100 jours de neige par an avec 30 cm de neige au sol. (D'après OCDE, 2007 (modifié)). *Encadré en rouge la limite pour les départements français de Savoie et Haute-Savoie et en bleu celle du canton du Valais, 1200 m.*

Figure. 68 Nombre de domaines fiables dans les conditions actuelles, pour un réchauffement de 1°C (2030), 2°C (2050) et 4°C (2100) dans les Alpes françaises. (OCDE, 2007).

Nombre de domaines skiables bénéficiant d'un enneigement naturel fiable en France dans les conditions climatiques actuelles et future



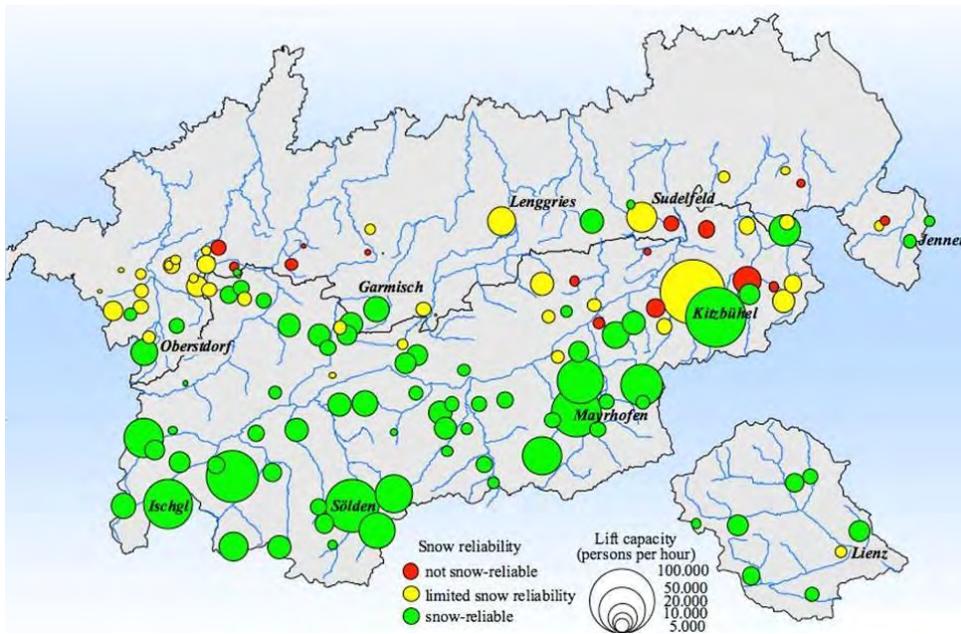
Note : A = Autriche, CH = Suisse, D = Allemagne, F = France, I = Italie, SLO = Slovénie

En Suisse, les domaines seront moins affectés selon les modèles de l'OCDE. Cependant il existe de grandes différences entre les régions. L'enneigement naturel devrait rester fiable dans le Valais (80 %) même si la limite de fiabilité s'élève de

600 m en altitude d'ici 2100 (+ 4°C) (Fig. 69). Les autres régions suisses exceptée celle des Grisons seraient davantage touchées (50 % des domaines conserveraient un enneigement naturel fiable en présence d'un recul de la limite de 300 m (pour un réchauffement de 2°C des températures)) (Fig. 70).

Figure. 69 Les stations de ski et la rentabilité des domaines aujourd'hui et en 2050.
(Steiger, 2006).

Aujourd'hui



En 2050

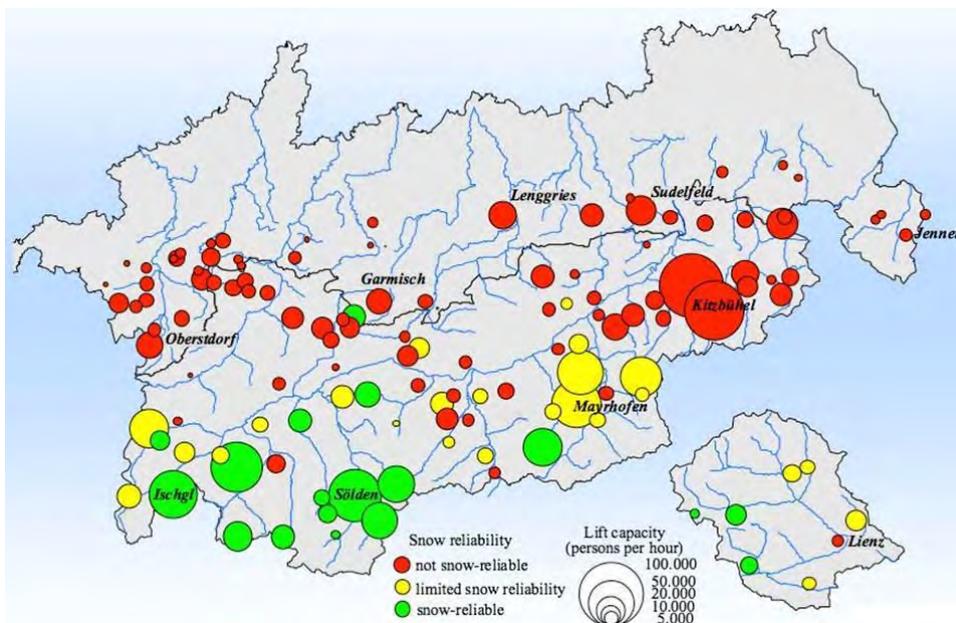
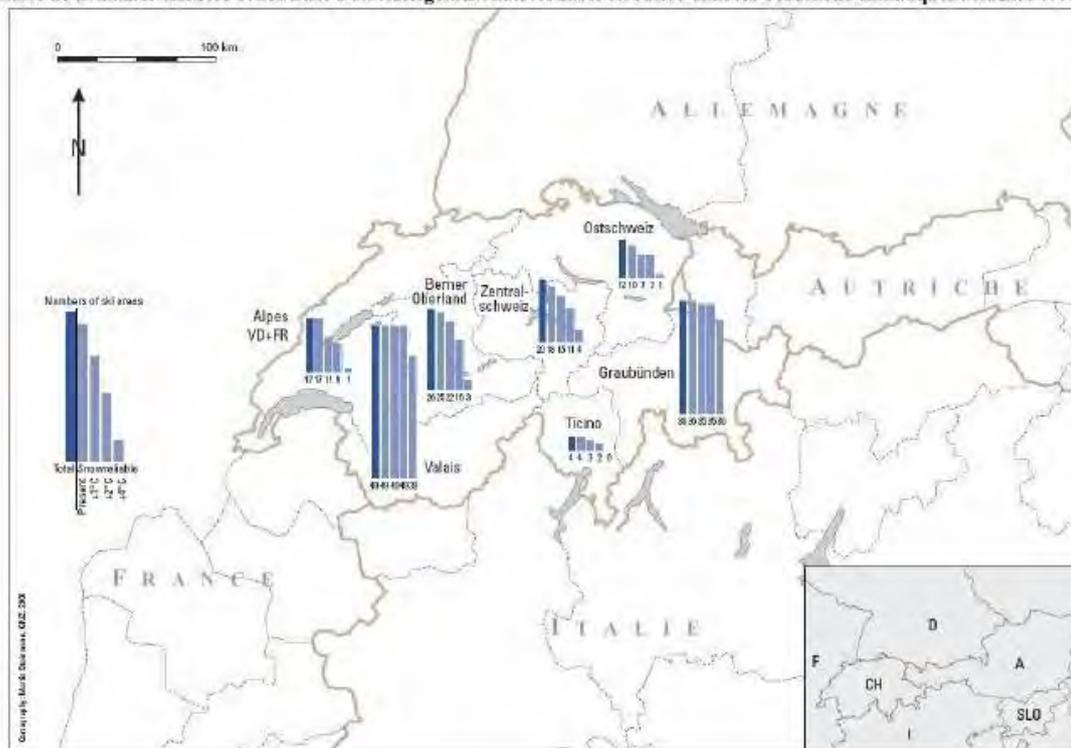


Figure. 70 Nombre de domaines fiables dans les conditions actuelles, pour un réchauffement de 1°C (2030), 2°C (2050) et 4°C (2100) dans les Alpes suisses. (OCDE, 2007).

Nombre de domaines skiables bénéficiant d'un enneigement naturel fiable en Suisse dans les conditions climatiques actuelles et futures



Note : A = Autriche, CH = Suisse, D = Allemagne, F = France, I = Italie, SLO = Slovénie

La principale lacune de l'analyse de l'OCDE est liée à l'échelle de travail retenue sur l'ensemble des Alpes. Cette analyse globale sur l'ensemble du parc de domaines skiables tend à lisser les différences. Il serait préférable de conduire une analyse site par site ou en nombre de journées skieur pour rétablir les différences inter-stations (DDE Savoie, 2009). Cette analyse reste, de plus, focalisée sur le concept de limite de fiabilité de l'enneigement naturel sans prendre en compte les paramètres locaux (topographie, expositions) et la fréquentation touristique comme la part de la fréquentation étrangère.

Cette limite permet de mettre en exergue les domaines concernés par le changement climatique. Plusieurs conséquences sont possibles, comme une baisse de la fréquentation touristique, une variation importante du chiffre d'affaire... Ces domaines devront s'adapter.

Une étude menée par J-C. Loubier (2007) s'est intéressée à plusieurs domaines skiables des Alpes, dont Morzine et Avoriaz. Cette étude basée sur les scénarii du GIEC montre que d'ici 2015, soit dans une échéance relativement courte, la probabilité de survenue de neige fraîche au cœur de la saison (janvier, février) serait de 50 %. Rappelons que la probabilité actuelle est de l'ordre de 80 % et qu'en début de saison (novembre, décembre) cette même probabilité est déjà de l'ordre de 55 à 65 %. Le changement climatique poserait donc de sérieux problèmes dans les prochaines années, en particulier pour les stations de basses et moyennes altitudes

auxquelles appartiennent Avoriaz et Champéry. Le changement climatique pourrait affecter fortement l'économie du ski en particulier pour les domaines du Chablais.

« Pour certains d'entre eux, comme les domaines du Chablais, c'est même le modèle économique du tourisme d'hiver qui semble remis en cause » (Loubier, 2007).

Selon une seconde étude menée par la Direction Départementale de l'Équipement et de l'Agriculture de la Savoie (Direction départementale des territoires de la Savoie, 2011), la limite altitudinale de fiabilité d'un domaine skiable fixée à 1200 mètres par l'OCDE remonterait de 150 mètres par degré de réchauffement dans l'hypothèse de l'élévation des températures moyennes. Ainsi, pour un réchauffement de 1°C, de 2°C et de 4°C des températures moyennes, la limite passerait respectivement à 1350 m, 1600 m et 1800 m (Fig. 71).

Figure. 71 Limite de fiabilité d'enneigement sur la station de Morzine-Avoriaz pour un réchauffement de 1, 2 et 4°C des températures. (D'après les données d'une étude de la DDEA, 2005).



Ce document n'a qu'une valeur d'illustration pour schématiser la variation des températures sur un versant. Il est évident que les températures diffèrent suivant les versants et leurs expositions. Il est important de préciser que ces différences n'ont pas été prises en compte ici.

Les principaux enjeux de demain concernent la ressource en eau et sa gestion, afin de concilier les différents usages de l'eau d'une station de moyenne montagne. Un nouvel élément important s'ajoute à la complexité de cette gestion, le changement climatique annoncé. Selon une étude menée sur la base de projections des modèles climatiques de Météo France (Tabeaud et Delaporte, 2005), quatre groupes de stations ont été identifiés. Le premier groupe correspond aux stations qui n'ont pas de problème majeur, c'est-à-dire les grandes stations dotées de domaine de haute altitude, où les problèmes d'enneigement sont contenus. Le second groupe est constitué par les stations où le risque est occasionnel, en moyenne montagne, plus dépendantes de l'enneigement mais rattachées à un domaine de haute altitude. En troisième lieu, viennent les stations où le risque sera fréquent à l'avenir, c'est-à-dire les stations de moyenne altitude sans domaine de haute altitude. Enfin, les stations de sports d'hiver où la reconversion est nécessaire, sont essentiellement des stations de première génération touchées directement par la rareté de la neige en dessous

de 1000 m. Champéry et Avoriaz appartiennent au troisième groupe et seront probablement affectées par la rareté de la neige dans les années à venir.

Ces hypothèses climatiques menacent la viabilité des domaines skiables et toute l'économie du ski. A l'avenir, les stations devront donc tenir compte de ces incertitudes quand à la régularité de l'enneigement et devront trouver des solutions pour y faire face. Mais là encore, la multifonctionnalité des usages de l'eau en montagne rendra difficile l'adaptation. Car l'enjeu majeur de chaque station est de préserver non seulement son économie, de la développer mais aussi de satisfaire chaque usage et chaque activité.

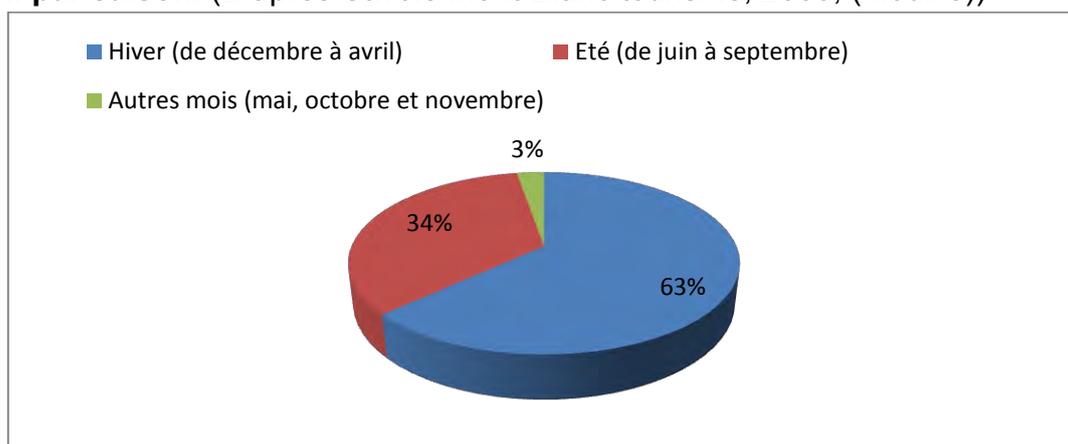
2.3.1.2 Faire face aux fluctuations

Faire face aux fluctuations actuelles ne signifie pas que les stations seront en mesure de s'adapter à un climat plus chaud dans les années à venir.

« Les changements climatiques ont déjà des conséquences dans les Alpes et l'adaptation est vitale » (OCDE,2007).

La plupart des stations connaissent une nette augmentation de la fréquentation touristique en hiver pour l'activité de ski. Ainsi sur le domaine des Portes du Soleil, les cinq mois d'hiver (de décembre à avril) totalisent 63 % du tourisme total du domaine avec plus de 4 millions de nuitées (Fig. 72).

Figure. 72 La fréquentation touristique moyenne du domaine des Portes du Soleil par saison. (D'après Savoie Mont-Blanc tourisme, 2008, (modifié)).



Le changement climatique devrait affecter, comme nous venons de le voir, les conditions d'enneigement naturel mais aussi les possibilités de production de neige. Comme le montre l'étude de M. Bonriposi (2013) sur Crans Montana, les heures potentielles d'enneigement à 1600 m d'altitude devraient diminuer. Sur la base d'une étude des conditions d'enneigement à Montana entre 1981 et 2011, il met en avant le constat suivant : les hivers pauvres en neige naturelle sont aussi ceux dont les

possibilités de production de neige sont limitées. Les résultats indiquent qu'en moyenne, les conditions idéales d'enneigement diminueront de 41 % à 1600 m et de 27 % à 2000 m (principalement en début d'hiver). Le tourisme de ski est donc remis en cause à long terme. Les stations des Portes du Soleil sont concernées par cette remise en question et doivent aujourd'hui s'intéresser aux solutions d'adaptation. Le risque doit d'ores et déjà être pris en compte par les différents acteurs. Certaines stations commencent à réagir. En France par exemple, celles regroupées au sein de l'association nationale des mairies des stations de montagne (Avoriaz est adhérente de l'association), ont demandé un rapport sur les différents scénarii possible du changement climatique et ses impacts sur les stations de ski d'ici 2040 (Gauvin, 2008).

2.4 LES SPECIFICITES HYDROLOGIQUES DES BASSINS VERSANTS DE MONTAGNE

Les nombreux progrès techniques et le développement rapide des stations de sports d'hiver posent la question de la disponibilité de l'eau dans les territoires de montagne. L'eau est en effet l'élément central de tout un système naturel mais aussi économique au sein d'une station et de son bassin versant. Cette disponibilité de l'eau à plus ou moins long terme est avant tout conditionnée par les facteurs naturels (relief, ensoleillement, sous-sol, sol, végétation...) propres à chaque massif.

2.4.1 Les paramètres climatiques et hydriques en montagne

Les paramètres climatiques agissent directement sur les bilans hydriques en conditionnant les volumes d'eau précipités et ceux évaporés. Et donc indirectement, dans le cadre de notre étude, ils déterminent les volumes de neige et les volumes d'eau disponibles pour la production de neige. On peut ainsi en conclure qu'ils influencent aussi l'utilisation de l'eau, que ce soit pour la production de neige mais également pour la production hydroélectrique, l'agriculture...

Les montagnes, de par leur relief et leur structure, présentent trois caractéristiques : un gradient altitudinal des précipitations, une variation de l'évaporation et un stockage temporaire sous forme de neige et de glace qui entraîne un délai dans les écoulements. L'abondance des précipitations en montagne s'explique par l'élévation des masses d'air entraînant une diminution des températures et par conséquent l'augmentation de l'humidité, mais la variation des précipitations dépend en grande partie de l'altitude. De manière générale, elles augmentent avec l'altitude de 50 à 200 mm par 100 mètres (Godard et Tabeaud, 2002). Mais la relation exacte entre précipitations et altitude est beaucoup plus complexe et varie fortement d'un endroit à un autre en fonction de l'humidité, de la température de l'air, du degré de la pente, de la période de l'année... Dans les Alpes occidentales par exemple, ce gradient pluviométrique peut atteindre 80 mm pour 100 m de dénivelé et les totaux annuels de précipitations atteignent alors parfois bien plus de 1500 mm pour certains massifs

(Griselin et Marlin, 1999 ; Thillet, 2002). L'exposition joue également un rôle important dans la répartition des précipitations, c'est par exemple l'effet de foehn dans les montagnes alpines, qui explique que le versant sous le vent est plus chaud et sec tandis que le versant au vent reçoit davantage de précipitations. A une échelle plus vaste, la position des massifs entre eux a également une incidence sur la répartition de ces précipitations. Les massifs préalpins plus exposés aux précipitations (massif du Chablais par exemple) protègent les massifs plus internes. Autres paramètres importants pour l'étude quantitative de la ressource, celui des précipitations efficaces. Il s'agit du volume total des précipitations au sol après avoir soustrait le volume d'eau évapotranspiré (évaporation du sol et transpiration des végétaux). L'évapotranspiration étant en montagne toujours inférieure aux précipitations, ces espaces sont souvent désignés comme étant les « châteaux d'eau » des plaines environnantes (Viviroli et al., 2007 ; Wiegandt, 2008 ; Viviroli et Weingartner, 2008).

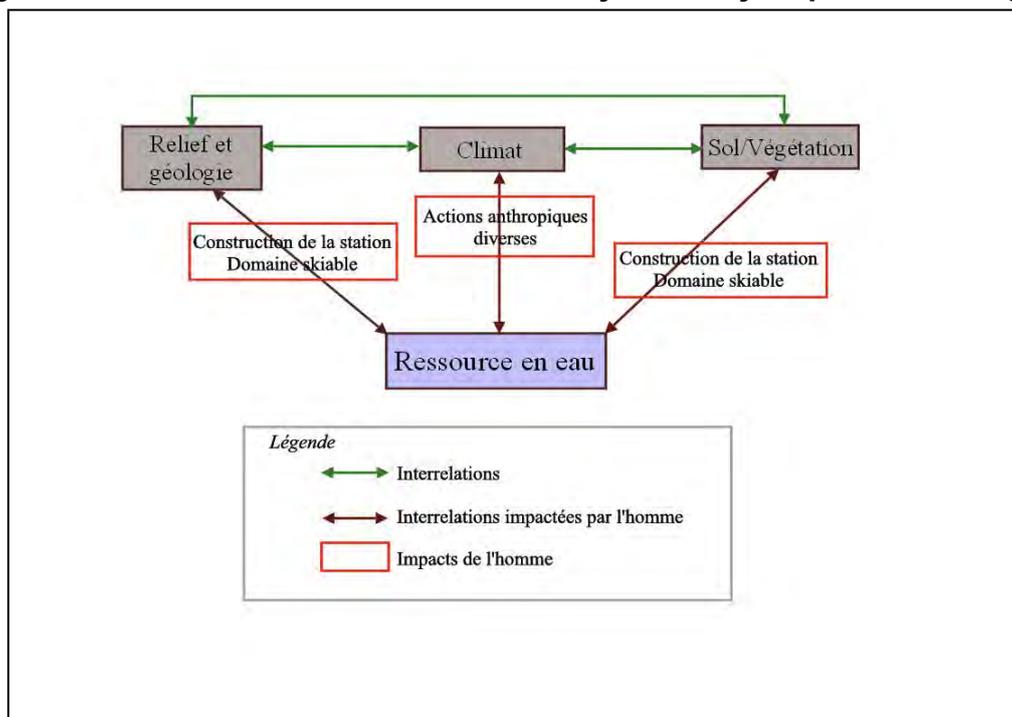
Cette notion de château d'eau se justifie également par les nombreux stockages (neige, glace...). La température de l'air décroît avec l'altitude, dans la couche la plus basse de l'atmosphère (la troposphère), cette décroissance est estimée à $0,65^{\circ}\text{C}$ tous les 100 m. C'est la conséquence de plusieurs phénomènes, un effet thermodynamique dû à la décroissance verticale de la pression et un effet radiatif lié à la vapeur d'eau dont la concentration décroît avec l'altitude. En fonction de l'altitude, l'eau peut-être précipitée sous forme de neige ou de glace et ainsi stockée pour une durée plus ou moins longue. La neige précipitée atteint le sol seulement si la température de l'air est inférieure à 0°C jusqu'au sol, à l'inverse si la température devient positive, le cristal devient une goutte de pluie à environ 400 m sous l'isotherme 0°C (Thillet, 2002). Lorsque cette neige atteint le sol, elle ne se maintient pas toujours. En effet, il est important de ne pas confondre l'isotherme 0°C et le niveau de gel. Le niveau de gel est en effet influencé par l'altitude de l'isotherme 0°C mais seulement en partie, car il dépend aussi de la topographie, du soleil et du sol qui permettent de conserver l'air froid malgré un réchauffement alentour ; c'est le cas notamment dans les cuvettes. Pour quantifier le volume d'eau correspondant aux surfaces de neige, on utilise généralement le concept « d'équivalent en eau, qui correspond à la lame d'eau que l'on obtiendrait par fusion complète du manteau neigeux, sans évaporation ni écoulement ». Ce volume est dépendant de la densité de la neige généralement admise à 100 kg/m^3 , dont 1/10 est formé d'eau, ce qui signifie qu'un centimètre de neige fraîche donne 1 mm d'eau (Reynard, 2000a). La part des précipitations sous forme liquide ou solide conditionne donc le régime des écoulements superficiels.

Le sol et le sous-sol permettent également un stockage de l'eau, mais dans les milieux de montagne le substrat rocheux et les dépôts sur les pentes favorisent surtout le ruissellement de surface. Cependant, la grande hétérogénéité et l'emboîtement des sols de montagne ne permettent pas de généraliser cette approche mais exigent des distinctions. On peut ainsi mentionner le cas des montagnes calcaires (cette distinction sera développée par la suite dans le chapitre sur les données physiques du bassin versant de la Dranse de Sous-Saix) qui

possèdent de nombreux aquifères. Enfin la végétation qui peuple les versants permet d'intercepter les précipitations, de maintenir une certaine humidité dans le sol, de réduire l'évaporation directe du sol, de retarder la fonte de la neige et de ralentir les écoulements de surface.

Tous ces éléments démontrent une grande hétérogénéité des milieux de montagne qu'il faut donc apprécier de préférence à une échelle plus fine afin de déterminer toutes les spécificités physiques d'un territoire. L'étude de ces paramètres climatiques met en avant la qualification de ces montagnes par de nombreux auteurs comme « château d'eau ». Or cette notion est à relativiser, car ces espaces sont aussi caractérisés par des besoins anthropiques nombreux et variés (eau potable, production de neige, activités touristiques diverses...). La notion de ressource en eau et de gestion de cette ressource doit donc être appréhendée au sein d'un système plus vaste englobant le relief, le climat, le sol et la végétation mais aussi les activités anthropiques et économiques, où tous ces éléments interagissent entre eux (Fig. 73).

Figure. 73 Schéma des interrelations du système hydrique en montagne.



Tous ces paramètres conditionnent les volumes d'eau disponibles en surface et en sous-sol mais aussi les stocks anthropiques.

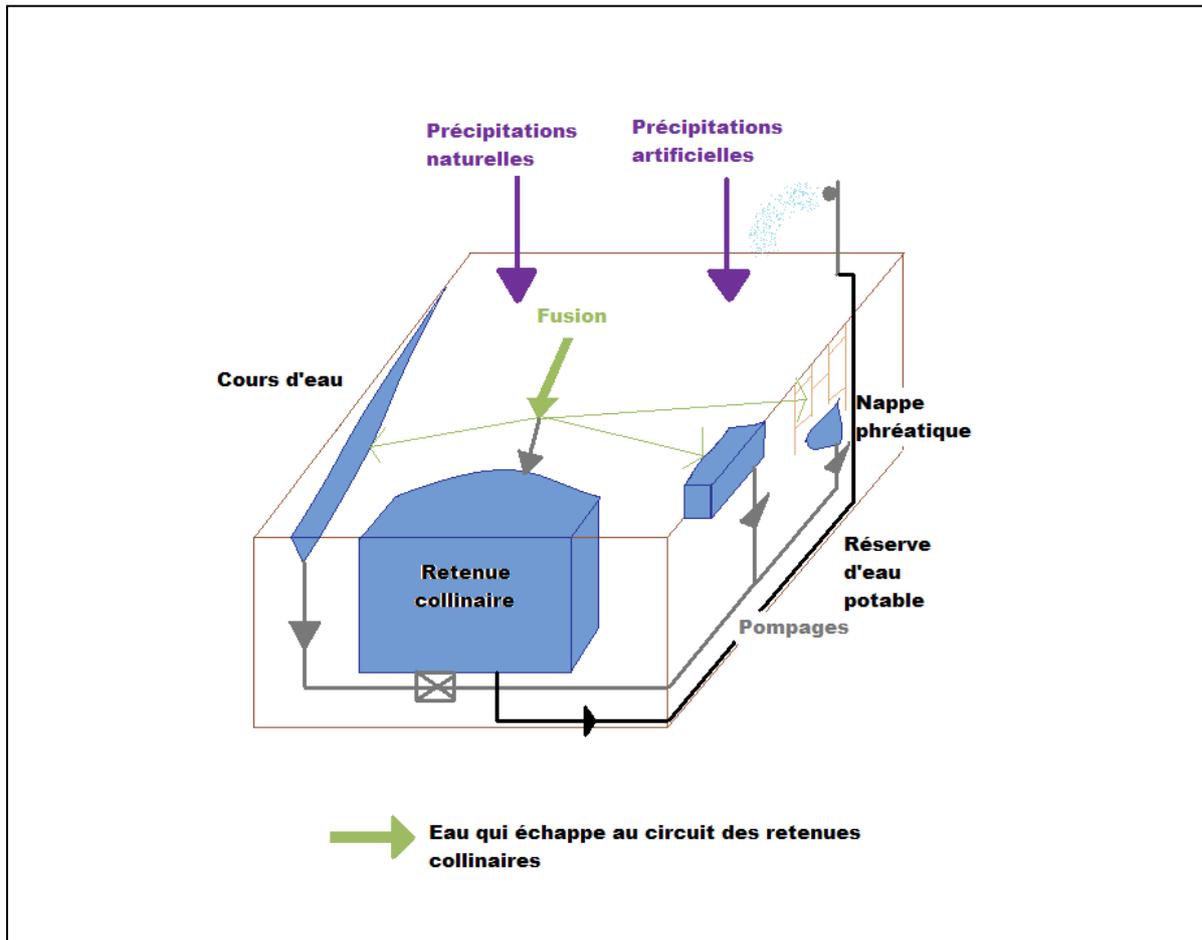
Il faut ajouter à cela que l'eau est souvent associée à la notion de cycle. « Le terme *cycle de l'eau* évoque la permanence des échanges entre l'eau de surface et l'eau atmosphérique par le jeu combiné de l'évaporation et des précipitations. Ces échanges s'effectuent à l'échelle de la planète tout entière. Mais le cycle de l'eau peut être abordé à une tout autre échelle qui est l'échelle stationnelle. » (Cosandey, C, 2007). En effet, il existe des changements d'état permanents de l'eau faisant de ce système une partie importante de chaque sous système naturel, l'hydrosphère pour l'eau à l'état liquide, l'atmosphère pour l'état gazeux et la cryosphère pour l'état

solide. Le cycle hydrologique est considéré comme un cycle fermé, car l'eau qui ruisselle en surface ou rejoint les lacs ou la mer sera à nouveau évaporée dans un temps plus ou moins long. A l'échelle des temps géologiques et à l'échelle spatiale planétaire, l'eau apparaît donc comme un élément renouvelable. Mais cette idée doit être relativisée car le « renouvellement » de la ressource dépend de l'échelle spatiale et temporelle. Le cycle de l'eau est un élément indissociable des systèmes naturels (biosphère, lithosphère, atmosphère, cryosphère) mais aussi de l'anthroposphère. Une seule modification entraîne des changements au sein de chaque système.

2.4.2 Les paramètres anthropiques

Ainsi les modifications anthropiques doivent être prises en compte dans l'étude du cycle de l'eau. « Qu'elles soient le résultat d'une action volontaire, ou plus souvent encore un effet secondaire de cette même action, les conséquences des activités humaines sur les processus hydrologiques s'observent pour toutes les phases du cycle de l'eau, avec toutefois des ampleurs bien différentes. » (C. Cosandey, 2007). Certaines activités, comme la production de neige agissent directement sur la ressource en eau de surface et souterraine par les prélèvements importants et la création de réservoirs. Ces réserves et ces prélèvements nécessitent une gestion efficace de l'eau car des problèmes se posent à deux niveaux d'observation. A l'échelle du bassin versant, il est évident que des prélèvements et la rétention d'eau en amont ont des répercussions à l'aval. Et localement, au sein d'une même station, le partage de la ressource et parfois d'une même réserve entre plusieurs activités a des répercussions sur la gestion de cette ressource (Fig. 74). Dans ce contexte, l'eau serait alors épuisable, ce qui ne permettrait pas la satisfaction de tous les usages sur un temps donné. La gestion de la ressource paraît donc essentielle. Or, plus il existe d'intervenants et de niveaux de décision, plus la gestion de la ressource est compliquée. Or, bien souvent dans les stations de montagne, de nombreuses activités se partagent l'espace et la ressource en eau, et les décisions sont prises à tous les niveaux de prélèvements et d'actions. Idéalement pour bien gérer la ressource, le niveau d'observation et de décision devrait être celui du bassin versant. A cette échelle, il est possible de trouver des solutions pour réduire les effets de la multiplication des activités de montagne puisant dans la ressource et du morcellement des évaluations et des systèmes d'observation, et de proposer un aménagement rationnel de la ressource. Les répercussions en aval des activités de l'amont y sont particulièrement visibles, c'est même la seule échelle permettant cette observation. Le choix de l'échelle d'analyse est donc particulièrement important pour gérer durablement la ressource pour les générations futures.

Figure. 74 Le cycle de l'eau anthropisé par la production de neige de culture.



2.5 ETAT DES LOIS ET REGLEMENTATIONS

Cette partie a pour objectif de faire le point sur les réglementations et les lois encadrant la pratique de l'enneigement artificiel. Différentes échelles d'analyse seront abordées, l'échelle internationale dans un premier temps, puis l'échelle nationale dans un second temps. A l'échelle internationale, une attention plus particulière sera portée aux réglementations transfrontalières et aux réglementations spécifiques à l'arc alpin. A l'échelle nationale, les cas de la France et de la Suisse seront très logiquement traités séparément. Pour la France, les différentes échelles d'analyse du régional au local en passant par le départemental seront traitées. Et à l'échelle de la Suisse on s'intéressera là aussi aux échelles régionales à locales avec un intérêt tout particulier pour l'échelle cantonale. Une attention singulière sera portée aux réglementations spécifiques à la ressource en eau et aux prélèvements qui constituent le cadre de notre étude. L'objectif de ce chapitre est de mieux comprendre le cadre légal de cette pratique afin d'en identifier les limites si limite il y a.

2.5.1 Réglementations internationales

Elles définissent différentes directives pour les gouvernements européens dans le domaine de la gestion de la ressource en eau. La convention d'Helsinki (17 mars 1992) relative aux cours d'eau transfrontaliers et aux lacs internationaux, a pour objectif de promouvoir le renforcement des mesures nationales et internationales visant à la protection écologique et à l'aménagement des eaux superficielles et souterraines. Cette convention contient des principes généraux sur les gestions des ressources et des principes de concertation et de coopération pour un usage raisonnable et équitable. La Directive cadre sur l'eau du 23 octobre 2000 définit les limites pour la gestion et la protection des eaux par grands bassins hydrographiques au plan européen avec une perspective de développement durable. Elle préconise une gestion par bassin versant et définit quatre étapes de travail : l'état des lieux, le plan de gestion, le programme de mesure et le programme de surveillance.

Enfin la Convention alpine (article 14 du protocole tourisme ratifié par la France en 2005 mais pas par la Suisse), autorise la production de neige selon certaines conditions. « Les législations nationales peuvent autoriser la fabrication de neige pendant les périodes de froid propres à chaque site, notamment pour sécuriser des zones exposées, si les conditions hydrologiques, climatiques et écologiques le permettent ». Il faut noter que définir ces conditions n'est pas chose évidente.

2.5.2 Réglementations françaises

2.5.2.1 Réglementations nationales

On constate principalement une multitude de services et d'administrations à différentes échelles spatiales en France. La concertation entre ces différents services peut donc être compliquée, voire inexistante. Une vision large pourtant nécessaire à une bonne gestion des ressources peut donc être complexifiée. Il s'agit maintenant de voir dans le détail chaque organisme et leur rôle à l'échelle nationale, régionale ou cantonale et locale.

En France, il n'existe pas à ce jour de réglementations encadrant la production de neige. Cependant les installations nécessaires à cette production sont particulièrement bien encadrées par les lois sur les prélèvements d'eau, les installations classées et les lois d'urbanisation. Quand aux adjuvants de type Snowmax, leur utilisation n'est pas interdite mais les gestionnaires de remontées mécaniques se sont engagés à ne pas en utiliser.

- **Réglementation nationale sur les prélèvements d'eau en France**

Les prélèvements sont réglementés par le Code de l'environnement et la loi sur l'eau du 30 décembre 2006 (N°2006-1772) qui apporte des modifications à certains articles du code de l'environnement. Toutes ces dispositions visent à assurer « une

gestion équilibrée et durable de la ressource en eau ». Cette gestion prend en compte les adaptations nécessaires au changement climatique. Plusieurs points importants sont à mentionner :

- Ces réglementations visent tout d'abord à préserver les écosystèmes aquatiques, les sites et les zones humides
- A protéger les eaux et à lutter contre toute pollution
- A assurer la qualité des eaux et leur régénération
- A développer, mobiliser, créer et protéger la ressource en eau
- A valoriser l'eau comme ressource économique ainsi qu'à répartir cette ressource
- Mais également à assurer la promotion d'une utilisation efficace, économe et durable de la ressource en eau

La gestion équilibrée doit permettre de satisfaire en priorité la santé et l'alimentation en eau potable de la population tout en satisfaisant et conciliant les différents usages : la vie biologique ; le tourisme ; la protection des sites ; les loisirs et les sports nautiques et toutes autres activités humaines. Plusieurs décrets du Conseil d'Etat fixent les règles de répartition des eaux de manière à concilier les différents usages.

L'article R-214.1 du Code de l'environnement définit les installations (dont les installations liées à l'enneigement artificiel), ouvrages, travaux ou activités qui doivent se soumettre à une procédure de déclaration ou d'autorisation des prélèvements (procédure IOTA). Chaque nouvelle installation doit faire l'objet d'une demande auprès de la Direction Départementale Territoriale (DDT). Un dossier d'incidence du projet sur l'environnement doit être remis. D'après les articles R-214.6 et R-214.32 du Code de l'environnement, ce document doit comporter un certain nombre d'informations :

- Les incidences directes et indirectes, temporaires et permanentes du projet sur la ressource eau
- La compatibilité du projet avec le schéma d'aménagement et de gestion des eaux
- Les mesures correctives ou compensatoires
- Les moyens de surveillance et de contrôle

De plus, un débit minimum doit être conservé à l'aval de toute construction (article L214-18 du Code de l'environnement). Ainsi, les installations d'enneigement artificiel liées à une retenue collinaire ou barrage doivent se soumettre au respect du débit minimum.

« Tout ouvrage à construire dans le lit d'un cours d'eau doit comporter des dispositifs maintenant dans ce lit un débit minimal garantissant en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces vivant dans les eaux au moment de l'installation des ouvrages [...] Ce débit minimal ne doit pas être inférieur au dixième du module du cours d'eau en aval immédiat ou au droit de l'ouvrage. Il correspond

au débit moyen interannuel, évalué à partir des informations disponibles portant sur une période minimale de cinq années. »

Il faut préciser que si le débit entrant est inférieur au débit minimal, les prélèvements ne sont pas autorisés.

Toutes les installations doivent tenir un registre des prélèvements mensuels et annuels d'après l'arrêté du 11 septembre 2003 fixant les prescriptions générales applicables aux prélèvements soumis à autorisation. Les prélèvements supérieurs à 10 000 m³ par an (7 000 m³ par an dans les zones où la ressource est insuffisante pour satisfaire les besoins de tous les usages) doivent être déclarés à l'Agence de l'eau pour acquitter une redevance. Pour l'enneigement artificiel, ces volumes prélevés peuvent être mesurés ou calculés d'après une base de 4 000 m³ d'eau par an et par hectare de pistes enneigées. La loi sur l'eau du 30 décembre 2006 fixe les conditions selon lesquelles l'Etat peut prendre des mesures de limitation ou de suspension provisoire des usages de l'eau pour faire face à une menace ou un risque de pénurie.

L'ONEMA (l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques) joue un rôle de prévention des dégradations, apporte un avis technique au préfet sur les incidences d'un projet et participe au contrôle des usages de la ressource (contrôle des débits minima à l'aval des ouvrages et contrôle des autorisations de prélèvement). Les données sont regroupées au sein du système d'information sur l'eau (SIE introduit par le code de l'environnement du 30 décembre 2006) ce qui permet de diffuser l'information et d'évaluer l'avancée de la politique de l'eau.

- **Réglementation nationale sur les installations classées en France**

Par la présence de compresseurs d'air, certaines installations d'enneigement sont soumises à la réglementation appliquée aux installations classées qui peuvent présenter des dangers ou des inconvénients pour le voisinage, la santé, la sécurité, l'agriculture, la protection de la nature et de l'environnement ou pour la conservation des sites et des monuments. Les décrets n° 77-1133 et 77-1134 du 21 septembre 1977 définissent les procédures applicables si l'installation est soumise à autorisation ou à déclaration. Quand aux compresseurs d'air, ils sont soumis à la réglementation de l'appareil à pression de gaz (décret 63 du 18 janvier 1943 modifié par le décret 2010-323 du 23 juillet 2010).

- **Réglementation nationale sur les bâtiments en France**

Les bâtiments (usine à neige) sont soumis à la procédure du permis de construire d'après le code de l'urbanisme (L 421-1). La Loi montagne n°85-30 du 9 janvier 1985 relative au développement et à la protection de la montagne définit les unités touristiques nouvelles (UTN) soumises à autorisation de l'Etat et de la commission spécialisée de chaque massif. En général, les installations de production de neige se trouvent à l'intérieur de l'enveloppe du domaine skiable équipé, les procédures UTN ne s'appliquent donc pas. Quand aux affouillements et exhaussements du sol, ils peuvent également être soumis à autorisation lorsque la superficie est supérieure à

100 m² et que la hauteur ou la profondeur excède 2 m (article R 442-2 du Code de l'urbanisme).

La loi n°76-629 du 10 juillet 1976 relative à la protection modifiée par la loi 2000-597 du 30 juin 2000 et le décret n°93-245 du 25 février 1993 relatif aux études d'impacts prévoient une étude d'impact pour tout projet « d'aménagement ou d'ouvrage qui par leurs dimensions ou leurs incidences sur le milieu naturel peuvent porter atteinte à ce dernier ». Cette étude doit comporter cinq points :

- Une analyse de l'état initial du site et de son environnement
- Une analyse des effets sur l'environnement, et en particulier sur la faune et la flore, les sites et paysages, le sol, l'eau, l'air, le climat, les milieux naturels et les équilibres biologiques
- Les raisons pour lesquelles le projet a été retenu du point de vue des préoccupations environnementales
- Les mesures envisagées de réduction et de compensation des conséquences dommageables pour l'environnement
- Une analyse des méthodes utilisées pour évaluer les effets du projet sur l'environnement

Il peut y avoir des cas de dispense de fourniture d'étude d'impact selon l'importance de l'installation d'enneigement artificiel envisagée.

- **Réglementation nationale française sur les retenues collinaires**

Les retenues collinaires se sont considérablement développées ces dernières années et retiennent des volumes d'eau plus ou moins importants. Ces retenues sont soumises à plusieurs risques majeurs comme le glissement de terrain ou la surverse. Ces plans d'eau d'une superficie de plus de 1000 m² sont soumis à déclaration ou autorisation. Pour la déclaration, un dossier d'incidences doit être déposé à la préfecture qui délivre alors un récépissé de déclaration avec notification des prescriptions générales à respecter. Pour la demande d'autorisation, le dossier est déposé à la préfecture et soumis à une enquête publique et à l'avis des services de l'Etat. Un arrêté préfectoral définit alors des prescriptions générales à suivre. Le dossier d'incidence déposé doit comporter un certain nombre de renseignements comme la consistance, le volume et la nature de l'ouvrage ; un document d'incidence de l'opération sur la ressource en eau, le milieu aquatique, l'écoulement, le niveau et la qualité des eaux, les modalités d'exécution des travaux, la compatibilité avec le SDAGE et les mesures compensatoires ; et également les moyens de surveillance. Le décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques introduit des classes d'importance décroissante A, B, C et D en fonction de critères géométriques. Suivant la classe de l'ouvrage, les règles à respecter pour la sécurité sont différentes. Si les enjeux sont particulièrement importants pour les personnes et les biens, le préfet peut surclasser un ouvrage. Les retenues collinaires se situent principalement en classe C et D et plus rarement en classe B.

2.5.2.2 Réglementation régionale et locale française

A l'échelle des bassins versants, l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse (RMC) incite et aide à une utilisation rationnelle des ressources en eau. Un document de planification pour l'eau et les milieux aquatiques à l'échelle du bassin, appelé SDAGE (schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux), est mis en place (Wasson, 1996 ; Piégay et al, 2002). Le SDAGE préconise une bonne gestion de la ressource par les services de l'Etat qui doivent veiller à ce que les projets tels que la production de neige tiennent compte des évolutions quantitatives et qualitatives des milieux aquatiques. Le SDAGE établit plusieurs orientations fondamentales comme atteindre et pérenniser l'équilibre quantitatif en améliorant le partage de la ressource en eau et en anticipant l'avenir. Ainsi pour tous projets d'installation ou d'extension d'équipements pour l'enneigement artificiel, un certain nombre d'éléments doivent figurer :

- Une analyse des besoins au regard du changement climatique
- Un bilan des ressources sollicitées et des volumes d'eau utilisés en fonction des périodes
- Une simulation de fonctionnement en période de pénurie hivernale et un zonage de priorité d'enneigement sur le domaine

La loi sur l'eau et les milieux aquatiques a prévu la mise en place de commissions territoriales de bassin. Les commissions territoriales du bassin Rhône Méditerranée jouent un rôle important dans la mise en œuvre du SDAGE en renforçant la capacité de proposition des acteurs locaux et en assurant le suivi des actions sur le territoire. Dans la continuité du SDAGE, le SAGE (Schéma d'aménagement et de gestion des eaux) est un document de planification de la gestion de l'eau à l'échelle d'une unité hydrographique cohérente (bassin versant ; aquifère...) (Getches, 1999 ; Allain, 2001 ; Clarimont, 2001). Par exemple, le SAGE DRAC Romanche a établi un schéma de conciliation de la neige de culture avec les milieux et les autres usages de l'eau à l'échelle des différentes stations du domaine (Sépi conseil, 2007). Le SAGE permet d'avoir une meilleure approche de la gestion des ressources entre les divers usages à l'échelle du bassin versant ou de stations. Actuellement, il n'existe pas de SAGE sur le Dranse de Sous-Saix. En revanche toujours dans la continuité du SDAGE, un Contrat de rivière ou de bassin doit être mis en place. Ce contrat regroupe au sein d'un comité de rivière les acteurs de l'eau à l'échelle locale (collectivités territoriales, usagers et associations et services et établissements publics). Le contrat de bassin versant des Dranses et de l'Est Lémanique est en cours d'élaboration. Un dossier de candidature a été déposé en 2009 par le SIAC (Syndicat intercommunal d'aménagement du Chablais). Les objectifs sont divers, ils consistent entre autre chose à préserver et gérer durablement la ressource et éviter les conflits d'usages. Dans le cadre de ce contrat, des études quantitatives de la ressource en eau sont menées ainsi qu'une étude multifonctionnelle des cours d'eau. Le contrat devrait être terminé et signé en 2014.

Au niveau des collectivités territoriales, la DREAL (Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement) regroupant l'ancienne DIREN (Direction régionale de l'environnement) et la DRE (Directions régionales de l'équipement), coordonne divers services de l'Etat au niveau régional et départemental et assure plusieurs missions d'inspection et de contrôle. Ces missions de contrôle à l'échelle locale viennent compléter celles réalisées à l'échelle nationale (ONEMA et Agence de l'eau) : c'est la police de l'eau. Les infractions peuvent aussi être constatées par la gendarmerie ou le maire. La DDT (direction départementale des territoires du Rhône) a pour mission de mettre en œuvre les politiques de protection et de gestion durable des eaux et les mesures de police qui en découlent, et apporte un appui technique et financier aux Communes dans le cadre par exemple de contrats de rivières.

2.5.3 Réglementations suisses

2.5.3.1 Réglementation nationale suisse

A l'échelle nationale, il n'existe à ce jour aucune réglementation pour la production de neige, celle-ci étant assurée par les cantons. Cependant, l'Assemblée fédérale, l'autorité suprême de la Confédération composée de deux chambres (le Conseil national et le Conseil des Etats) a établi un certain nombre de limitations quand à la production de neige. Selon la Confédération, l'enneigement doit être « mesuré et adapté au site concerné » (Semadeni, 1997). La directive du Département fédéral de l'intérieur (1991) relative aux modifications du paysage en faveur de la pratique du ski précise les critères environnementaux à appliquer lors d'octroi d'autorisations en faveur d'installations d'enneigement artificiel. La protection des biotopes en est d'ailleurs un point essentiel (Loi fédérale sur la protection de la nature et du paysage (LPN) du 1^{er} juillet 1966, RS 451, article 18).

L'OFEV (Office fédéral de l'environnement)⁵ impose la mise en place d'études d'impacts lorsque la superficie destinée à l'enneigement dépasse 5 hectares, selon l'ordonnance relative à l'étude d'impact sur l'environnement (OEIE, 19 octobre 1988, 814.011). Mais de manière générale, lorsqu'une station de ski projette d'enneiger une partie du domaine, la superficie proposée à l'enneigement n'excède que très rarement les 5 hectares. L'OFEV peut s'opposer à l'enneigement lorsque des domaines skiables entiers doivent être enneigés, lorsque la construction d'installations d'enneigement est indispensable pour permettre l'agrandissement de domaines skiables et lorsque des biotopes marécageux et des prairies sèches d'importance nationale sont touchés. Il faut également procéder à des recherches sur les impacts des installations sur le long terme et éviter que l'eau de fonte de la neige artificielle n'atteigne les biotopes marécageux voisins.

⁵ Service compétent en environnement. Intégré au département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication.

La Loi fédérale sur la protection des eaux du 24 janvier 1991 (RS n° 814.20) stipule qu'un débit réservé doit être maintenu dans le lit des rivières et des ruisseaux après prélèvement. La quantité d'eau qui doit rester dans le lit dépend de la date à laquelle les droits d'utilisation ont été acquis. De ce fait, seuls les nouveaux prélèvements (postérieurs à 1992) et les prélèvements existants dont la concession a été renouvelée doivent respecter ces débits. L'utilisation d'additifs pour l'enneigement n'est pas interdite, cependant l'Ordonnance sur les produits chimiques doit être respectée (Ordonnance sur les produits chimiques du 18 mai 2005). Ainsi le fabricant doit évaluer l'impact de ses produits sur l'environnement avant de pouvoir les commercialiser. Dans le cas du Snomax, les autorités compétentes (OFEFP) ont vérifié si le fabricant avait bien effectué ce contrôle.

Malgré ces quelques réglementations, l'échelle cantonale reste la principale échelle de décision et de réglementation quand à l'enneigement.

2.5.3.2 Réglementation suisse à l'échelle du canton

Les principes régissant l'enneigement doivent figurer dans le plan directeur cantonal. Dans le canton du Valais, les autorisations pour l'installation de canons à neige sont délivrées par le canton et les communes à partir du moment où « la localisation est adéquate ». Une localisation appropriée peut par exemple correspondre à une piste de ski du domaine. (Loi fédérale sur l'aménagement du territoire, LAT, 22 juin 1979, RS n° 700, article 22 et 24).

En Valais, un Plan directeur cantonal mis en œuvre par le biais de Fiche de coordination D.10 a été institué (approbation par la Confédération délivrée le 13 février 2003). Le but de la fiche de coordination est de définir les principes et la procédure à suivre lors de l'installation d'enneigement technique. Les installations autorisées doivent :

- Garantir des pistes appropriées pour le retour en station et la liaison entre domaines skiables complémentaires en privilégiant celles qui présentent une topographie favorable
- Mettre à disposition une offre optimale de pistes enneigées pendant la durée normale de la saison d'hiver
- Améliorer les passages ponctuels délicats

L'exploitation des installations d'enneigement doit respecter un calendrier de production de début novembre à fin mars, sauf autorisation exceptionnelle, limiter l'enneigement aux zones appropriées, garantir des ressources en eau et en électricité suffisantes pour couvrir l'ensemble des besoins de la population, soumettre à autorisation les adjuvants, et démonter dès que possible les installations en fin de saison. Trois étapes sont nécessaires à l'autorisation d'enneigement. Il faut tout d'abord justifier du besoin (surface à enneiger) et de l'aptitude du milieu (effets sur l'environnement). Un plan d'affectation des zones doit ensuite être élaboré (plan

de la zone adéquate et plan des équipements). Lorsque les exigences des deux premières étapes sont remplies l'autorisation est délivrée.

2.5.3.3 Réglementation suisse à l'échelle de la commune

C'est surtout au niveau de la gestion des ressources que l'échelle communale intervient. En Valais, les communes ont des compétences assez étendues en matière de gestion des ressources en eau mais celles-ci sont souvent soumises au contrôle de la politique cantonale. La police des cours d'eau et la surveillance sont effectuées par les communes. Elles délivrent également les autorisations d'extraire ou d'amener des matériaux dans le lit des cours d'eau et de détourner l'eau pour tout usage. La distribution de l'eau potable fait partie des tâches attribuées aux communes au travers de l'établissement des plans d'affectation des zones en vertu de la Loi fédérale sur l'aménagement du territoire du 23 janvier 1987 (RS-VS N° 701.1, article 113.2). Les communes doivent veiller à ce que les services publics et les particuliers disposent suffisamment d'eau potable pour assurer les besoins.

Suite à la demande des associations de protection de l'environnement et à la volonté des stations suisses de Champéry et de Morgins d'investir dans de nouvelles installations sur le domaine, une planification globale des Portes du Soleil a été mise en place (Furger, 2008). Une convention a été signée le 19 avril 2006 entre La Fondation suisse pour la protection et l'aménagement du paysage, Pronatura Valais, le WWF Suisse et le WWF Valais d'un côté, les communes de Champéry, Val d'Illicz, Troistorrens et Monthey ainsi que les organismes de remontées mécaniques (Télé Champéry Crosets Portes du Soleil SA, Télé Morgins SA et Pointe de l'Au SA) de l'autre. Cette convention a pour but de mettre en vigueur une planification de l'ensemble du territoire d'altitude des communes, en tenant équitablement compte de tous les intérêts et dans un esprit de développement durable. Mais il faut attendre fin 2012 pour trouver un accord entre toutes les parties prenantes.

Conclusion chapitre 2

Les installations de production de neige sont nées d'une expérience de Walt Schoenknecht reprises par les frères Tropéano en 1950 aux Etats-Unis pour enneiger une petite station du Massachussetts. Depuis, les techniques n'ont cessé de progresser. Apparue en France en 1963 dans les Vosges, la pratique a évolué très rapidement en France mais plus globalement dans tous les pays de l'Arc alpin. En France, le Plan Neige établi en 1964 favorise la modernisation et la croissance des stations. Ainsi pendant l'hiver 1973-1974, on comptait moins de 10 stations équipées soit à peine 10 hectares de pistes enneigées artificiellement contre 1787 hectares en 1995-1996. En 2012, 15 % des domaines skiables sont enneigés artificiellement (jusqu'à 63 % dans certains cas). Plus spécifiquement dans les Alpes du Nord, 92 stations sont équipées (dont 38 pour la Haute-Savoie). En Suisse, 33 % des pistes de ski sont enneigées.

Si les surfaces équipées augmentent, les volumes d'eau utilisés augmentent aussi parallèlement (1523 milliers de mètres cubes prélevés en Haute-Savoie en 2007). Les volumes consommés sont relativement importants. On estime qu'il faut 4000 m³ d'eau par saison pour enneiger 1 hectare de piste. Cette augmentation des équipements des stations françaises est davantage marquée dans l'Arc alpin car la France tente de rattraper son retard et de limiter la concurrence avec les pays voisins. A titre d'exemple, l'Autriche compte 59 % de pistes enneigées. Ainsi les surfaces enneigées ont augmenté de 60 % en cinq ans (1997 à 2002). Aux Etats-Unis 85 à 100 % des domaines sont équipés. Mais ce retard ne fait pas des domaines français et suisses les moins fréquentés. La croissance devrait rester importante dans les années à venir, car de nombreux projets d'extension des installations de neige ont été déposés. Mais cette croissance, rappelons-le, est fortement dépendante de la ressource en eau disponible, de l'état des finances des stations, de l'évolution des réglementations et du changement climatique.

Les raisons d'enneiger sont au nombre de cinq. Il s'agit dans un premier temps de combler un manque de neige certains hivers plus pauvres en précipitations neigeuses naturelles et ainsi d'assurer la pérennité de l'activité (première raison). Les dates d'ouverture et de fermeture de la station sont généralement imposées par les gestionnaires de domaines skiables, les gestionnaires de résidences de tourisme. L'aléa de l'enneigement, variable d'une année à l'autre, n'est plus admis. L'enneigement permet donc de garantir l'activité sur l'ensemble de la durée de la saison (deuxième raison). Dans une logique de rentabilité, les stations s'équipent pour réalimenter le manteau neigeux dans les secteurs très fréquentés où l'usure est rapide (troisième raison), mais aussi pour allonger la saison touristique dès que possible et ainsi augmenter les bénéfices (quatrième raison). Enfin depuis quelques années, la production de neige est un outil de préparation des pistes en début de saison, permettant de créer une sous couche qui assurera une meilleure tenue de la neige fraîche (cinquième raison). Toutes ces raisons expliquent le développement

important de l'enneigement dans les stations, même si aujourd'hui les logiques économiques priment.

Les installations de production de neige sont aujourd'hui très modernes. Deux types de canons (bifluide et monofluide) sont reliés à des conduites d'air et d'eau et au système informatisé de commande à distance de ces canons. Dès que la température humide de l'air s'abaisse au dessous de -4°C , la production démarre. L'alimentation en eau de ces canons peut-être multiple. Mais de manière générale l'approvisionnement se fait soit par pompages dans des retenues collinaires spécifiquement construites pour l'approvisionnement des canons, soit par prélèvements directs dans les cours d'eau ou soit par captages dans les réservoirs d'eau potable ou les retenues hydroélectriques. Ces deux dernières sources sont les moins répandues car elles nécessitent des accords avec les gestionnaires. Aujourd'hui, les retenues collinaires tendent à se développer (41 ouvrages en Haute-Savoie pour un volume total stocké de 1 581 200 m³). Aujourd'hui, tous les opérateurs de domaines skiables français et suisses nous ont confirmé ne plus utiliser d'adjuvants pour faciliter la production.

Les réglementations même si elles ne s'appliquent pas directement aux productions de neige en France sont particulièrement complètes, que ce soit concernant les prélèvements d'eau ou bien encore les installations et les bâtiments associés. Concernant les prélèvements d'eau dans le milieu, le maintien d'un débit réservé est particulièrement important. Cependant quelques limites doivent être soulignées. Les débits minimums imposés à 1/10 du module interannuel du cours d'eau n'ont parfois pas de sens en montagne pour de petits cours d'eau au débit très faible, celui-ci pouvant geler en hiver. Certains arrêtés préfectoraux interdisent les prélèvements à l'étiage mais ce n'est pas toujours le cas. Les volumes prélevés pour la production de neige doivent être déclarés à l'Agence de l'eau. Mais elle ne reçoit pas toujours l'ensemble des données de prélèvements et ne peut donc pas assurer son rôle de contrôle. Chaque utilisateur de la ressource déclare individuellement ses prélèvements, ce qui ne facilite pas une vision d'ensemble et les conséquences à échelle plus grande, comme à l'échelle régionale par exemple.

Quand à la Suisse, les réglementations sont là encore suffisamment développées pour réglementer la production de neige et assurer la préservation du milieu et des ressources en eau. Mais les échelles de réglementations, cantonales ou communales entraînent une sectorisation des lois qui peut conduire à des contradictions. C'est donc le manque de concertation qui peut être ici un frein à une bonne gestion.

Pour être efficaces, les réglementations doivent pour la France et pour la Suisse être spécifiques à chaque type d'usage et en particulier à celui de la production de neige, mais également être mises en place et contrôlées par une seule et même structure administrative définie au préalable et indépendante.

CHAPITRE 3. LA ZONE D'ETUDE

Introduction chapitre 3

Ce chapitre a pour objectif de décrire la zone d'étude et de poser le cadre spatial de la recherche.

Une première partie vise à décrire le domaine transfrontalier des Portes du Soleil et les limites de ce domaine. Dans un second temps, les caractéristiques climatiques de ces espaces montagnards sont décrites, que ce soit les précipitations, les températures, l'enneigement ou l'exposition. L'échelle d'étude est régionale car c'est à cette échelle que nous avons pu obtenir des données. Dans une troisième partie, les spécificités géologiques, géomorphologiques et hydrologiques des deux bassins versants étudiés seront décrites. Il s'agit de mettre en avant les spécificités de ces bassins versants pour comprendre le fonctionnement du milieu et analyser les impacts de la production de neige. L'artificialisation du bassin par les installations de production de neige et de la production d'eau potable sera mise en avant. Puis nous décrirons chacune des deux stations d'étude, Avoriaz et Champéry, en mettant en avant les spécificités de chacune. En effet, la station d'Avoriaz est une station skis aux pieds et la station de Champéry est une station familiale. Les particularités de ces deux stations mettent en avant la nécessité d'un bon enneigement tout au long de la saison et par conséquent l'utilisation de neige artificielle. Enfin, les installations d'enneigement mécanique de ces deux stations seront décrites. Il s'agit de comprendre l'utilisation de l'enneigement et les modes de prélèvements d'eau qui constitueront le cadre de nos recherches sur le terrain.

3.1 LE DOMAINE TRANSFRONTALIER DES « PORTES DU SOLEIL »

3.1.1 Description du domaine

La station d'Avoriaz se situe dans le Chablais, à l'extrême nord des Alpes françaises, dans le département de Haute-Savoie en région Rhône-Alpes (Fig. 75). La station de Champéry se localise dans le Chablais valaisan, dans le canton du Valais, district de Monthey. Ces deux stations alpines très proches l'une de l'autre appartiennent au massif des Préalpes du Nord. Elles font partie du domaine transfrontalier des Portes du Soleil créé il y a près de 40 ans (en 1974) qui regroupe 12 stations suisses et françaises (Abondance, Avoriaz, Châtel, La Chapelle d'Abondance, Les Gets, Montriond, Morzine-Avoriaz, St Jean d'Aulps, Champéry, Morgins, Torgon, Val-d'Illiez-Les Crosets–Champoussin). C'est le plus grand domaine skiable français en termes de kilomètres de pistes, soit d'après les données du regroupement des stations des Portes du Soleil, 650 km de pistes et 196 remontées mécaniques. Ce domaine s'étend de 930 m d'altitude (station d'Abondance) à 2466 m (sur le domaine d'Avoriaz). Aujourd'hui, les sociétés d'exploitation des remontées mécaniques des stations du domaine se réunissent en début de saison pour fixer les dates d'ouverture et de fermeture du domaine. Les stations sont donc tenues de respecter ces dates. Ainsi, pour enneiger le domaine et assurer une saison de ski complète dans de bonnes conditions, l'ensemble des stations se sont équipées en canons à neige et on compte en 2012, 764 canons à neige sur l'espace des Portes du Soleil.

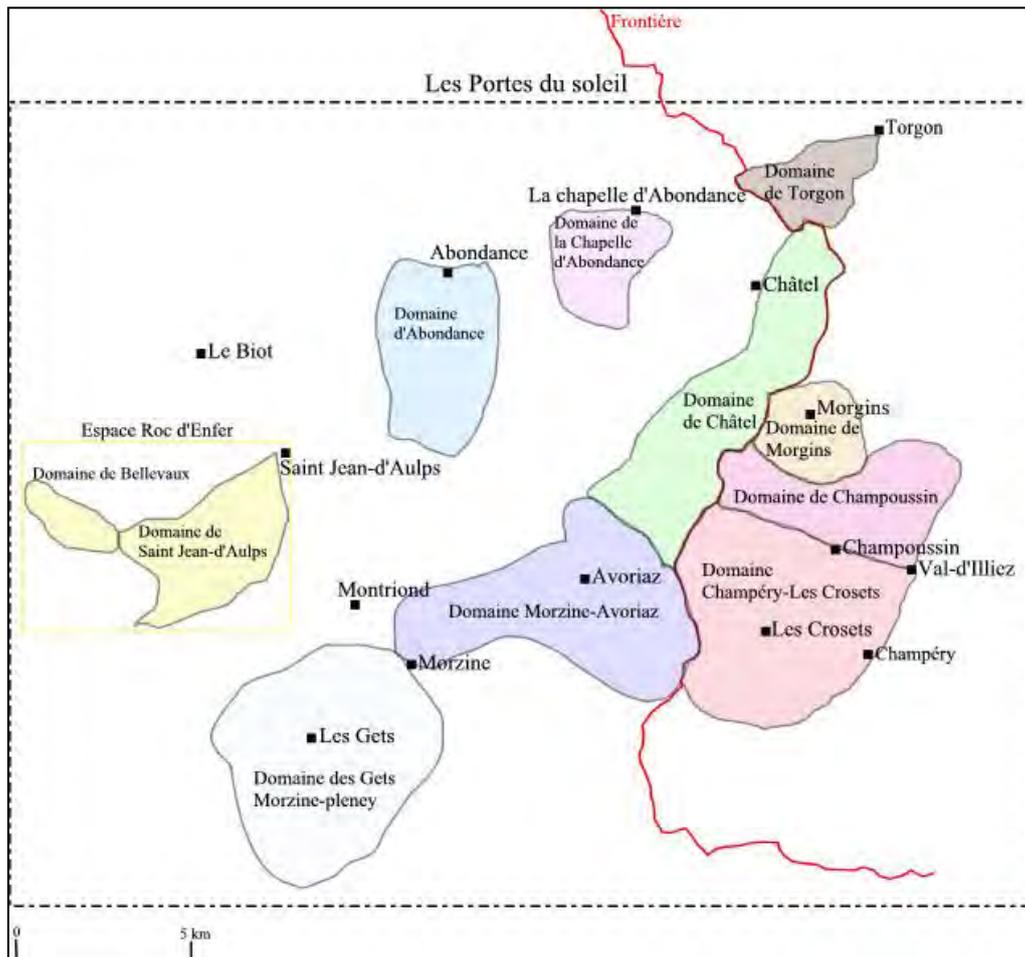
▪ Avoriaz

Cette station est située à une altitude de 1800 m, mais son domaine skiable s'étend jusqu'à 2466 m d'altitude en direction des Hauts-Forts ; elle compte environ 70 km de pistes. Au cœur du domaine des Portes du soleil, elle doit assurer la liaison entre les divers secteurs de ski et plus particulièrement entre les stations françaises de Morzine, Montriond et les Gets et vers la Suisse, avec les stations de Champéry, Morgins et Val-d'Illiez-Les Crosets-Champoussin.

▪ Champéry

Station située à 1050 m d'altitude, elle est directement reliée à la station d'Avoriaz. La station compte aujourd'hui 50 km de pistes pour un domaine qui s'étend jusqu'à 2250 m d'altitude.

Figure. 75 Carte du domaine skiable des Portes du Soleil. (D'après la carte topographique de Morzine au 1/25 000).



3.1.2 Les limites choisies

Parmi les nombreuses stations de ski utilisant l'enneigement artificiel, il a fallu faire un choix. Celui-ci s'est appuyé sur une volonté de comparer les pratiques, les usages et les problèmes afin de répondre au mieux à la problématique posée au départ. Les stations d'étude choisies devaient être suffisamment différentes pour appréhender l'impact de l'enneigement mais suffisamment proches pour être régies par les mêmes contraintes climatiques, topographiques et de gestion. Ce choix s'est donc porté sur un domaine transfrontalier offrant la possibilité de travailler à l'échelle de deux stations, l'une française, l'autre suisse, contraintes toutes deux par les exigences de la gestion du domaine des Portes du Soleil, mais régies chacune par les lois propres à chaque pays et des modes de gestion particulièrement différents. Le choix s'est finalement porté sur la station de Champéry pour la Suisse et la station d'Avoriaz pour la France qui offraient toutes deux la meilleure possibilité d'obtenir des données, soit par entretien avec les interlocuteurs de la station, soit au moyen de mesures dans le bassin versant.

Pour la station d'Avoriaz, la zone d'étude choisie est celle du bassin versant de la Dranse de Sous-Saix qui supporte la station et le domaine skiable d'Avoriaz (Fig. 76). Ce choix se justifie par la volonté de quantifier l'utilisation de l'eau au sein de la station (eau potable, neige de culture, diverses activités touristiques...) et d'évaluer les impacts sur l'hydrosystème du bassin versant de la Dranse de Sous-Saix. La configuration du site se prêtait tout à fait à cette étude, car en effet, la station et le domaine skiable sont tous deux approvisionnés en eau par le lac 1730 qui se localise au cœur du bassin versant et qui joue un rôle majeur sur l'hydrosystème. Nous y reviendrons de manière plus détaillée. Pour la station de Champéry, la limite choisie est celle du domaine skiable de Champéry (Fig. 77). En effet, il s'est révélé impossible d'effectuer des mesures sur les deux terrains d'étude, pour des raisons financières mais aussi techniques. Le choix s'est donc porté sur une comparaison des usages et des techniques de production de la neige entre la station de Champéry et celle d'Avoriaz. Dans ce cadre, l'échelle d'étude de la station s'est révélée plus judicieuse pour réaliser cette comparaison et a permis d'acquérir un certain nombre de données.

Figure. 76 Le domaine skiable d'Avoriaz et le bassin versant de la Dranse de Sous-Saix support de l'étude.

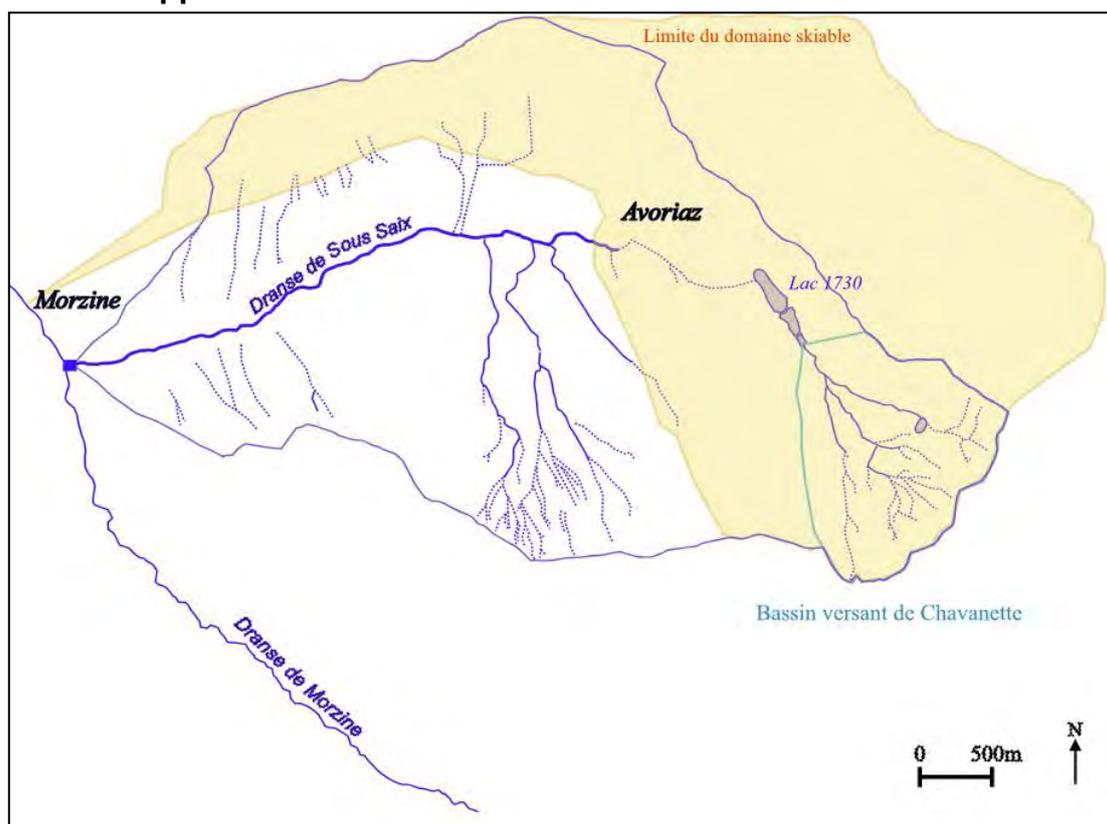
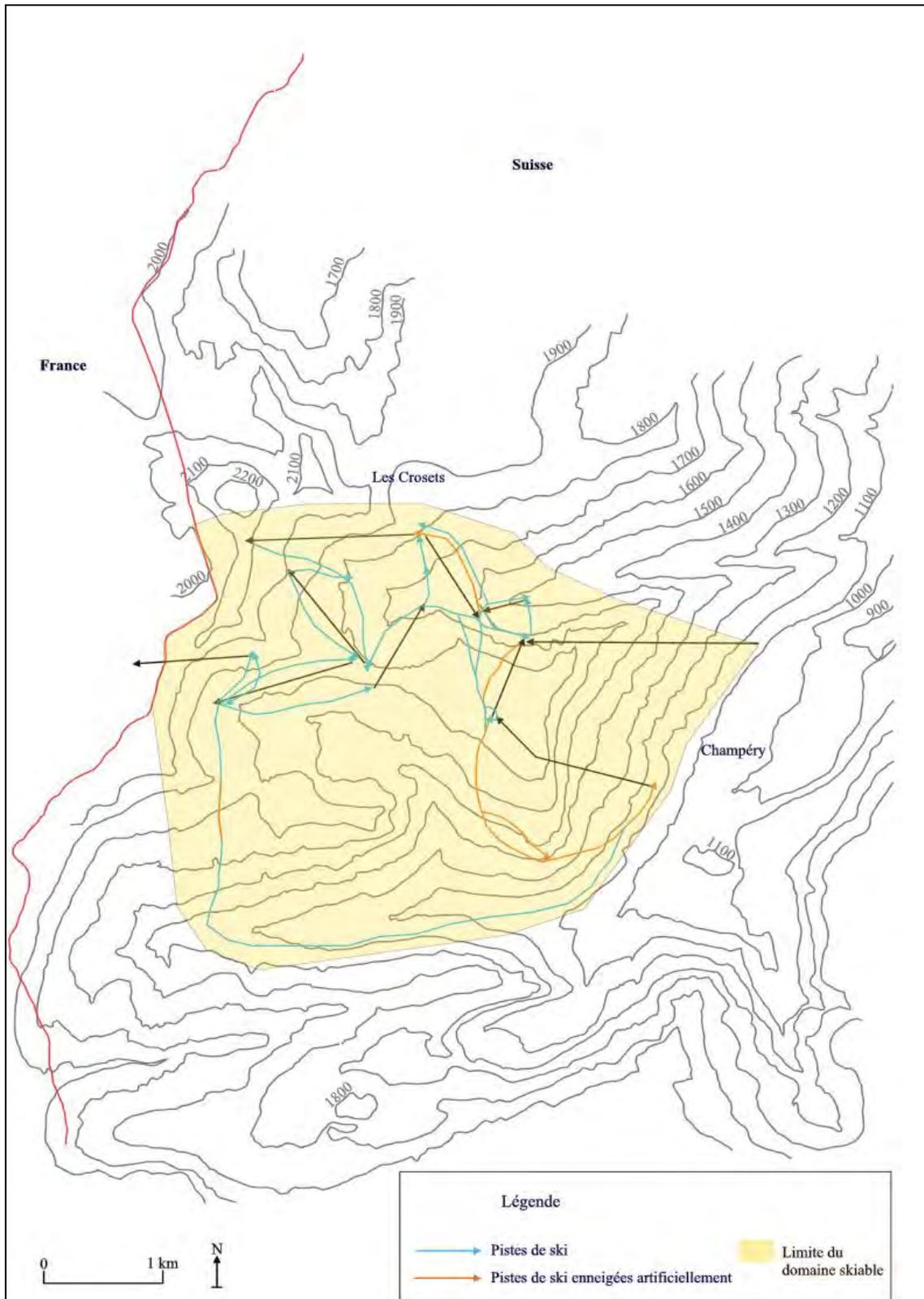


Figure. 77 Le domaine skiable de Champéry.



3.2 LES CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES REGIONALES

La climatologie des montagnes est une science relativement jeune. On peut citer plusieurs ouvrages traitant des grandes généralités climatiques alpines (Whiteman, 1982, 2000, 2003; Monti et al., 2003). Mais nous ne nous intéresserons ici qu'aux spécificités du massif du Chablais et des secteurs d'étude. Les études étant rares, nous nous appuyerons à l'échelle locale sur les données climatiques obtenues à l'aide des stations de mesures MétéoFrance et de fiches climatiques aidant aux prévisions météorologiques (Souhaite, 1993).

En s'appuyant sur des séries climatiques sur la période 1959-2009 à l'échelle des Préalpes du Nord, le climat régional moyen se révèle être pluvieux (1 417 mm/an) et tempéré (8,8 °C de moyenne annuelle). Les totaux pluviométriques sont stables au cours de l'année (toujours supérieurs à 100 mm/mois), et les températures moyennes varient entre 0,7 °C en janvier et 17,6 °C en juillet⁶(Bigot et Rome, 2010). Dans le détail, des nuances existent, avec des températures comprises entre 3,4 °C au Nord (massif du Chablais à 1800 m d'altitude) et 5,1 °C au Sud (massif du Mercantour) à 1800 m d'altitude (Durand *et al.*, 2009).

A cette échelle, la variabilité spatio-temporelle des précipitations est grande et étroitement dépendante des conditions topographiques locales et de divers paramètres.

- D'un point de vue topographique, l'influence du relief est importante car il détermine l'ensoleillement. L'énergie reçue sur les versants varie fortement ; sur un versant nord la quantité d'énergie interceptée par les versants est diminuée par quatre par rapport à un versant exposé au sud (pour une pente à 30°C et de latitude 45°N) (Choisnel, 1987).
- La forêt. Son influence est plus compliquée à déterminer. En règle générale, en journée, l'ombre des arbres va diminuer les températures, et au contraire protéger du froid la nuit. L'humidité y est plus forte. Mais ces constats généraux sont loin d'être généralisables (Chaix, 2007). Ainsi une piste en forêt orientée au Sud connaît donc une élévation moins marquée des températures en journée.

Autre facteur important du climat régional, les variations interannuelles. Celles-ci ont été mises en évidence par plusieurs auteurs (Bigot et Rome 2010, Bigot et al., 2006, Durant et al., 2009).

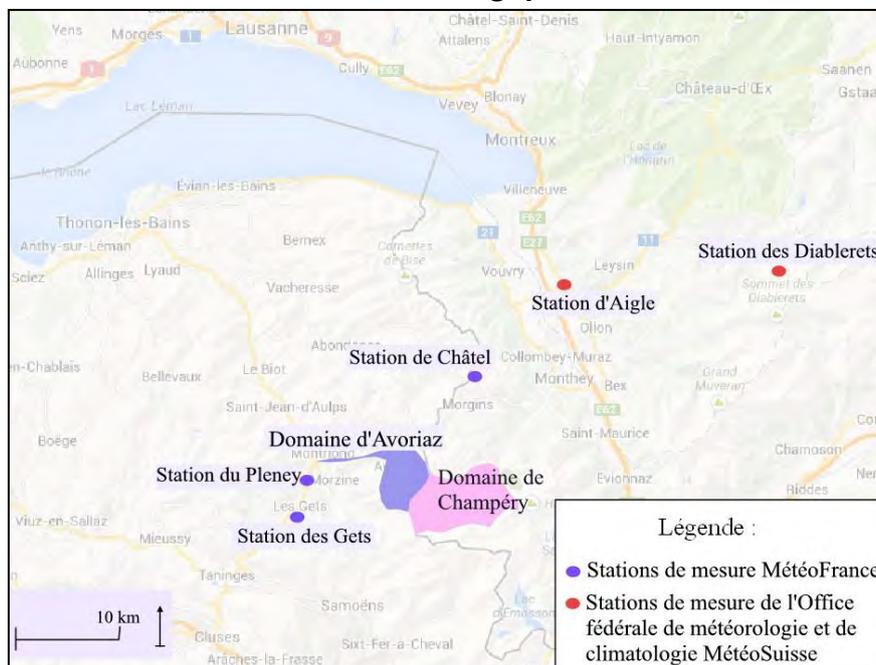
A une échelle plus fine, le Chablais est soumis à un climat montagnard caractérisé par des contrastes marqués liés en particulier au relief (gradient altitudinal des températures et de la pluviométrie, conditions thermiques différentes suivant l'exposition des versants). Selon une étude réalisée par la région Rhône-Alpes (Région Rhône-Alpes, 2009), il existe deux situations distinctes, celle du Haut-Chablais et celle du Bas-Chablais. Nous nous intéressons plus particulièrement à la

⁶ Situées à une altitude moyenne de 786 m.

situation du Haut-Chablais où se situent les stations d'étude. D'après cette étude, le climat est plutôt frais et arrosé avec une moyenne annuelle de température d'environ 8°C et plus de 1500 mm de précipitations annuelles, voire plus de 2000 mm pour certaines années. Une part importante de ces précipitations tombe sous forme de neige avec une limite pluie neige souvent située autour de 1200 à 1500 m d'altitude. Ces précipitations se répartissent de manière relativement homogène sur l'ensemble de l'année, avec un pic en début d'hiver (novembre/décembre) et dans une moindre mesure au printemps (Région Rhône-Alpes, 2009 et Bouët, 1986).

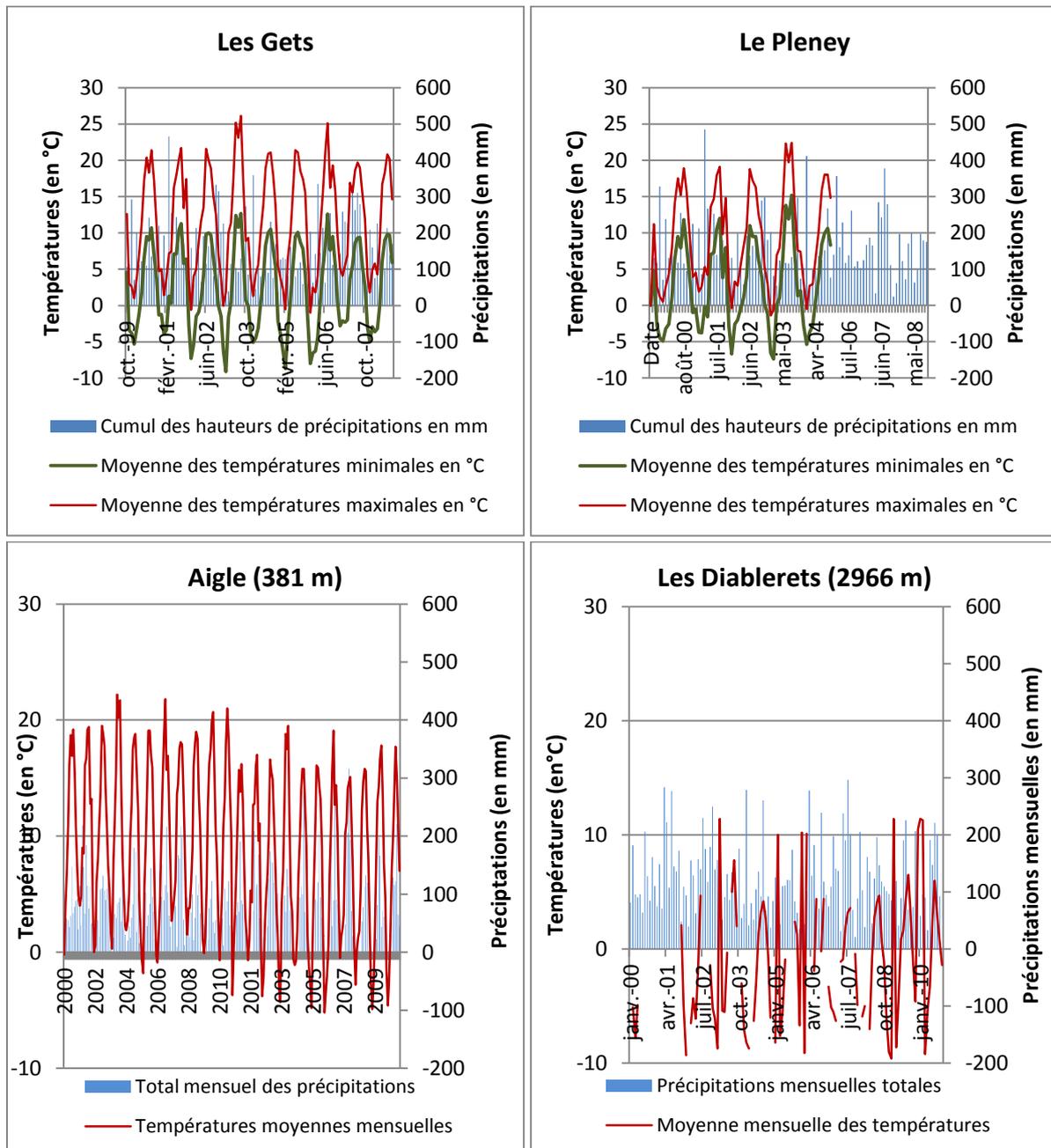
Pour compléter cette étude climatique, nous avons obtenu les données de cumul des hauteurs de précipitations, du cumul de neige fraîche, des moyennes de températures minimales, des moyennes des températures maximales, de la durée du gel à un pas de temps quotidien et mensuel de septembre 1999 à août 2012. Ces données ont été fournies par le centre national de météorologie française MétéoFrance pour les stations de mesures de Châtel (1135 m), Les Gets (1172 m) et Le Pleney (1515 m) existantes sur le terrain, et par l'Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse pour les stations de mesures des Diablerets (1162 m) et d'Aigle (381 m) (Fig. 78). Ce sont les stations de mesures les plus proches géographiquement des zones étudiées, mais le nombre de paramètres mesurés est limité.

Figure. 78 Localisation des stations météorologiques.



Si on observe la répartition mensuelle des températures et des précipitations de 1999 à 2012 pour les stations des Gets (1172 m) et du Pleney (1515 m), on constate une certaine régularité interannuelle et saisonnière des précipitations et des variations des températures (Fig. 79 et Fig. 80).

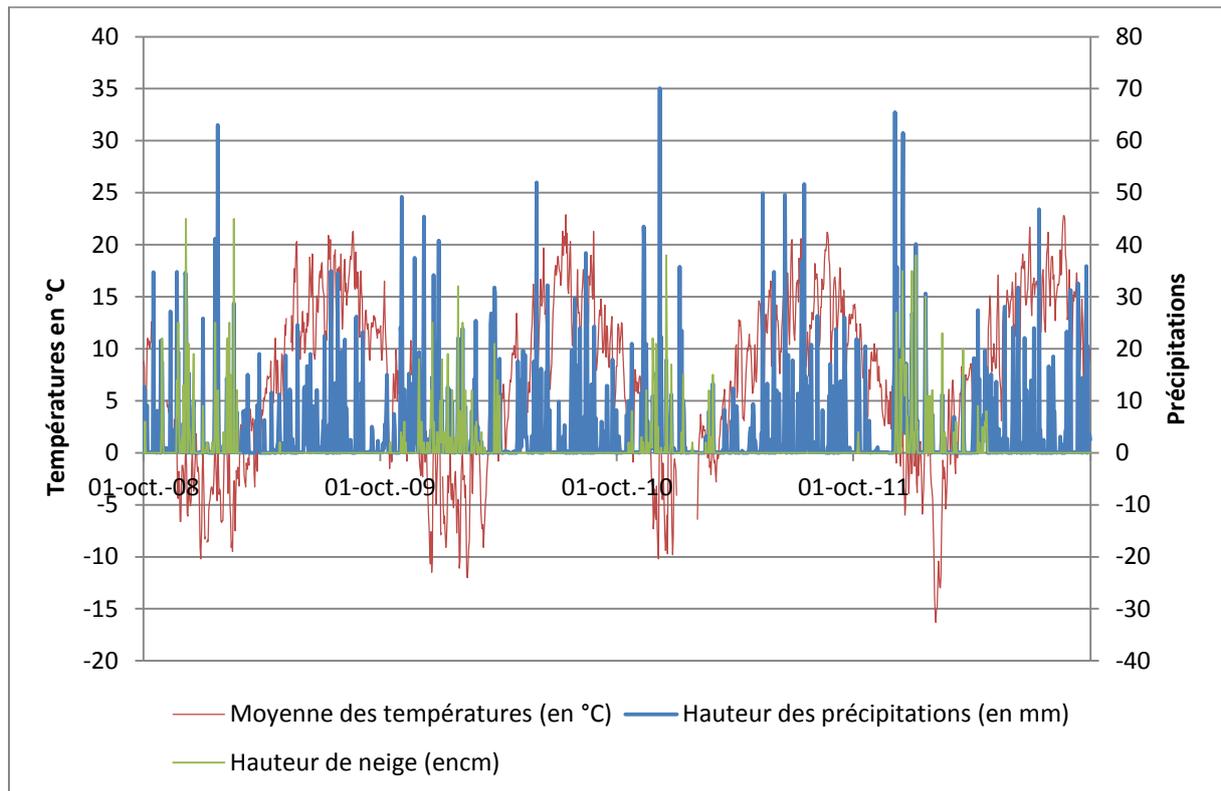
Figure. 79 Répartition mensuelle des températures et des précipitations de 1999 à 2008 pour les stations des Gets, Pleney, d'Aigle et des Diablerets. (D'après des données de MétéoFrance et de l'Office fédérale de météorologie et de climatologie MétéoSuisse).



Au niveau des températures, celles-ci sont négatives durant les mois d'hiver avec des valeurs moyennes comprises entre - 3 et 2°C (et des températures minimales jusqu'à -10°C) et une hausse au printemps dès le mois de mars pour atteindre des

températures moyennes estivales comprises entre 12-20°C. Certaines années attirent pourtant notre attention. Ainsi pour les hivers 2000-2001, 2006-2007, 2007-2008 et 2011-2012, les températures relevées sont supérieures à 0°C. Ainsi en décembre 2000 la température moyenne relevée est de 2°C avec des températures maximales atteignant jusqu'à 5°C (Fig. 81).

Figure. 80 Répartition journalière des températures et des précipitations de 2008 à 2012 aux Gets. (D'après les données de MétéoFrance).



En 2006-2007 et 2007-2008, les températures sont positives de décembre à mars (plus de 1°C relevé aux Gets). L'hiver 2011-2012 a également connu des températures plus élevées au mois de décembre comprises entre -2 et 5°C aux Gets (Fig. 80). Ces conditions de températures sont particulièrement problématiques d'un point de vue de l'enneigement. Les précipitations tombent alors sous forme de pluie et la production de neige du début de saison ne peut commencer. L'augmentation des températures est là encore très variable d'une année à l'autre. Globalement, les températures deviennent positives dès le mois de mars (jusqu'à 4.7°C de moyenne pour le mois de mars 2012). Certaines années, cette hausse des températures est moins marquée, c'est le cas de l'hiver 2010 où les températures moyennes du mois de mars n'ont pas dépassé les 0°C. Pourtant, plus la hausse est marquée, plus la fonte du manteau neigeux sera importante. Ainsi dans le cas d'une élévation des températures dès le mois de mars, la fonte entraîne une diminution de la hauteur de neige sur les pistes de ski. Plus problématiques encore, les redoux en cours d'hiver qui provoquent une fonte du stock neigeux et rendent impossible la production de

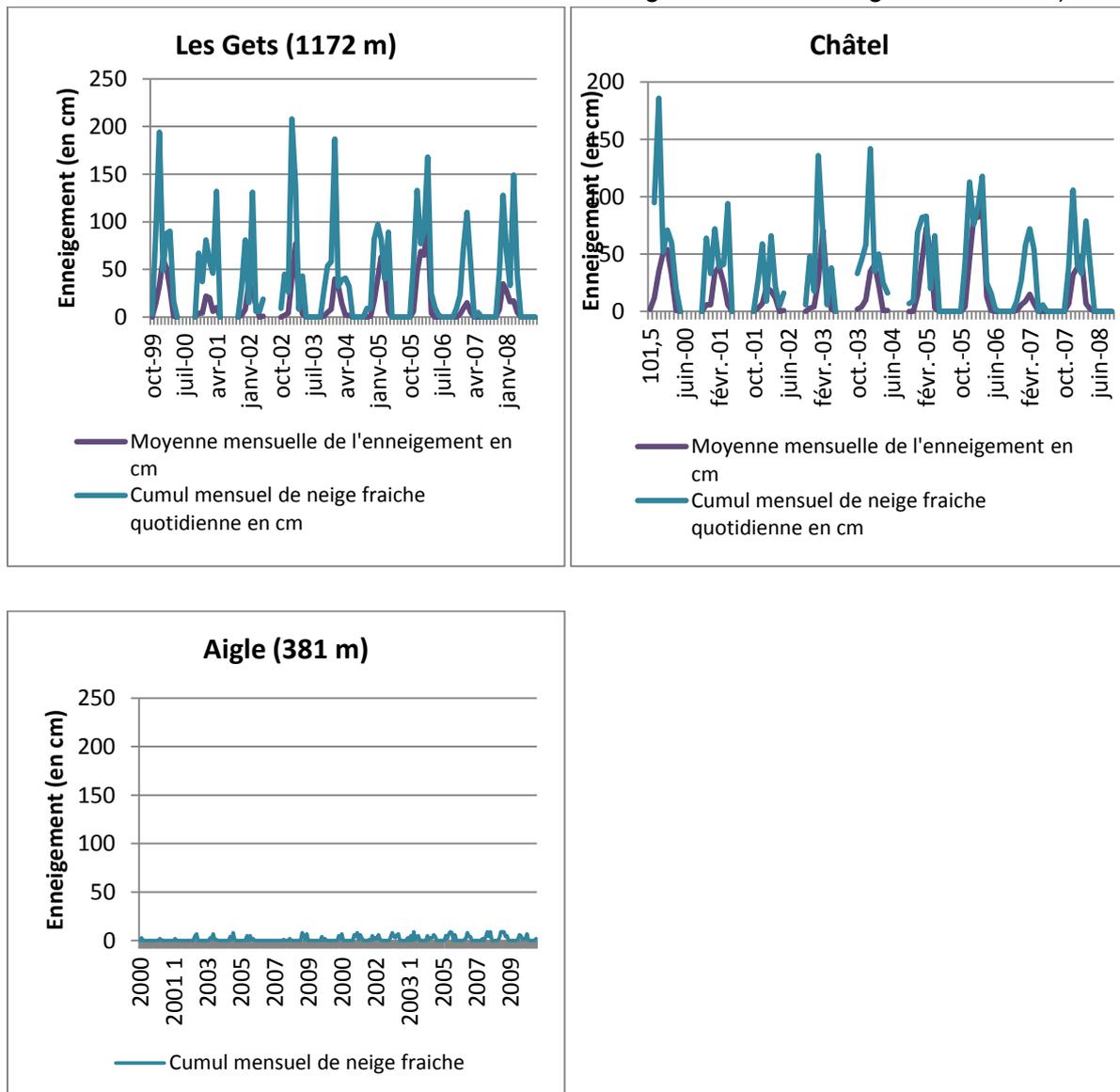
neige de culture. Ce fut le cas pour l'hiver 2011. En février, les températures moyennes mesurées sont de 0.4°C et atteignent certains jours jusqu'à 4°C. Pour la station d'Aigle située à plus basse altitude (381 m) en plaine, les températures hivernales sont légèrement plus importantes que dans les autres stations de mesures. On relève ainsi des moyennes mensuelles hivernales comprises entre 0 et 3°C et des moyennes estivales comprises entre 15 et 20°C. A l'inverse aux Diablerets (1162 m), les températures sont plus basses du fait de l'altitude plus élevée. Les températures moyennes mensuelles hivernales sont comprises entre -5 et -8°C et les températures mensuelles estivales sont de l'ordre de 5 à 8°C. Cette diminution progressive des températures avec l'altitude est particulièrement marquée sur les versants nord de septembre à mai (Bezinge et Bonvin, 1974).

Si l'on observe les données de précipitations, les cumuls mensuels de précipitations sont à peu près similaires pour les deux stations de mesure des Gets et du Pleney. Une étude de Bezinge et Bonvin (1974) des précipitations entre le Val d'Illeiez et les Dranses confirme cette première observation. Les valeurs de précipitations relevées sont globalement semblables des versants est aux versants nord. Cependant, celles-ci augmentent avec l'altitude dès 1000 m dans les secteurs de Chamonix, et du Val d'Illeiez (Bezinge et Bonvin, 1974). Elles se répartissent de la manière suivante : on observe une nette augmentation des précipitations à l'automne et une baisse des précipitations au cours de l'hiver. En hiver, les totaux de précipitations cumulées sont de l'ordre de 50 à 130 mm (Les Gets et Le Pleney), de 100 à 150 mm aux Diablerets et légèrement plus bas à Aigle (environ 50 mm). Cependant, certaines années connaissent des cumuls importants, 447.9 mm pour le mois de décembre 2011, contre 160.7 mm en décembre 2008 ou 173.7 mm en décembre 2010. La recharge des ressources en eau est ainsi facilitée. A l'inverse, le cumul de neige, pourtant indispensable en début de saison pour garantir l'ouverture du domaine est parfois faible, 78 cm en décembre 2012 contre 171 cm en 2008 et 273 cm en 2011 (Fig. 83). Les précipitations neigeuses connaissent de fortes variations interannuelles. En moyenne, de novembre à mars (période de production de neige de culture), le cumul total de neige fraîche est de 430 cm. Le cumul mensuel est quant à lui de l'ordre de 60 à 100 cm (aux Gets) et de 100 à 110 cm (à Châtel). La encore on constate une certaine irrégularité interannuelle. L'hiver 2010-2011 a cumulé 288 cm soit presque 2 fois moins de neige qu'en moyenne et l'hiver 2006-2007, 269 cm (Fig. 81). Pourtant situé à même altitude, ces deux stations connaissent une légère différence d'enneigement. A Châtel, ce cumul moyen annuel est légèrement plus faible, de 350 cm. Le cumul de neige est également plutôt faible pour l'hiver 2006-2007 avec 226 cm. Le mois de décembre qui caractérise l'ouverture de la station de ski et la production des stocks de neige artificielle est marqué par de grandes disparités interannuelles. Ainsi, en décembre 2000, 2002 et 2006, les hauteurs de neige cumulées sont particulièrement faibles aux Gets, respectivement, 37, 26 et 23 cm. A Châtel, ces mêmes hivers connaissent de faibles cumuls de neige, 33, 18, 27 cm. Généralement, ces faibles précipitations neigeuses sont associées à des températures positives (supérieures à 0°C). On relève jusqu'à 5°C en décembre 2000

aux Gets. A l'inverse, certains hivers connaissent de forts cumuls de neige dès le mois de décembre, 133 cm en décembre 2005 et 128 cm en décembre 2007 aux Gets (respectivement -5°C et -2°C en moyenne des températures pour les mois de décembre) et 186 cm en décembre 1999, 113 cm en décembre 2005 et 106 cm en décembre 2007 à Châtel. Enfin, le cumul de neige est plus faible à Aigle, car rappelons le, la station se localise dans la vallée à une altitude plus faible que les autres stations de mesure. Ainsi le cumul mensuel de neige fraîche est en moyenne de 3 à 5 cm et le cumul total moyen pour la saison d'hiver de 11 cm.

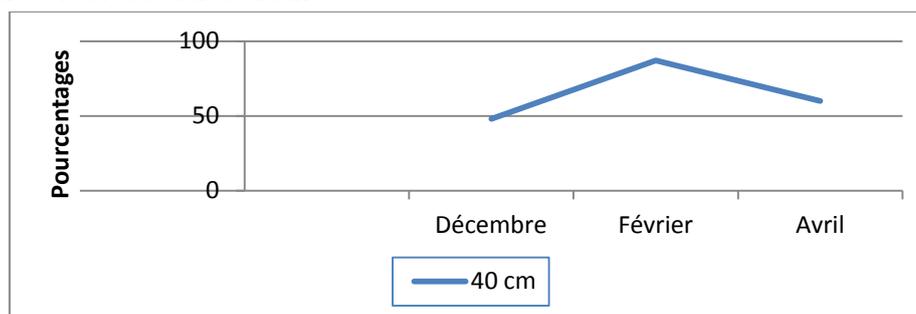
La variabilité interannuelle des températures hivernales, des précipitations et des cumuls de neige est mise en avant par ces informations de MétéoFrance. C'est justement la raison évoquée par les opérateurs de domaine skiable pour justifier la production de neige et l'évolution de cette production ces dernières années.

Figure. 81 Moyenne mensuelle de l'enneigement de 1999 à 2008. (D'après des données de MétéoFrance et de l'Office fédérale de météorologie et de climatologie MétéoSuisse).



Enfin en ce qui concerne la part des précipitations neigeuses, la probabilité d'enneigement des stations des Portes du soleil sur une période de 1965 à 2000, pour une hauteur de neige damée d'environ 40 cm (condition nécessaire pour l'ouverture du domaine) est de 48 % le 25 décembre et de 60 % le 25 avril. Il semble donc nécessaire pour ces stations de recourir à l'enneigement artificiel en début et fin de saison pour garantir l'ouverture du domaine aux touristes (Fig. 82)

Figure. 82 Probabilité moyenne d'enneigement (en pourcentage) pour les stations des Portes du Soleil.



Le risque existant représente les périodes dans l'année où la probabilité d'avoir une hauteur de neige fraîche à 40 cm est inférieure à 70%. On rappelle que pour des raisons de sécurité pour les skieurs il a été établi que la hauteur minimum de neige damée au sol devait être supérieure ou égale à 40 cm pour autoriser l'ouverture du domaine. D'après les données MétéoFrance.

3.3 LES SPECIFICITES DU BASSIN VERSANT DE LA DRANSE DE SOUS-SAIX

3.3.1 Aspects morphostructuraux et hydrogéologiques des secteurs d'étude.

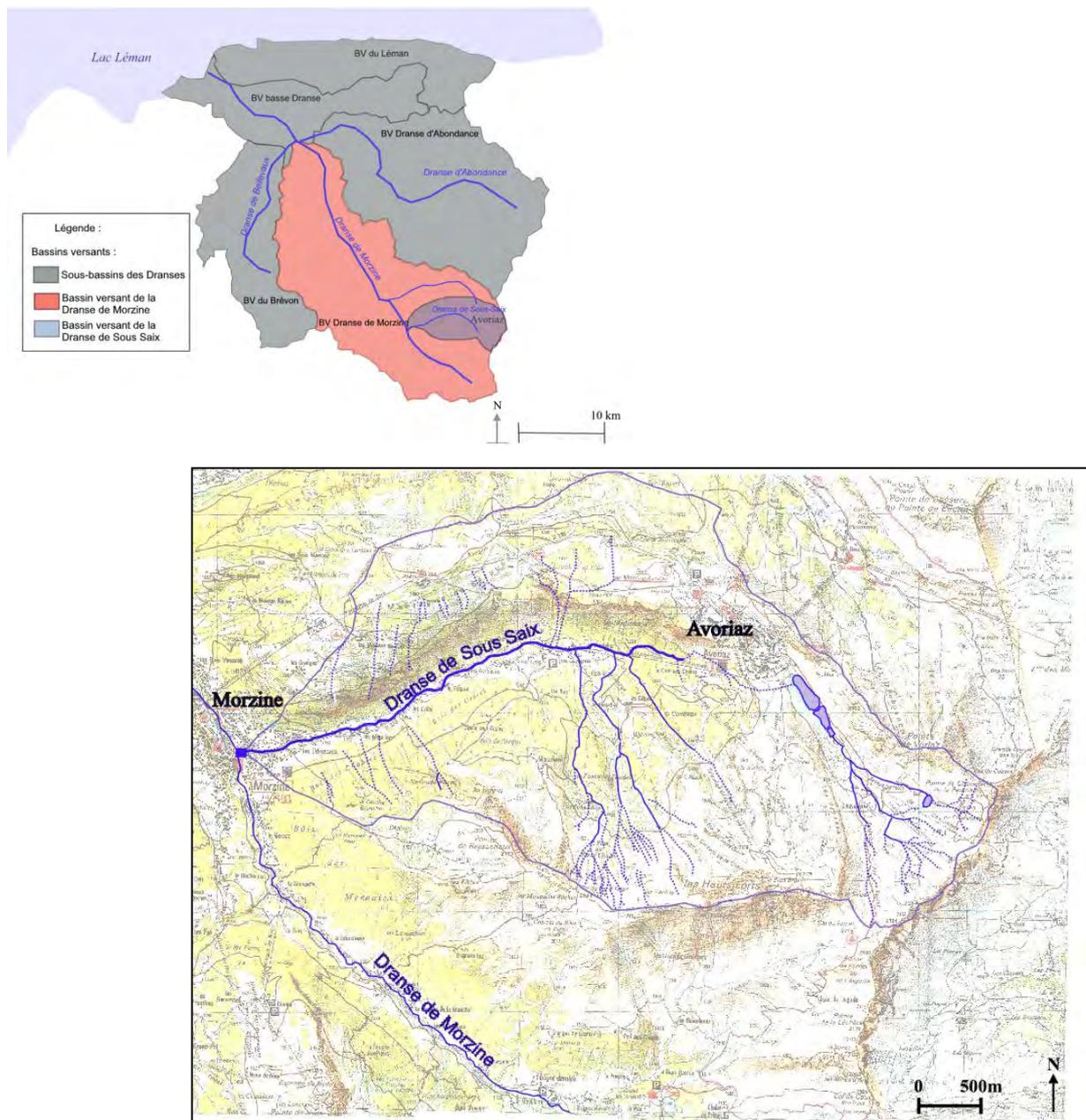
La région d'étude est celle du Chablais dans les Préalpes françaises dans le nord du massif des Alpes. La zone d'étude choisie pour la station d'Avoriaz est celle du bassin versant de la Dranse de Sous-Saix. Ce petit bassin versant de montagne appartient en réalité à un ensemble beaucoup plus vaste composé de trois bassins versants, le bassin de la Dranse de Morzine, celui de la Dranse d'Abondance et celui de la Dranse de Belleaux qui confluent tous vers le lac Léman. La Dranse de Sous-Saix draine une surface de 33.5 km². La pente moyenne du cours d'eau est de 7 % entre le pied de la falaise d'Avoriaz et sa confluence avec la Dranse de Morzine dans le village de Morzine. Il s'agit d'un sous-bassin du bassin versant de la Dranse de Morzine. La Dranse de Sous-Saix est un petit cours d'eau de montagne caractérisé par un régime naturel nivo-pluvial, avec des débits quasi nuls en hiver, une forte hausse du débit au printemps lors de la fonte des neiges et un maximum secondaire en été durant les épisodes orageux. La Dranse de Sous-Saix est alimentée par une multitude de petits cours d'eau dont la plupart ont des écoulements intermittents. Elle

prend naissance à la pointe du Fornet à 2300 m d'altitude et s'écoule sur environ 6 km. (Fig. 83).

Ce bassin versant se localise dans une région calcaire où les écoulements se font sous forme karstique. En effet, d'un point de vue géologique, ce bassin appartient aux Préalpes, composées d'unités allochtones (nappes de charriages préalpines). Dans cet empilement on distingue 3 ensembles (BRGM, 1998) (Fig. 87 et Fig. 88) :

- La nappe des Préalpes médianes d'origine briançonnaise
- La nappe de la Brèche d'origine piémontaise à laquelle appartient la zone d'étude choisie d'Avoriaz
- La nappe supérieure des Préalpes, d'origine piémontaise-ligure

Figure. 83 Relief et hydrographie du secteur d'étude. (D'après la carte topographique IGN de Morzine au 1/25 000).



Le domaine d'Avoriaz et toute la zone choisie correspondent à une gigantesque klippe, surmontée par les vestiges d'une nappe supérieure et préservée en situation synclinale au Nord. Les terrains constituant la Nappe de la Brèche sont disposés en une large synforme précédée au Nord-Ouest d'une voute anticlinale. Le bassin versant se localise au Sud-est de la synforme sur les vestiges de la Nappe Supérieure. La Série de la Brèche est caractérisée par la présence répétitive d'épisodes bréchiques souvent grossiers, traduisant l'existence d'un talus prépiémontais à la retombée interne de la plate-forme briançonnaise (Charollais et al., 1990 et BRGM, 1998). Cette Nappe de la Brèche se compose stratigraphiquement de haut en bas :

- De terrains du Lias composés de calcaires sombres, lités, siliceux passant à des schistes bruns dits « schistes inférieurs »
- De terrains du Dogger composés d'une puissante barre calcaire faite de brèches à éléments grossiers et anguleux comprenant surtout des dolomies Triasiques et des calcaires Liasiques. C'est la « brèche inférieure »
- De Malm basal fait de schistes ardoisiers, le « schiste supérieur »
- De Malm supérieur fait de brèches moins grossières à Dolomies et Quartzites Triasiques. C'est la « brèche supérieure ». Celle-ci se termine sur le haut en calcaires fins du Malm-Crétacé inférieur.

La Nappe de la Brèche se soulève au Sud-Est vers la zone autochtone. Il s'agit d'un vaste ensemble monoclinale dans lequel se forment des crêtes et des dépressions qui soulignent les différences de résistance des couches. Du fait du pendage relativement fort de cette succession vers le Nord-Ouest (environ 30°C), les terrains les plus anciens affleurent au Sud-est vers la ligne de crête franco-suisse et les terrains les plus récents au Nord-Ouest près de la station. (Fig. 84 et Fig.85). Cet ensemble est affecté par un système de failles d'orientation NNW—SSSE qui détermine la dépression du lac d'Avoriaz.

En périphérie de cet ensemble allochtone (Fig. 86), l'ensemble ultrahelvétique qui comporte une partie inférieure olistolithique, composée d'accumulations chaotiques de terrains empruntés au front de la nappe de charriage au cours de sa mise en place dans le bassin sédimentaire ; et une unité plus élevée de flyschs du Niesen, d'âge crétacé supérieur et originaire du domaine valaisan. Champéry se localise dans cette zone externe des Préalpes (zone autochtone delphino-helvétique), très chaotique où cet ensemble allochtone a été charrié. Cette zone est certainement moins karstique que la zone d'Avoriaz (BRGM, 1998)

Figure. 84 Contexte géologique du bassin de la Dranse de sous-Saix. (Carte géologique de la France à 1/50 000).

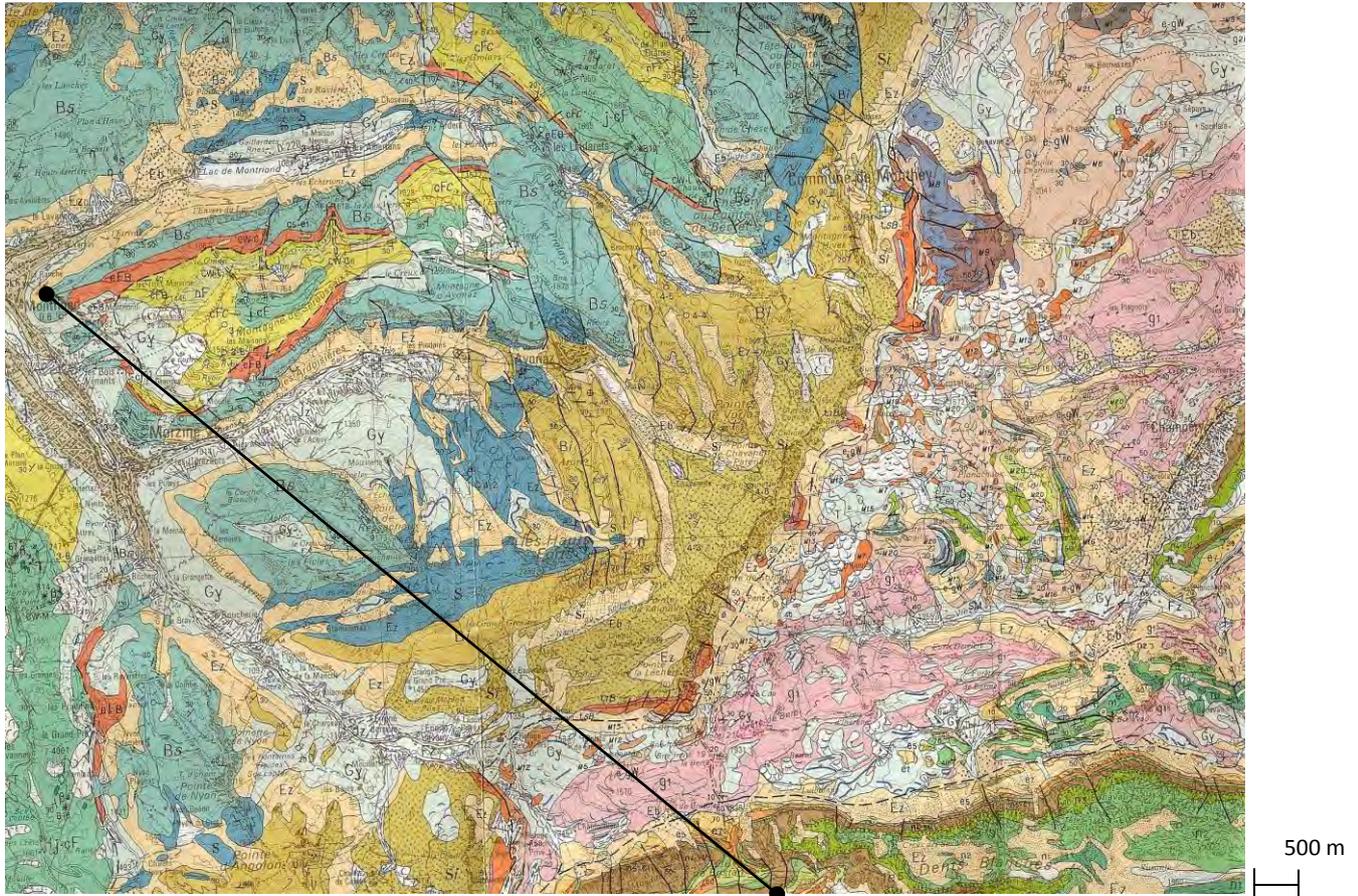
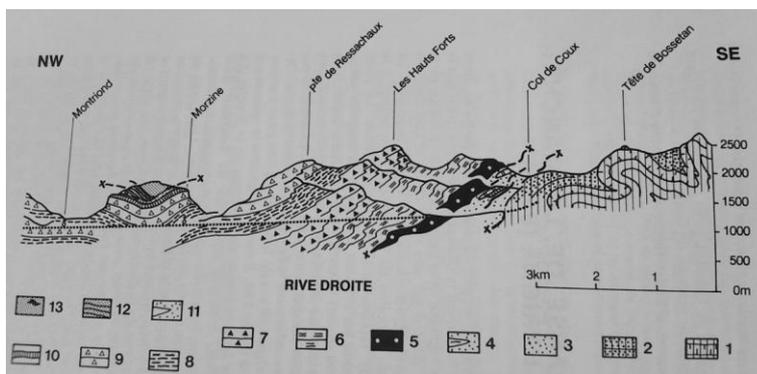


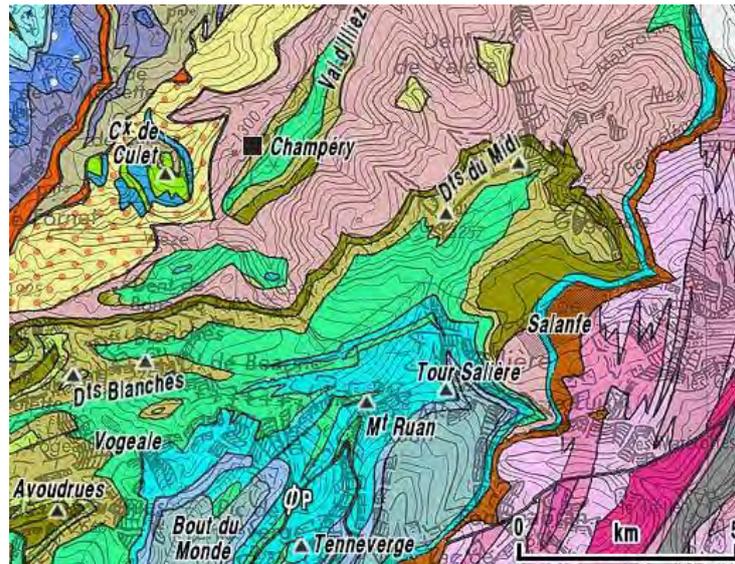
Figure. 85 Profil géologique de la rive droite de la vallée de la Manche entre Morzine et le front de la nappe de Morcles (repéré sur la carte géologique figure 84). (Charollais et al., 1990).

1. Urganien ; 2. Nummulitique



3. **Préalpes inférieures** (Ultrasubalpines sensu lato) ; 4. Wildflysch (Zone infrabrèche) ; 5. Trias supérieur ; 6. Calcaires inférieurs et schistes inférieurs ; 7. Brèche inférieure ; 8. Schistes ardoisiers ; 9. Brèche supérieure ; 10. Calcaires à silicites et Série à quartzites ; 11. Wildflysch (à lentilles de calcaires néocènes). **Nappe supérieure des Préalpes.** 12. Nappe des Dranses (Flysch à helminthoïdes) ; 13. Nappes de la Simme (sensu stricto) et des Gets (indifférenciées) avec (en noir) roches vertes

Figure. 86 Carte géologique simplifiée de Champéry. (BRGM, 1998).



Carte géologique du Chablais
Légende des couleurs

Nappes supérieures	Autochtone
Flyschs à helminth., etc...	Molasse marine miocène
Nappes médianes	Molasse rouge d'eau douce
Crétacé sup. - Éocène	Grès de Tavayannaz
Malm - Néocomien	Fl. nummulitique.
Dogger	Calcaires nummulitiques
Lias	Sionnien - Aibien
Trias (argneules et gypses)	Urgonien
Trias dolomitique	Hasterivien - Berriasien
Nappe de la Brèche	Titthonique
Crétacé sup. - Éocène	Terres Noires
Brèche sup. (Malm)	Bajocien
"schistes ardoisiers"	Aalénien
Brèche inférieure	Trias gréseux et dolomitique (régementaire)
Lias	Houiller
Trias gypsifère	
Flyschs exotiques	Socle cristallin
Fl. de Gurnigel	micaschistes
Fl. de Niesen	gneiss
Fl. ultra-belvitiques	gneiss ocellés
Fl. "à lentilles" (olistostromes)	granites

Ainsi d'un point de vue hydrogéologique, ces brèches étant par endroits fracturées et karstifiées, il se crée une grande perméabilité. Mais le système est peu capacitif⁷, et la circulation l'emporte sur le stockage. Il existe donc plusieurs émergences qui se font à l'air libre au débouché d'une fissure sur les parois rocheuses, comme c'est le

⁷ Ayant pour fonction de stocker puis de libérer l'eau. Contenance en eau gravitaire, en fonction de son volume total (moyen ou maximal) de roche saturée et de son coefficient d'emmagasinement. Une couche est dit capacitive lorsqu'elle est dotée d'une capacité significative. (Définition du réseau de bassin RMC)

cas pour l'émissaire souterrain du lac d'Avoriaz vers le Dranse de Sous-Saix. (Fig. 87) De ce fait, les débits d'étiage hivernaux sont en principe très faibles (peu d'apports en surface et apport souterrain minime). L'exutoire de ce lac est masqué par le remplissage du lac.

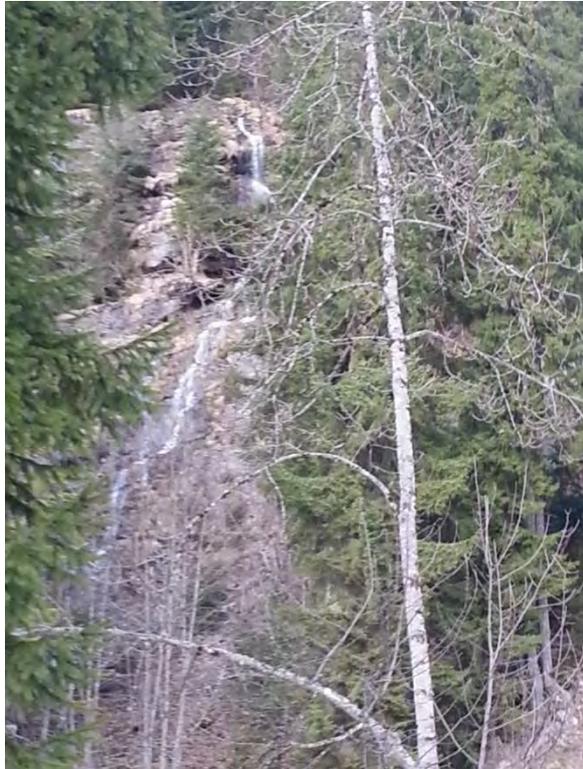


Figure. 87 Photographie de la résurgence du lac d'Avoriaz à l'aval de la « falaise d'Avoriaz ». (Cliché : Avril 2013, E. Magnier).

Dans ce contexte, la Dranse dessine un axe transversal qui était présent avant la mise en place de la série de cluses sur lequel se branchent les différents affluents qui suivent les affleurements de zones moins résistantes. Il existe ainsi deux principaux axes de drainage, le plus remarquable étant celui de la Dranse de Morzine, rectiligne en direction du Nord

vers Le Léman qui recoupe perpendiculairement les lignes structurales préalpines et un second axe en direction de l'est vers le Rhône suivi par la Vièze du val d'Illiez (Champéry).

La particularité de ce bassin versant d'Avoriaz est la partie amont du bassin (du col du Fornet à la pointe de Chavanette) qui transite par le lac d'Avoriaz avant de rejoindre en aval la Dranse de Sous-Saix. Ce sous-bassin de Chavanette est caractérisé par des écoulements temporaires qui débouchent dans la dépression finale du lac d'Avoriaz qui a été barrée en son milieu pour servir de retenue collinaire.

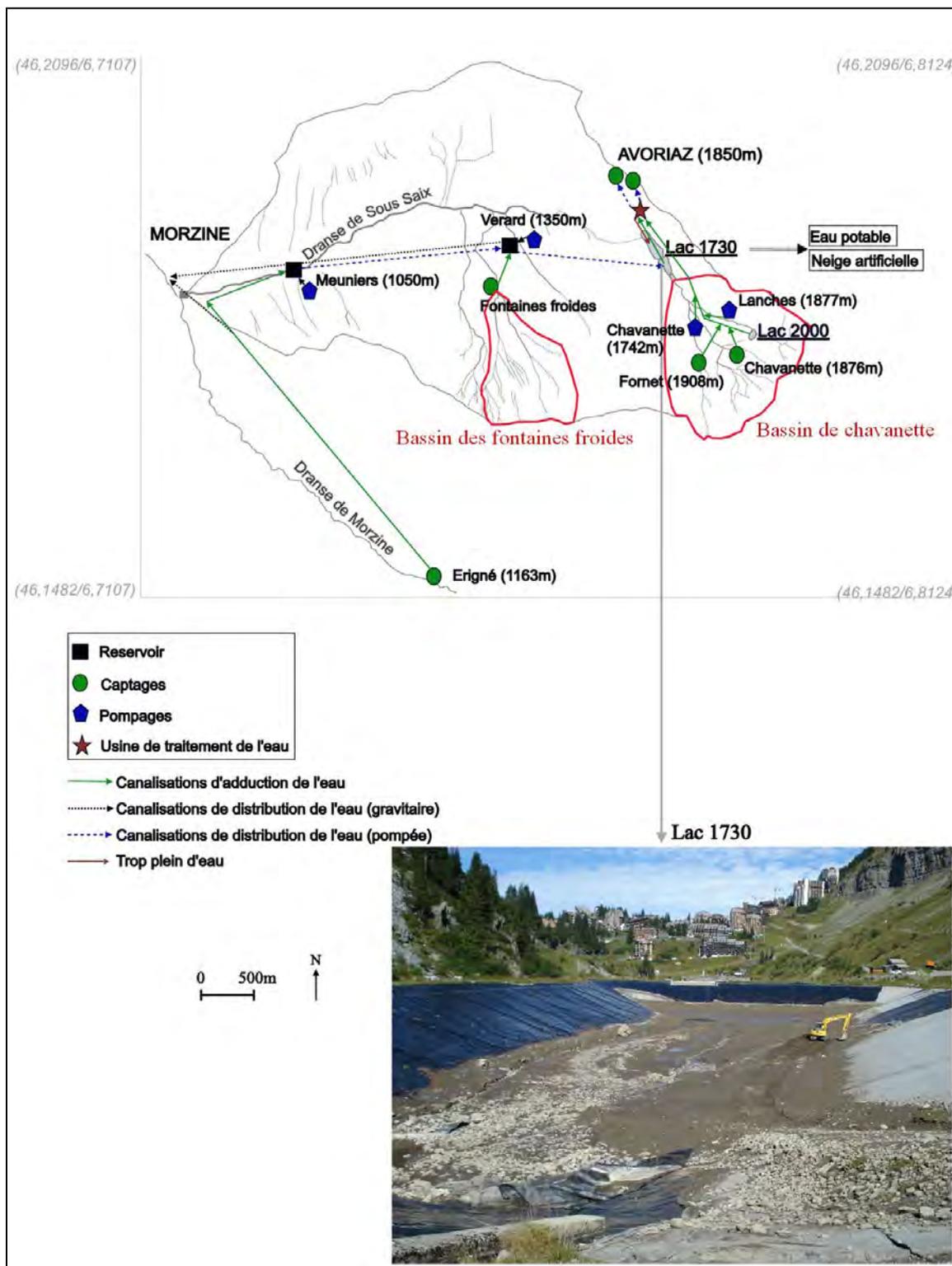
3.3.2 L'artificialisation du bassin versant de la Dranse de Sous-Saix

Sur le bassin d'Avoriaz, la complexité du fonctionnement naturel de ce système est accentuée par un fonctionnement artificialisé de par les différents usages, travaux et barrages de prises d'eau associés qui rompent ce drainage mais permettent le stockage et les prises d'eau en cours d'année.

En effet, aujourd'hui, ce bassin versant a été fortement anthropisé et artificialisé (Fig. 88) pour les besoins de production d'eau potable et plus récemment pour la production de neige de culture. Tout un système de réseaux d'alimentation en eau de la station, installé par la société privée de gestion de l'eau potable La Lyonnaise des Eaux, est venu modifier les écoulements naturels. Les modifications concernant

la production d'eau potable affectent 2 bassins versants, celui de Chavanette et celui des Fontaines froides.

Figure. 88 Artificialisation du bassin versant de la Dranse de Sous-Saix.
(D'après les données de la Lyonnaise des eaux d'Avoriaz et à partir de la carte topographique IGN de Morzine au 1.25 000).



3.3.2.1 Le sous bassin versant de Chavanette

Dans ce bassin, il existe à ce jour cinq captages pour la production d'eau potable (Fig. 88). Tout en amont du bassin, on retrouve une première prise d'eau à la retenue collinaire du lac 2000. Une partie des écoulements souterrains et de surface dans ce secteur Fornet-Chavanette alimente le lac artificiel « 2000 » (Fig. 89). D'une capacité de 40 000 m³, ce lac a entièrement été façonné avec la création d'une digue en terre à l'aval et l'étanchéification de son fond par un film PVC. L'eau y est captée et directement envoyée par un réseau de canalisations vers l'usine de filtration pour la production d'eau potable (Fig. 90). Lorsque le lac est plein, les eaux provenant des secteurs amont peuvent être détournées dans un fossé qui enserre la retenue pour retourner au ruisseau à l'aval. Il y a ensuite un captage du ruisseau de Chavanette à 1880 m d'altitude. Il est installé en rive gauche du ruisseau et se compose d'un petit barrage en béton ainsi que d'une chambre de décantation qui reçoit également les eaux captées au lac 2000. Le ruisseau du Fornet possède les mêmes aménagements que celui de Chavanette à 1910 m d'altitude. A l'aval de ces premiers captages, des drains disposés en étoile, drainent toute une zone plane relativement humide et marécageuse. Les eaux ainsi récoltées rejoignent le circuit d'alimentation de la station de filtration pour l'eau potable. Enfin, il existe un dernier captage, celui des Lanches à 1900 m d'altitude. C'est un captage gravitaire des eaux souterraines. Les écoulements restants, non captés s'écoulent naturellement en direction du lac d'Avoriaz appelé « lac 1730 » et situé à une altitude de 1735 m (Fig. 91).

Figure. 89 Le lac 2000. (Cliché : Février 2011, E. Magnier).



Figure. 90 Photographie de l'usine de filtration pour la production d'eau potable. (Cliché : 2011, E. Magnier).





Figure. 91 Le lac 1730. (Cliché : 2010, E. Magnier).

Ce lac à l'origine naturel, a été modifié car il se compose aujourd'hui de trois bassins. Le premier bassin est un bassin de décantation par lequel transitent les eaux lorsque celles-ci sont turbides avant le rejet dans la retenue principale. Le second bassin correspond à la retenue principale. Celui-ci est alimenté par les différentes branches du ruisseau de Chavanette. Lorsque les eaux sont claires, elles aboutissent directement par une canalisation dans la retenue sans transiter par le premier bassin. Cette retenue est totalement artificielle, elle a été étanchéifiée et barrée par une digue pour retenir les eaux (Fig. 92). Sa superficie est de 64 ha, et son volume de 140 000 m³ pour une profondeur maximum de 10,3 m. Enfin un troisième bassin, qui correspond à l'ancien lac naturel d'origine glaciaire, réceptionne le trop-plein des divers réservoirs. Un puits perdu installé dans le lac permet d'alimenter la nappe et les eaux rejoignent ensuite la Dranse de Sous-Saix en aval. Ce troisième bassin reçoit aussi les eaux de vidange de la station de refoulement.



Figure. 92 Aménagement du lac 1730 avec la pose de bâches étanches sur le second bassin. (Cliché : Juillet 2010, E. Magnier).

3.3.2.2 Le sous bassin des Fontaines froides

La retenue collinaire 1730 est également approvisionnée par de nombreux captages à l'aval du bassin et de la station d'Avoriaz (Fig. 88). Le réservoir du Vérard réceptionne les eaux de divers pompages au sein du bassin versant (Meuniers, Fontaines Froides, Verard) mais aussi les eaux issues du bassin de la Dranse de Morzine (pompage de l'Erigné). A partir de ce réservoir, une partie de l'eau est remontée jusqu'au lac d'Avoriaz. Le principal captage est celui des Fontaines froides situé au Sud-Ouest de la station d'Avoriaz à 1370 m d'altitude. Le captage est gravitaire, l'eau est ensuite retenue par un barrage bétonné avant de rejoindre le réservoir de Vérard et d'être pompée vers le lac 1730 en amont du bassin.

A l'issue de ces aménagements, un second réseau est apparu, celui de la production de neige. L'enneigement artificiel nécessite à lui seul tout un réseau souterrain. Pour alimenter en eau les enneigeurs, il faut créer des captages dans les cours d'eau, dans les lacs, dans les réserves souterraines. Cette eau est ensuite amenée aux enneigeurs par des canalisations. Il faut également ajouter les câbles d'électricité et les usines qui renvoient l'eau et l'air sous pression aux canons. Tous ces éléments sont invisibles en surface mais contribuent à modifier considérablement le fonctionnement naturel du bassin. Enfin sont implantés dans l'espace les divers canons, qu'ils soient mobiles ou permanents. L'eau destinée à cette production est directement pompée dans le lac 1730 en fonction des besoins de production et des accords donnés par la Lyonnaise des Eaux. Le lac 1730 d'Avoriaz a lui aussi été fortement modifié pour les besoins de l'enneigement, installation de micro-barrages (pour les particules), de bâches qui recouvrent le fond du bassin et de canalisations qui parcourent son fond (bullage⁸ et alimentation des canons).

En aval, les écoulements de la Dranse de Sous-Saix semblent donc dépendre en partie des alternances prélèvements, lâchers d'eau en fonction des besoins de la station. On peut déjà parler d'une artificialisation du bassin versant qui est parcouru par de nombreuses canalisations souterraines pour l'alimentation en eau potable et pour l'enneigement artificiel.

3.4 LES STATIONS D'AVORIAZ ET DE CHAMPERY

3.4.1 Avoriaz, station skis aux pieds

Fondée sur une idée de Jean Vuarnet, médaillé aux Jeux Olympiques en 1960, la station d'Avoriaz doit permettre d'ouvrir un véritable domaine skiable au dessus du village de Morzine. Sa construction s'inscrit dans le Plan neige élaboré en 1960

⁸ Le bullage est un procédé qui contribue au remous permanent de l'eau de fond de bassin par injection d'air. Ce remous maintient l'eau à une température de 2 à 3°C et permet d'éviter le gel en profondeur, tandis que la surface de ce lac artificiel est englacée.

(Alpes magazine, 2010). Le village de Morzine déjà existant à l'époque est une station dite de première génération, c'est-à-dire développée autour d'un village préexistant. Avoriaz appartient quand à elle à la troisième génération. Les constructions sont regroupées, les chalets et résidences individuelles quasiment inexistantes, les logements sont standardisés et leur superficie est réduite au maximum, et la station s'insère dans le site par le biais d'une recherche architecturale novatrice. Les architectes Gérard Brémont et Jacques Labro sont à l'origine de la création de la station en 1967 en collaboration avec l'organisme privé de séjours Pierre et Vacances (Bourreau, 2004). L'accès à la station est double, il se fait soit par le téléphérique au Sud, au niveau de la falaise, soit par la route au Nord qui mène à la gare routière et aux parkings (Fig. 93). En effet, le parking est obligatoire car la circulation à l'intérieur de la station se fait à ski, en traîneau, en chasse neige ou par le biais des remontées mécaniques. Et depuis avril 2013, un nouveau téléphérique permettant de tripler la capacité de transport a été ouvert (Fig. 94).

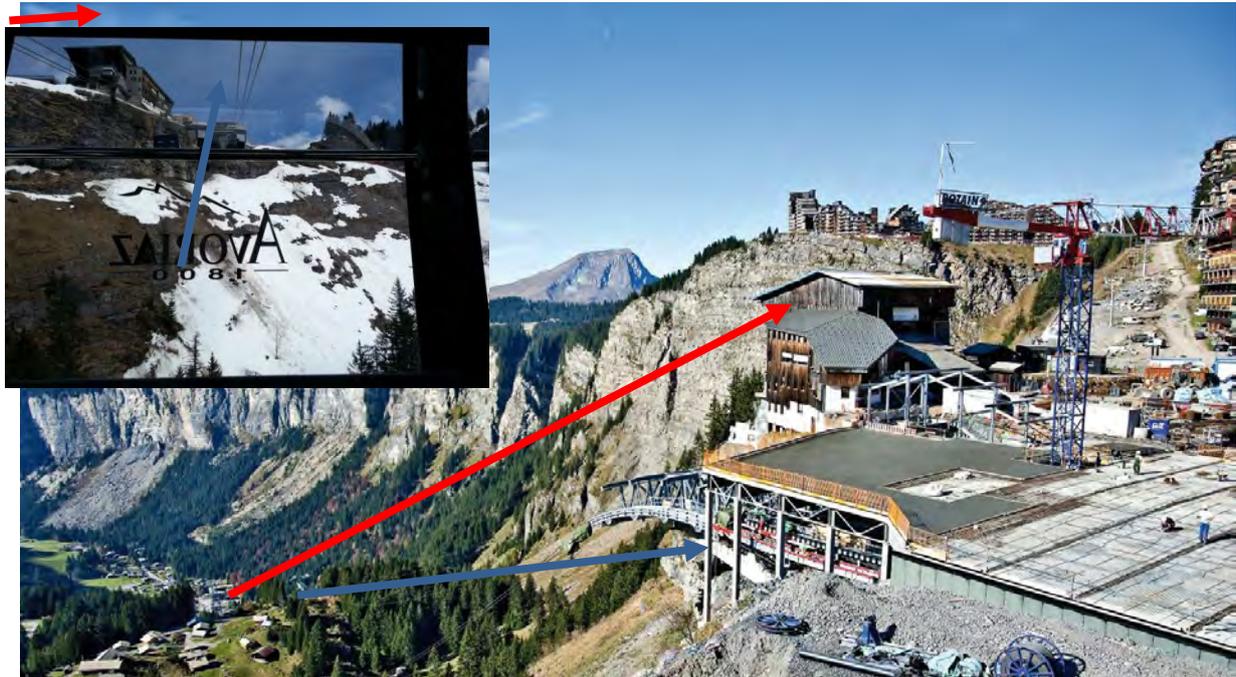
Figure. 93 Parking et gare routière d'Avoriaz (accès par le haut de la station).
(Cliché : Avril 2012, E. Magnier).



La gare routière se trouve sur la gauche de la photographie, le parking est en souterrain et au centre de la photographie les navettes traîneaux et chasse-neiges emmènent les touristes à leurs appartements.

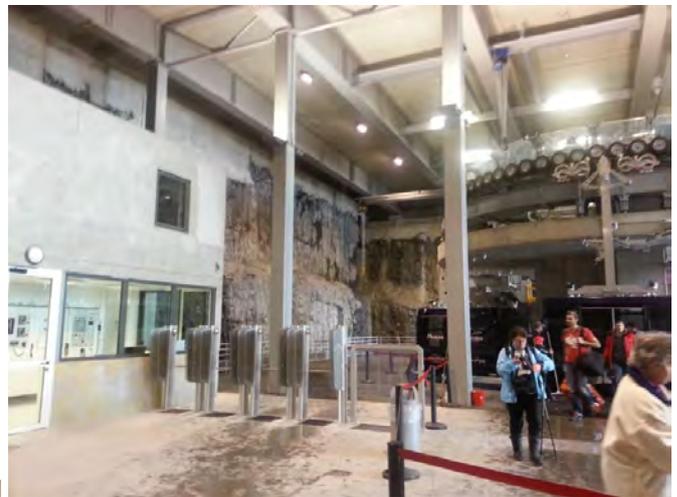
Ce nouveau téléphérique baptisé 3S se veut très moderne, ce qui démontre là encore la volonté de la station d'attirer toujours plus de touristes. La station est dite skis aux pieds. On comprend ainsi toute l'importance d'avoir un bon enneigement du domaine. En cas d'absence de neige dans la station, c'est toute la circulation et le fonctionnement de la station qui est menacé mais du fait de la position centrale d'Avoriaz dans le domaine skiable, cela entraînerait également la coupure des liaisons au sein du domaine des Portes du soleil. Seconde particularité de la station, c'est une station dite intégrée (Knafou, 1978). Intégrée d'une part par son architecture qui se veut résolument moderne (construction en bois gris, architecture de forme ressemblant aux rochers alentours...) (Fig. 95) et qui concentre tous les services et équipements nécessaires au séjour, mais aussi intégrée par son mode de gestion.

Figure. 94 L'ancien téléphérique d'Avoriaz et le nouveau 3S (accès par le bas de la station). (Cliché : Avril 2013, E. Magnier).



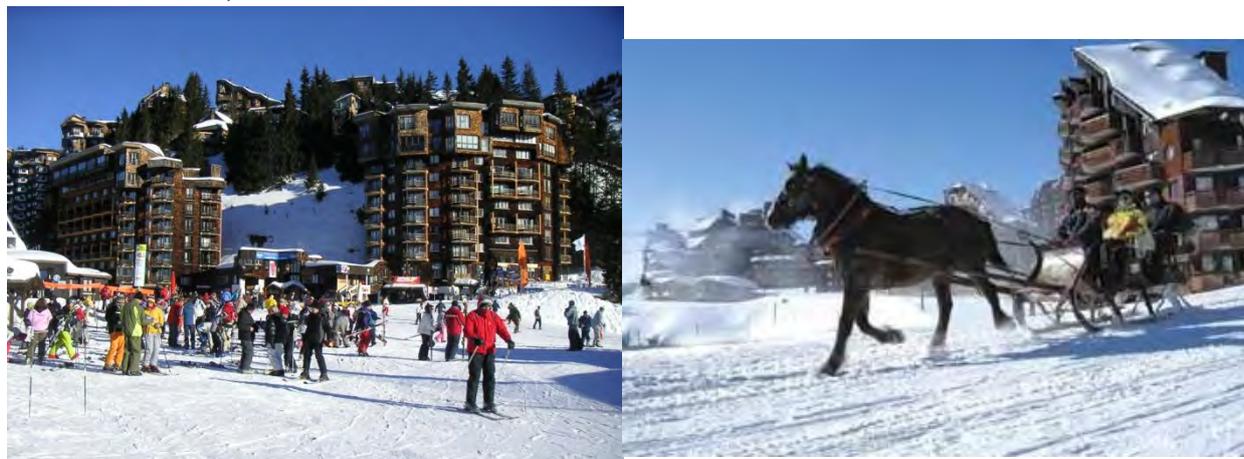
L'ancien téléphérique est à gauche (flèche rouge) et le nouveau 3S à droite pénétrant sous la station d'Avoriaz (flèche bleue).

Arrivée du nouveau 3S. (Cliché : Avril 2013, E. Magnier).



L'installation se veut résolument moderne. Des escalators permettent de remonter les skieurs sur les pistes en surface.

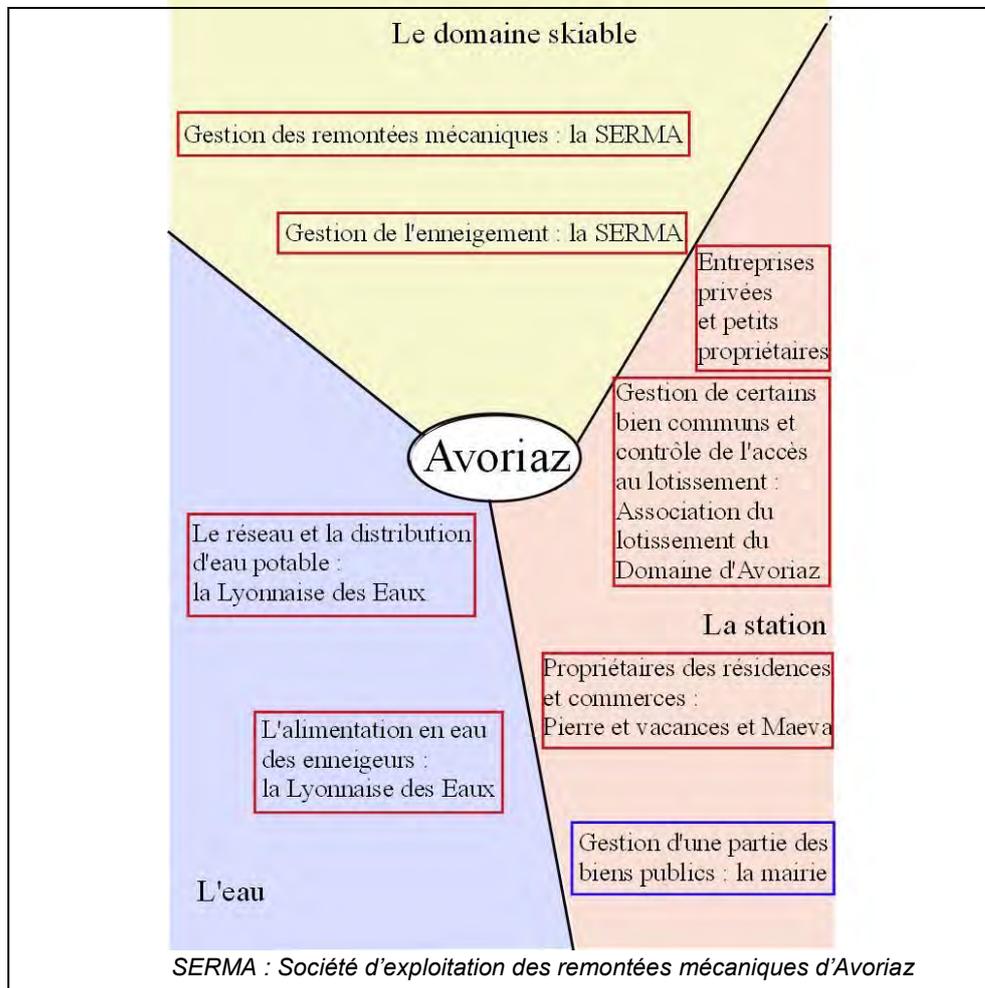
Figure. 95 Architecture de la station d'Avoriaz. (Clichés : Office du tourisme d'Avoriaz, 2011).



La société d'aménagement Pierre et Vacances est devenue le gestionnaire principal du fonctionnement de la station (Fig. 96). Aujourd'hui, elle est propriété essentiellement d'organismes privés de ventes et de locations de biens et de séjours : Pierre et Vacances et Maeva (Bourreau, 2004). Au départ, ces organismes étaient propriétaires de la majorité des bâtiments et commerces, des voies de circulation, et géraient les éclairages, la distribution du courrier, le ramassage des ordures. Les appartements proposés étaient vendus à la semaine à des particuliers et devaient être mis en location. D'après la Loi d'urbanisme, tout lotissement privé doit être géré par une association syndicale qui regroupe l'ensemble des possesseurs de lots ; à Avoriaz il s'agit de « l'Association du Lotissement d'Avoriaz ». Les quelques propriétaires individuels de chalets ou d'appartement sur Avoriaz font donc partie de l'ALDA (on comptabilise entre 150 et 200 habitants à l'année). Cette association prend en charge tous les services publics à la place de la commune et contrôle l'entrée dans le lotissement. C'est l'ALDA qui décide des dates d'ouverture et de fermeture de la station qui conditionnent également la production de neige artificielle selon les besoins. Ce mode de gestion de la station est prévu par la convention d'aménagement qui a été signée en décembre 1962 pour 30 ans. Au delà, la commune reprend la gestion des biens publics. Depuis 1992, la mairie de Morzine, dont dépend la station d'Avoriaz, reprend petit à petit la gestion d'une partie des services et des biens publics après rétrocession. Mais le réseau d'eau reste à la charge de Pierre et Vacances qui doit non seulement en assurer la construction, l'extension et la gestion (d'après la convention d'aménagement de 1962) (Bréthaut, 2012). Cette gestion reste déléguée à la société de la Lyonnaise des eaux. La commune devrait aujourd'hui avoir repris la totalité de la gestion de la station, mais ce n'est toujours pas le cas pour des raisons budgétaires. La gestion est aujourd'hui compliquée car se mêlent gestion privée des différents organismes et propriétaires et gestion publique de la Mairie. Face à cette gestion compliquée, une association a vu le jour, « Avoriaz demain », qui prône la création d'une commune indépendante d'Avoriaz pour préserver à la fois la station (classée au patrimoine du XXème siècle

par le Ministère de la culture), et son patrimoine écologique (norme ISO 14001, label écologique qui met en avant les actions de réduction des effets dommageables des activités sur l'environnement).

Figure. 96 La gestion de la station d'Avoriaz.



Un projet de prolongement du téléphérique 3S a vu le jour. Il s'agit de relier le centre de la commune de Morzine au parking des Prodains, actuel site de départ du nouveau 3S (Fig. 97). L'intérêt mis en avant est la réduction du temps de trajet des skieurs entre la station de Morzine et celle d'Avoriaz et au delà entre la station des Gets et celles des domaines suisses.

Figure. 97 Projet du nouveau tronçon 3S Morzine-Prodains.



Projet présenté lors d'une réunion organisée par la mairie aux habitants de Morzine-Avoriaz. Le tracé rouge correspond au nouveau 3S Morzine-Prodains, permettant de relier Morzine aux Prodains ou le second tronçon 3S Prodains-Avoriaz est déjà en service. Les tracés bleus correspondent aux remontées mécaniques déjà existantes.

A cette complexité s'ajoute la gestion de l'eau potable et de l'enneigement, là encore sous pouvoir décisionnel d'organismes privés. L'eau potable et la distribution dépendent de la Lyonnaise des eaux, filiale de SUEZ environnement (Bréthaut, 2012). Quand à l'enneigement artificiel, périodes de production et volumes produits dépendent de la société d'exploitation des remontées mécaniques d'Avoriaz (la SERMA). La SERMA pompe l'eau dans le lac d'Avoriaz, également utilisé pour l'eau potable et géré par la Lyonnaise des eaux. Un accord a été passé entre ces deux entreprises, autorisant les pompages pour l'enneigement artificiel. La gestion privée et publique de la station et de toutes les activités complique la conciliation des désirs de chacun et la promesse publicitaire faite aux touristes. Tous ces acteurs ont un droit de regard et de décision sur les activités et la gestion de la station. De ce fait, la gestion et les accords passés entre les divers acteurs sont parfois flous et bien souvent non écrits. Dans ce contexte, il paraît donc bien difficile de respecter les réglementations du code de l'environnement. Or l'absence de réglementation sur les prélèvements peut contribuer à l'augmentation du risque de conflits d'usage entre les divers utilisateurs. En particulier lorsque la ressource est utilisée dans le cadre de diverses activités. Et c'est bien le cas ici sur Avoriaz, où l'on peut parler d'une multifonctionnalité de la ressource. En effet, l'eau sert non seulement à l'alimentation en eau potable de la station et à la production de neige artificielle comme on vient de le voir, mais aussi pour les piscines privées et spa, la patinoire extérieure, le nouvel espace aquatique (ouvert en été 2012) (Fig. 98) et le golf. Ces activités nécessitent un prélèvement dans la ressource, la plupart du temps durant les mêmes périodes. Les mois à forte fréquentation touristique (tourisme de sports d'hiver de décembre à avril et tourisme estival de juin à août) sont les mois où plus de trois activités nécessitent un prélèvement. La ressource disponible doit donc être suffisamment abondante pour satisfaire l'ensemble des usages. L'absence de réglementation

spécifique et la multifonctionnalité de la ressource en eau ne semblent pas favorables à une gestion efficace de la ressource.

Figure. 98 Le nouvel espace aquatique « Aquariaz » d'Avoriaz. (Cliché : Office du tourisme de Morzine-Avoriaz, 2013).

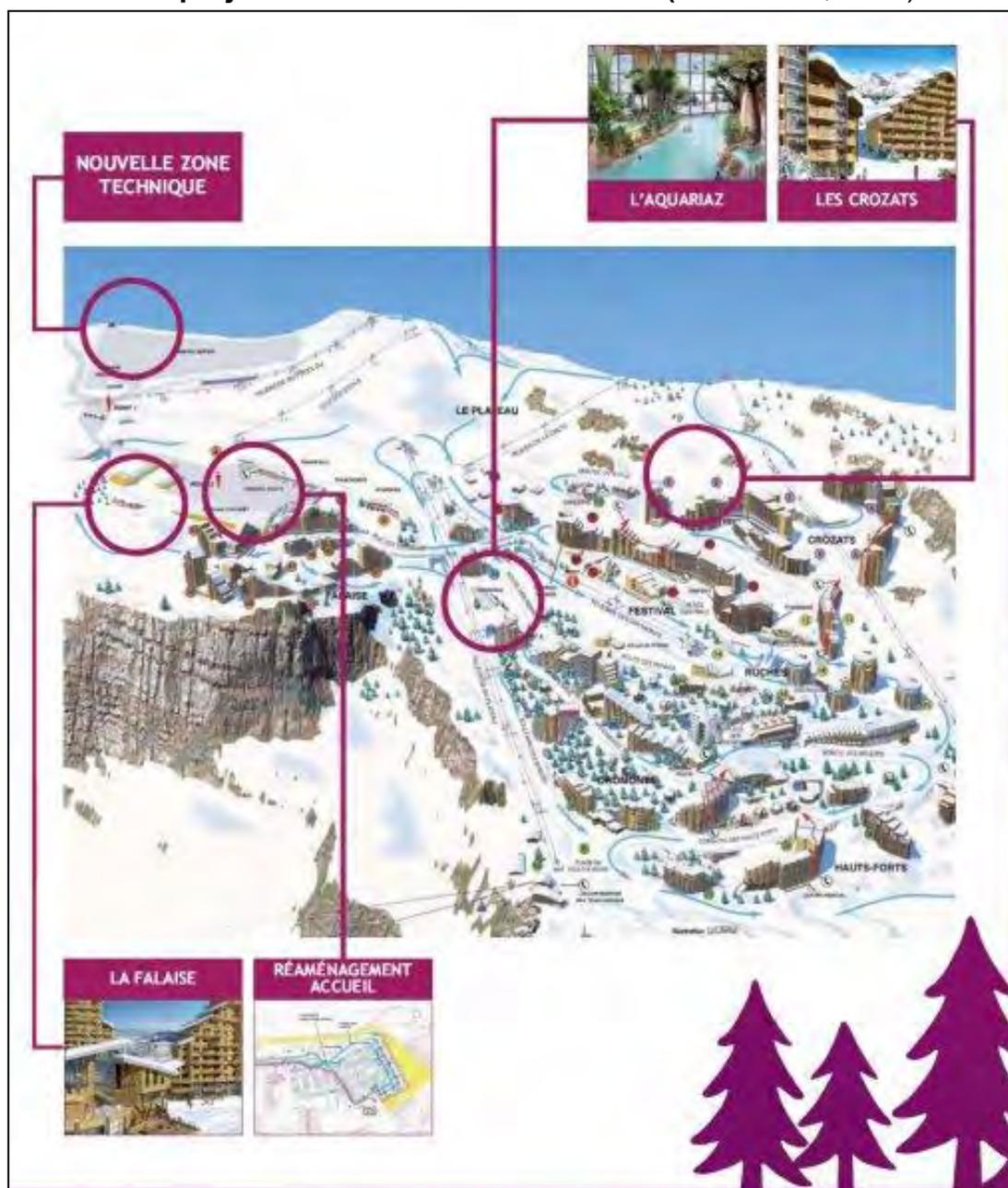


Les constructions en cours sur la station d'Avoriaz sont nombreuses. (Fig. 99) A l'initiative de la commune de Morzine en 2008, le groupe Pierre et Vacances a élaboré un projet d'extension de la station d'Avoriaz (Fig. 100) : 475 appartements qualifiés luxueux (3 et 4 étoiles) sont en construction. Ces résidences seront équipées de spas et de piscines. Ces constructions devraient augmenter de 40 % le nombre de lits d'ici 2014.

Figure. 99 Les constructions sur la station d'Avoriaz. (Cliché : 10 septembre 2010, E.Magnier).



Figure. 100 Les projets de construction à Avoriaz. (OT Avoriaz, 2013).



3.4.2 Champéry, station familiale

Le tourisme y apparaît en été en 1857 puis celui-ci devient un tourisme hivernal en 1932 (<http://www.champéry.ch/editorial>). C'est une station dite de première génération élaborée à partir d'un village préexistant. La station fonctionne tout d'abord de manière autonome et le premier téléphérique Champéry-Planachaux est construit en 1939. En 1960, la STVAL (Société d'expansion touristique du val d'Illeiez et du Haut-Chablais) est fondée et en 1969, le télésiège de Chavanette qui concrétise la liaison avec la France est inauguré. La création du domaine franco-suisse des Portes du Soleil n'a lieu qu'en 1974 avec la naissance de l'Association

des Portes du Soleil. Cette station est particulière car l'accès aux pistes se fait presque exclusivement par le téléphérique de Champéry situé au cœur du village (Fig. 101). Il permet d'accéder au domaine situé à 1400 m d'altitude et aux pistes de ski des Crosets qui relient le domaine de Champéry aux domaines français des Portes du Soleil et notamment Avoriaz. Le retour à la station peut se faire quand à lui soit par le téléphérique, soit par la piste du Grand Paradis, seul accès aux portes de la station. Là encore, un bon enneigement est essentiel pour garantir le retour des skieurs et l'utilisation des canons à neige s'est imposé très tôt comme la solution aux gestionnaires de la station.

Figure.101
Téléphérique de
Champéry. (Cliché :
 swissgéo.ch).



On constate ici aussi une multifonctionnalité de la ressource. En effet, la ressource en eau est utilisée pour l'alimentation en eau potable et la production de neige mais aussi pour la patinoire, les piscines et les pistes de curling. Ces installations se sont mises en place progressivement au cours du temps mais elles se sont particulièrement développées depuis 2005 et la création du Palladium (Centre National de Sports de Glace) (Fig. 102), qui compte un hôtel, une salle de conférence, un centre fitness, deux piscines, une patinoire, quatre pistes de curlings et de nombreux autres équipements sportifs) (Junod et Sueur, 2005). Enfin, une usine de production électrique (l'usine électrique des SEE au Grand-Paradis) utilise également une partie de cette ressource. Du point de vue de la gestion, l'eau potable est régie par la Société des Eaux de Champéry SA (Fig. 103). La production de neige dépend quand à elle de la société privée des remontées mécaniques « Télé Champéry-Crosets Portes du Soleil SA (TCCPS) » (Télé Champéry-Crosets Portes du Soleil, 2006). Pour cette production, l'eau est à l'heure actuelle pompée directement dans les lacs (lac Vert, lac Toupin, lac Hermann et lac Vieux), un cours d'eau (Torrent de la Naulaz) et une source (La Pierre) par le biais de captages reliés aux installations d'enneigeurs (Fig. 104). Ces prélèvements se font au jour le jour en fonction des besoins en neige. Les volumes prélevés ne sont pas relevés et

consignés dans un registre. Ainsi il est impossible d'avoir une vision générale des volumes en jeu pour la production de neige.

Figure. 102. Le palladium de Champéry. (Cliché : office du tourisme de Champéry).



Figure. 103 Schéma des installations sur la commune de Champéry.

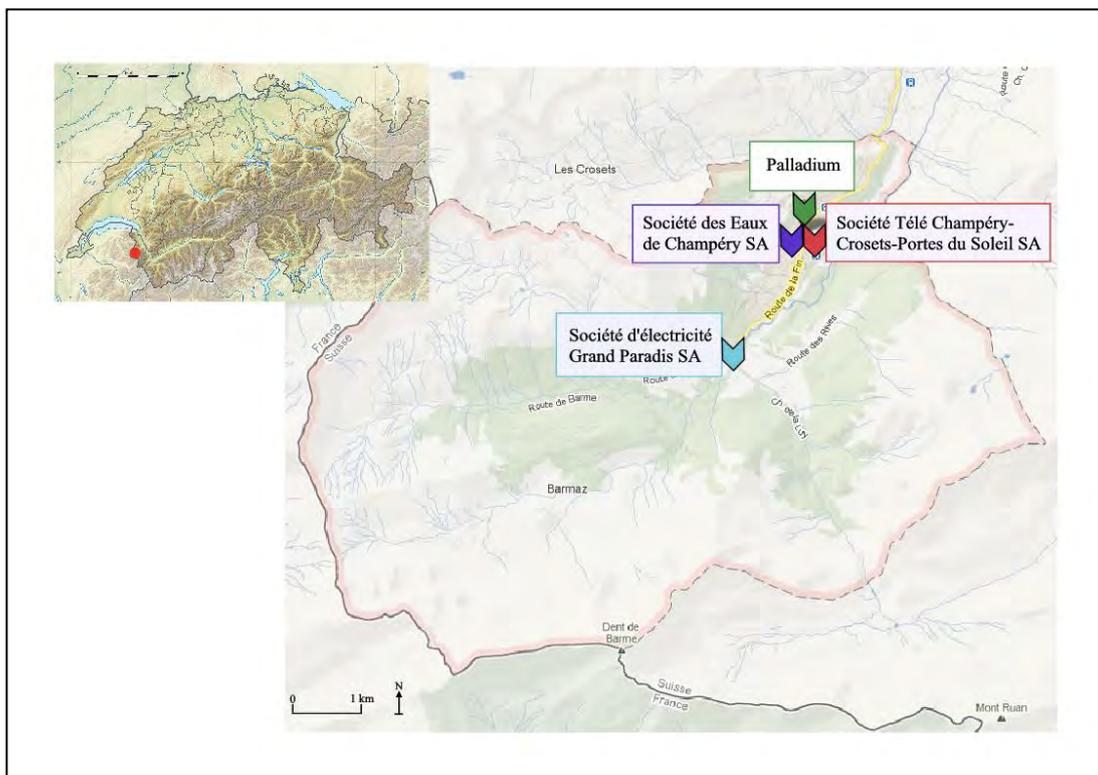
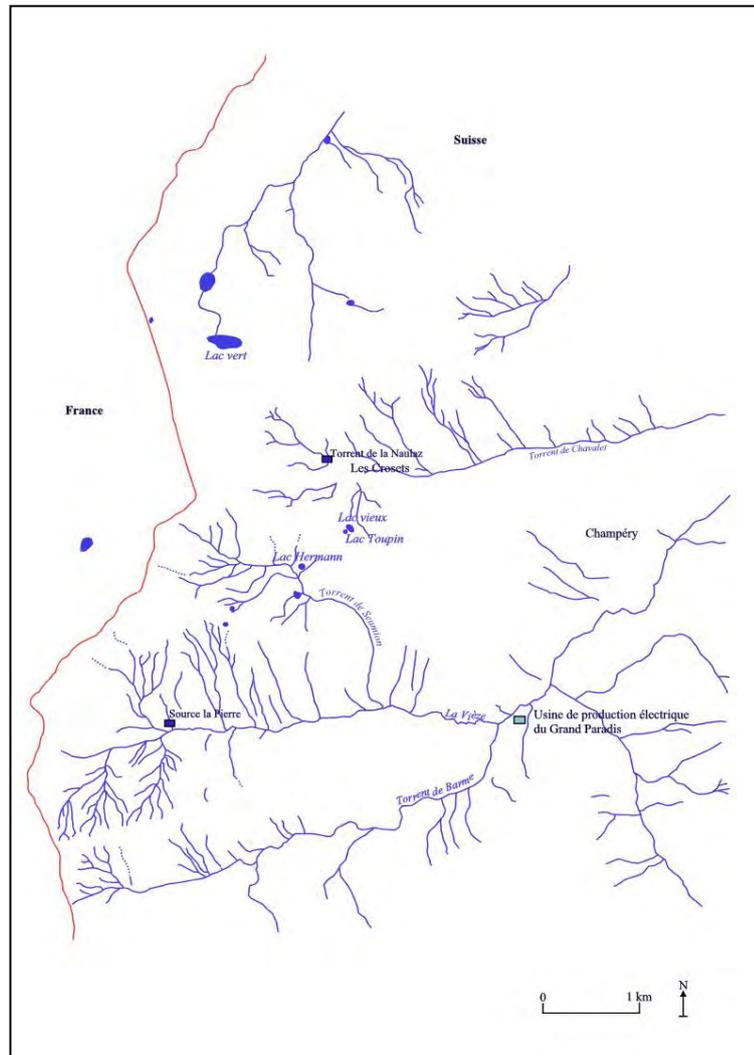


Figure. 104 Les lieux de prélèvements pour la production de neige artificielle. (D'après les informations de Télé Champéry-Crosets Portes du Soleil).



Un projet de « planification globale » des Portes du soleil a vu le jour en 2004. Il consiste à proposer un nouvel aménagement du domaine skiable en tenant compte équitablement des intérêts de chacun et dans un esprit de développement durable. Quatre communes Suisses (Champéry, Monthey, Val d'Illicz et Trois-torrents), deux sociétés de remontées mécaniques (Télé-Morgins SA et Télé-Champéry-Portes du Soleil SA), les stations suisses des Portes du Soleil et quatre organismes de protection de l'environnement (le WWF Suisse, le WWF Valais, Pro Natura Valais, Pro Natura – Suisse) ont été regroupés suite à un recours du WWF. Ce projet nécessitera à terme un investissement considérable, environ 100 millions de francs suisses. Dans une première phase, une convention d'accord a été signée entre tous les partenaires le 19 avril 2006. Cependant, cet accord n'a pas été ratifié par le législatif communal de la commune de Val-d'Illicz. La médiation a repris à la fin 2008. La deuxième phase a vu une volonté des sociétés de remontées mécaniques de se rapprocher en créant un organe commun de conduite. La décision de l'assemblée générale a été prise au printemps 2013 et les travaux ont commencé dès l'été 2013. Le domaine skiable doit à terme être complètement restructuré avec de nouveaux axes de circulation (pistes de ski et remontées mécaniques) et l'abandon de

l'exploitation de certaines zones afin d'y protéger l'environnement (Fig. 105). Une des particularités de cette planification est la prise en compte de l'enneigement de ce schéma de restructuration. Une analyse des besoins en eau pour l'alimentation des installations d'enneigement a été réalisée par la société Télé Champéry-Crosets Portes du Soleil SA. Un certain nombre de retenues et de lacs vont être créés ou modifiés (augmentation de la capacité de stockage) mais des pompages directs dans les cours d'eau et les lacs naturels seront également maintenus.

Figure. 105
Schéma de l'installation skiable avant et après la planification globale en cours.

Schéma avant la planification globale

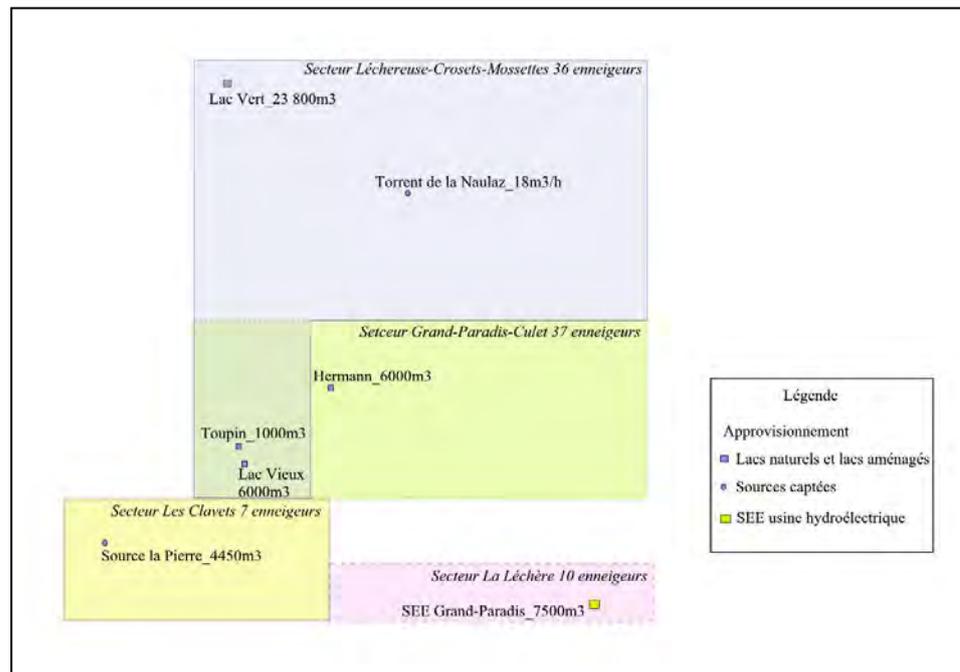
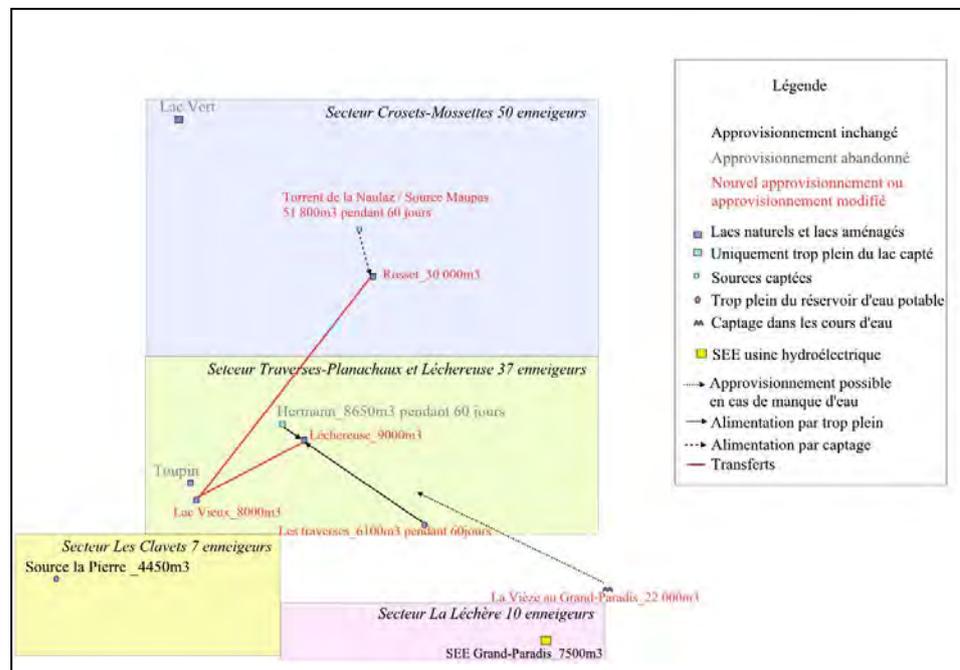


Schéma après la planification globale

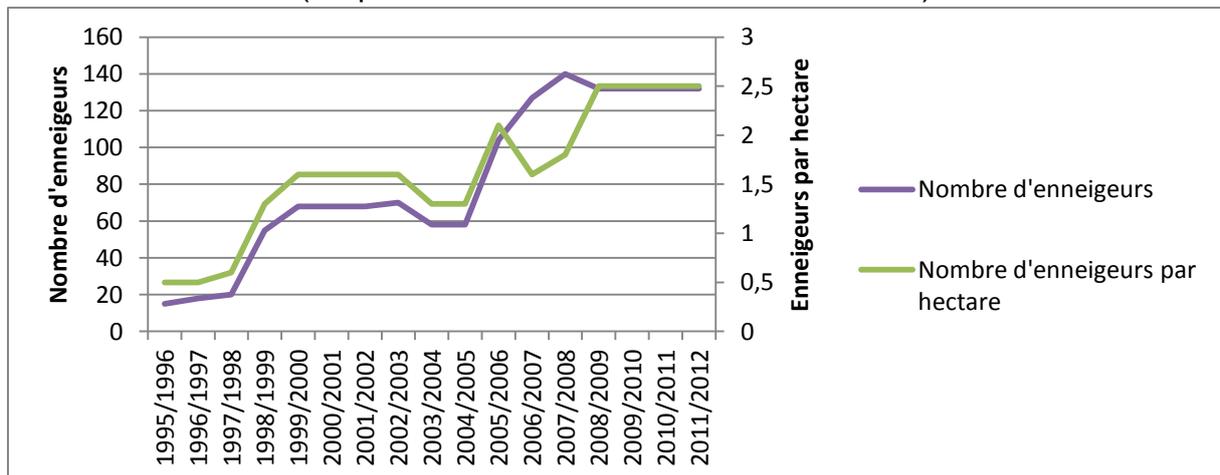


3.5 DESCRIPTION DES INSTALLATIONS D'ENNEIGEMENT MECANIQUE

3.5.1 Avoriaz

L'enneigement artificiel débute en 1990 et se développe très rapidement ces dernières années. Pour la saison 1995-1996, 30 hectares de pistes sont enneigés mécaniquement contre 57,5 hectares en 2012, soit 20 % du domaine. La progression du nombre d'hectares enneigés est particulièrement rapide puisque les surfaces ont presque doublé en l'espace de 17 années. Au début de l'enneigement, la station possède uniquement des canons basse pression appelés aussi monofluides. Ceux-ci sont au nombre de 15 sur l'ensemble du domaine pour la saison 1995-1996, soit un ratio de 0,5 enneigeurs par hectare (Fig. 106).

Figure. 106 Nombre d'enneigeurs total par hectare sur la station d'Avoriaz entre 1995 et 2009. (D'après les données de la SERMA Avoriaz).



Actuellement, la station possède les deux types de canons existant à ce jour, les monofluides et les bifluides. Les monofluides moins hauts et plus maniables sont transportés dans le centre de la station et déplacés en fonction des besoins d'enneigement (Fig. 107). Les bifluides (longues perches) sont installés de manière permanente sur les secteurs stratégiques de la station (retour au parking des Prodains, retour à la station) (Fig. 108). On compte en 2012, 132 enneigeurs (101 bifluides et 31 monofluides), soit un ratio de 2,5 enneigeurs par hectare de piste. Sur la station d'Avoriaz, il existe différentes sources d'approvisionnement en eau réparties sur l'ensemble du domaine subdivisé en deux grands ensembles. Le secteur amont de la station permettant de relier Châtel et la Suisse ainsi que le secteur Super Morzine sont alimentés en neige de culture par une retenue collinaire implantée au cœur de ces secteurs (respectivement la retenue des Lindarets et celle de SuperMorzine). Enfin, nous allons concentrer nos recherches sur le troisième secteur, celui du lac 1730 (Fig.109). Celui-ci approvisionne la production de neige sur

trois sous secteurs, celui de Chavanette, le centre de la station et le secteur Prodains. L'usine de production de neige est invisible puisqu'elle se trouve sous le télésiège du Tour. Depuis l'usine, l'eau et l'air sous pression sont renvoyés par de très nombreuses canalisations jusqu'aux canons implantés dans le domaine. Les retenues collinaires sont apparues en 1996 avec un volume total de stockage de 60 000 m³ pour l'ensemble du domaine contre 119 500 m³ aujourd'hui.

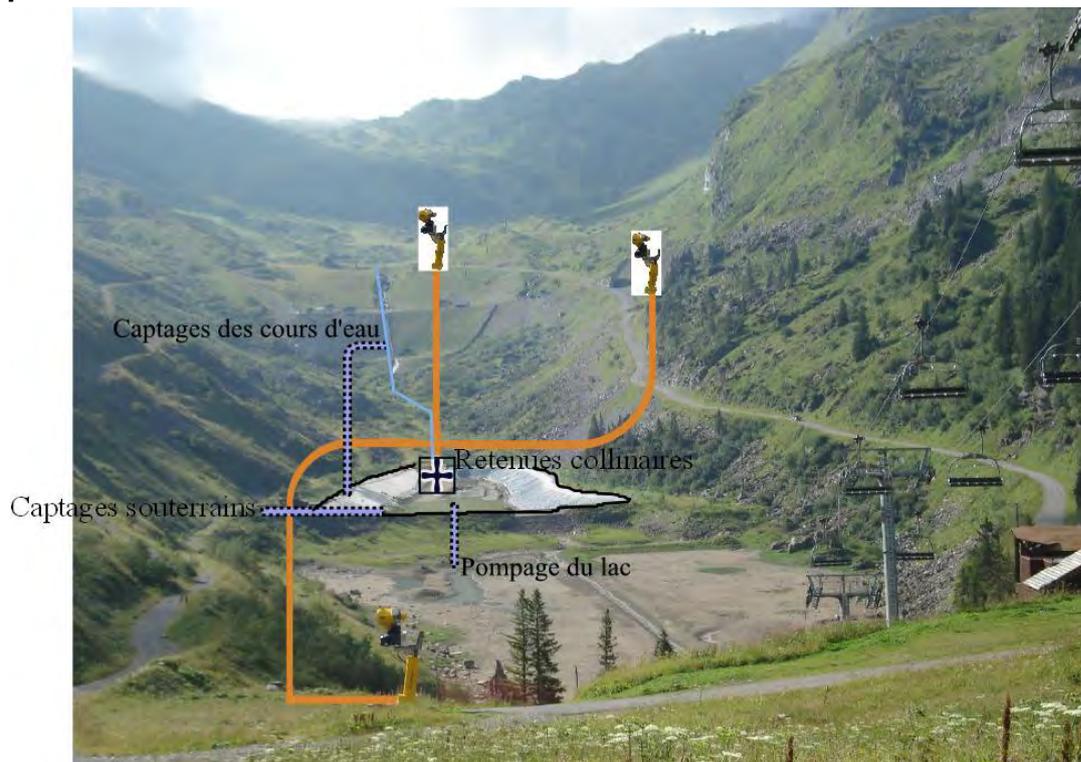


Figure. 107 Monofluides dans la station d'Avoriaz. (Cliché : Mars 2008. E. Magnier).

Figure. 108 Un bifluide sur le retour Prodains, piste des Crots. (Cliché : Mars 2008. E. Magnier).



Figure. 109 Schéma des réseaux « d'enneigement » sur le domaine d'Avoriaz à partir du lac 1730.



En termes de période de production, celle-ci se concentre presque exclusivement en début d'hiver. En effet, depuis 4 ans, la production est lancée dès le 2 novembre si la température atteint -2°C . La neige produite est laissée en tas pour limiter la fonte lors des possibles périodes de redoux, avant d'être étalée peu avant l'ouverture du domaine. Le domaine ouvre généralement au public le week-end précédant les vacances scolaires de Noël. La production se fait au jour le jour (souvent sur quelques heures) en fonction des besoins en neige, des précipitations neigeuses naturelles et de l'usure du manteau. Elle s'arrête fin janvier-début février lorsque les températures deviennent moins favorables à la production. Enfin, quelques brèves périodes de production peuvent survenir jusqu'à fin mars afin de garder de bonnes conditions de ski durant les périodes d'ouverture du domaine.

En juin 2011, un projet a vu le jour au sein de la commune de Morzine-Avoriaz. Il s'agit de construire une retenue collinaire au Fornet en amont du lac 1730 d'Avoriaz. Ce projet est porté par la nécessité de mieux gérer la ressource en eau et de dissocier l'utilisation de la ressource pour l'eau potable et la production de neige. Les remontées mécaniques souhaitent ainsi fiabiliser et étendre leur dispositif de neige de culture qui « entre actuellement en compétition avec les besoins en eau potable » (Note du préfet, 10 juin 2011). Cependant, comme le souligne la note, les impacts de cette retenue à l'aval, notamment sur le remplissage de la retenue du lac 1730 sont méconnus. Cette nouvelle retenue d'un volume de $14\,000\text{ m}^3$ environ pourrait retarder le remplissage du lac 1730. Cette note précise que la retenue devra respecter un remplissage en période de fonte uniquement. Mais des prélèvements

de réajustement à d'autres périodes sont autorisés, excepté en période d'étiage. De plus, un débit réservé de 0,18 l/s doit être maintenu à l'aval. Malgré certaines incertitudes, l'accord a été donné pour le début des travaux et ceux-ci devraient s'achever durant l'automne 2013.

3.5.2 Champéry

L'enneigement débute en 1988 avec 40 monofluides à déclenchements manuels. Aujourd'hui, 30 % du domaine est enneigé soit 35,5 hectares de pistes. Le calendrier de l'enneigement ressemble à celui de la France. L'enneigement débute en novembre et se termine généralement en mars. Mais la production en novembre-décembre sous forme de stock est privilégiée. Ainsi en début de saison, d'énormes tas de neige sont formés en bordure de piste, pour être ensuite étalés au fur et à mesure de la saison touristique. Cela pose problème en cas de redoux avant l'ouverture du domaine, entraînant alors la fonte du stock neigeux. Une nouvelle production doit alors être lancée dès que les conditions le permettent.

Les secteurs enneigés à Champéry sont relativement restreints (Fig.110).

L'approvisionnement de ces enneigeurs se fait, depuis le début de l'enneigement de la station, par prélèvement direct dans les cours d'eau et les lacs naturels ou aménagés situés en amont de la station. L'enneigement est réparti sur quatre secteurs :

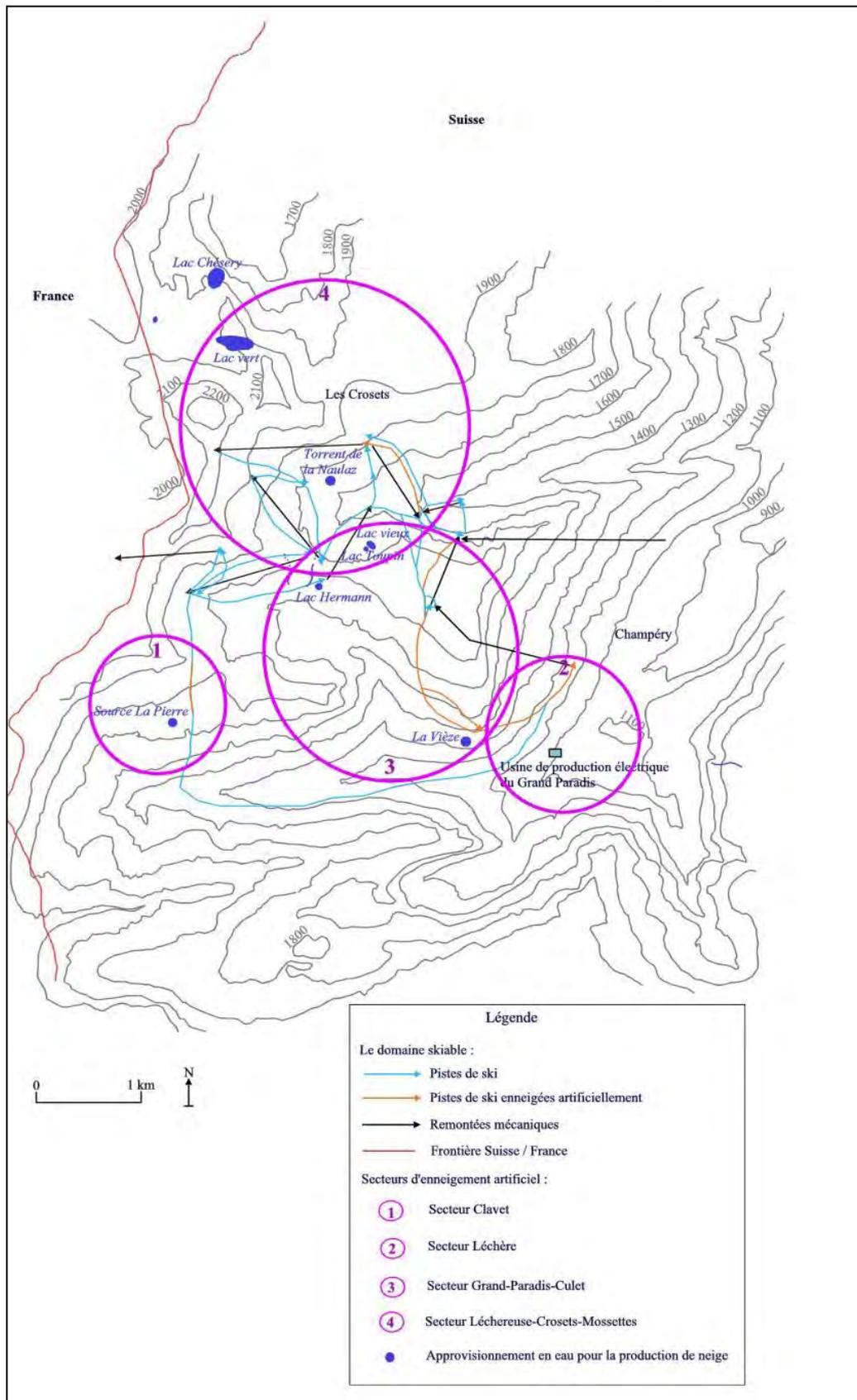
- la zone Clavet alimentée par pompage direct dans la source de La pierre
- la zone Léchère dont l'eau provient de la station hydroélectrique du Grand-Paradis ; l'eau y est prélevée après turbinage
- la zone Grand-Paradis-Culet alimentée par trois lacs (lac Vieux, Lac Hermann et lac Toupin) et par prélèvement dans le torrent de la Vièze
- et la zone Léchereuse et Crosets-Mossettes alimentée par trois lacs (lac Toupin, lac Vieux, lac Vert) et par pompage dans le torrent de la Naulaz.

Les prélèvements se font donc au jour le jour en fonction des besoins de production. Il n'existe à ce jour aucun relevé des dates de production, des volumes produits ainsi que des volumes d'eau prélevés dans le milieu à chaque période de production. Cette absence d'information associée aux prélèvements directs constitue un risque non négligeable quant à la gestion de la ressource, qui ne peut s'appuyer sur des valeurs concrètes. Cependant, dans le cadre de la planification globale des Portes du Soleil, les besoins futurs pour l'enneigement ont été estimés et de nouvelles sources d'approvisionnement ont été proposées. Ainsi, le volume total d'eau nécessaire à l'enneigement planifié des pistes dépasserait pour les années à venir les 150 000 m³. L'interdiction de pompages et de prélèvements dans les lacs Hermann, Toupin et Vert a contraint la société Télé Champéry-Crosets à trouver rapidement de nouvelles sources d'approvisionnement pour ses enneigeurs. Ces nouveaux prélèvements respectent les différentes réglementations comme le

maintien d'un débit résiduel dans les cours d'eau⁹ (exemple du captage de la Vièze). De nouveaux lacs artificialisés vont être créés comme le lac de Rosset, qui alimentera le secteur Crosets-Mossette et qui remplacera le lac Vert, et le lac de Léchereuse, qui remplacera l'approvisionnement des lacs Toupin et Hermann sur le secteur Grand-Paradis-Culet. Ces projets seront mis en place progressivement d'ici 2020. Enfin, une retenue collinaire d'un volume de 80 000 m³ est également en projet, mais sa construction n'est pour le moment pas prévue. Les stations du canton du Valais ont été d'ailleurs fortement incitées ces dernières années à construire des retenues collinaires, celles-ci étant perçues comme la solution d'avenir pour limiter les impacts directs de la production de neige sur la ressource en eau.

⁹ Le maintien d'un débit résiduel minimal est imposé d'après la loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux (RS 814.20). Ce débit résiduel est estimé à partir du Q_{347} . Le Q_{347} est 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.

Figure. 110 Schéma de l'installation de production de neige de Champéry



Conclusion chapitre 3

Le domaine transfrontalier des Portes du Soleil est aujourd'hui le plus grand domaine d'Europe avec plus de 650 km de pistes et un des rares domaines dont la gestion est partagée entre deux pays. Créé il y a près de 40 ans, en 1974, ce domaine compte 12 stations (8 stations françaises et 4 stations suisses). Les sociétés de remontées mécaniques de chacune des 12 stations se réunissent à l'automne pour décider des dates d'ouverture et de fermeture du domaine. Situées à des altitudes comprises entre 930 m et 2466 m, presque toutes les stations sont équipées de canons à neige. Les limites choisies pour cette étude correspondent aux domaines skiables de deux stations du domaine des Portes du Soleil : Avoriaz (France) et Champéry (Suisse). Avoriaz est une station de troisième génération, dite skis aux pieds. Depuis 1960, date de sa création, la circulation à l'intérieur de la station est réglementée et limitée aux skieurs, piétons et traineaux. Champéry est, quand à elle, une station de première génération, développée à partir du village préexistant de Champéry. Le tourisme d'hiver y apparaît pour la première fois dès 1910. Elle est reliée au domaine skiable par l'unique téléphérique de Champéry-Planachaux. Un bon enneigement est donc indispensable au bon fonctionnement de ces stations. D'un point de vue climatique, la région du Chablais est caractérisée par un climat montagnard frais et arrosé, en particulier dans le Haut-Chablais où se localise notre terrain d'étude. Les températures moyennes annuelles sont de l'ordre de 8°C et les précipitations moyennes annuelles de 1500 mm. Les précipitations tombent sous forme neigeuse en hiver et se répartissent tout au long de la saison de ski. Cependant, les probabilités d'avoir une hauteur supérieure ou égale à 40 cm (condition minimale nécessaire pour l'ouverture du domaine) calculées pour la station d'Avoriaz sont de l'ordre de 50 % le 25 décembre et de 65 % le 25 avril. L'enneigement est donc particulièrement incertain en début et en fin de saison. La station justifie ainsi le recours de plus en plus important à l'enneigement artificiel.

Dans le cadre de nos recherches, nous avons instrumenté le bassin versant de la Dranse de Sous-Saix. La deuxième partie de l'étude se réfère donc aux limites de ce bassin versant, d'une superficie de 33.5 km² et alimenté par de nombreux écoulements intermittents. Ce petit bassin versant appartient à un complexe plus vaste de trois grands bassins versants, le bassin de la Dranse d'Abondance, le bassin de la Dranse de Morzine et le bassin de la Dranse de Bellevaux, dont l'exutoire se localise au niveau du lac Léman. Le contexte géologique régional dans lequel se situe ce bassin est particulièrement complexe. Il s'agit d'une région à dominante calcaire où les écoulements se font dans un environnement karstique. Ce contexte a particulièrement compliqué l'étude de l'hydrosystème du bassin de la Dranse. Ce petit bassin versant a de plus été fortement artificialisé ces dernières années. On y retrouve de nombreux captages, canalisations, et transferts d'eau au sein du bassin, mais aussi vers d'autres petits bassins voisins comme celui de la Manche. Aujourd'hui, le lac 1730, aménagé en retenue pour l'approvisionnement en eau potable de la station et l'enneigement du domaine, sert de zone tampon par

laquelle circulent les eaux de l'amont du bassin (secteur Chavanette) vers l'aval du bassin (secteur Prodains et l'exutoire dans Morzine).

Les usages de l'eau sur les deux stations d'étude sont variés tout comme dans de nombreuses stations de montagne. Ces stations concentrent tout d'abord la production d'eau potable, la production de neige de culture, la production d'hydroélectricité, et diverses activités de loisirs (spa, golf, patinoire...). Cette multifonctionnalité de la ressource peut poser un problème de disponibilité notamment lorsque ces activités prélèvent durant les mêmes périodes. Ainsi en hiver, en période d'étiage des cours d'eau, les volumes d'eau prélevés sont particulièrement importants pour la production d'eau potable, de neige, et d'électricité mais aussi pour les activités de loisirs telles que les spa, piscine et patinoire. La gestion de la ressource est alors indispensable pour éviter toute situation de conflits. Dans la station d'Avoriaz, la gestion est rendue complexe par une multiplication des acteurs et des décideurs. Un grand nombre de secteurs d'activités est géré par des organismes privés comme la SERMA (Société d'exploitation des remontées mécaniques d'Avoriaz) qui exploite le domaine skiable et la production de neige, La Lyonnaise des Eaux qui produit l'eau potable, et les organismes de gestion locative des biens (Pierre et Vacances et Maeva) qui sont propriétaires de la station. A ce titre, leur pouvoir décisionnel sur l'organisation de la station est important. Enfin la Mairie de Morzine contrôle l'ensemble des décisions.

La production de neige débute relativement tôt dans les deux stations d'étude, en 1990 à Avoriaz et en 1988 à Champéry. Les surfaces enneigées ont très vite augmenté ces dernières années. Aujourd'hui près de 20 % du domaine d'Avoriaz est enneigé et 30 % du domaine de Champéry. Les sources d'approvisionnement des canons sont multiples dans la station de Champéry. L'eau est captée directement dans les cours d'eau et les lacs naturels. A Avoriaz, une partie du domaine est approvisionné par des retenues collinaires, mais la majeure partie de l'enneigement se fait par le biais du Lac 1730.

La gestion de la ressource en eau doit prendre en compte l'ensemble des activités utilisant la ressource et en particulier la production de neige. La gestion va être de plus en plus complexe d'un point de vue climatique mais aussi d'un point de vue économique. En effet, Avoriaz et Champéry ont de nombreux projets en cours pour développer leur station et la production de neige. A Avoriaz, les infrastructures se modernisent. Un nouveau téléphérique est entré en fonctionnement en avril 2013, permettant d'accroître la rotation des skieurs par heure. Un second 3S est en projet pour diminuer les temps de parcours entre les stations de Morzine et d'Avoriaz. Enfin, de nouvelles constructions vont doubler le nombre de lits d'ici 2014 et proposer de nouvelles activités (parc aquatique ouvert en 2013 et spa en construction). Du point de vue de l'enneigement, une retenue collinaire est en cours de construction et permettra de s'affranchir du lac 1730 pour la production de neige en hiver. La station de Champéry a signé la convention du projet global de planification des Portes du Soleil le 26 septembre 2006. Ce projet prévoit de

développer le domaine skiable en tenant compte des intérêts de chacun et dans un esprit de développement durable. Des retenues collinaires sont en projet ; elles permettront à terme de mieux gérer la ressource en eau. Le canton du Valais incite les stations à la construction de ces retenues afin de limiter les prélèvements directs dans les écoulements de surface et les lacs naturels, dans une volonté de gérer durablement la ressource.

CONCLUSION PARTIE 1

Cette première partie consistait à poser le cadre de la recherche. Elle avait pour objectif de définir les concepts d'enneigement mécanique, de ressource en eau, d'hydrosystème, de gestion et de territoire de montagne. Dans un second temps, les hypothèses de départ ont été posées. Ces hypothèses ont été formulées à partir du manque de connaissance et d'information autour de la pratique de l'enneigement, et nous ont permis de définir la problématique suivante : Quels sont les impacts de la production de neige sur un hydrosystème de moyenne montagne? Il nous faudra alors questionner sur le terrain deux choses : la conciliation de la production de neige avec les autres usages de l'eau mais également la conciliation de la production de neige avec le fonctionnement naturel de l'hydrosystème. Pour répondre à la problématique, nous nous sommes appuyées sur un ensemble de méthodes. La méthodologie s'est fondée sur la lecture de nombreux articles de journaux et études scientifiques qui ont mis en avant les nombreux débats autour de cette pratique. Afin d'appréhender le plus objectivement possible les faits, des enquêtes de terrain et des entretiens avec les divers acteurs d'une station de moyenne montagne ont été menés. Dans un second temps, des mesures ont été réalisées sur le terrain pour vérifier les premiers résultats obtenus par enquête.

Pour définir le cadre, il était indispensable de décrire et d'expliquer la pratique de l'enneigement. Les premières installations de production de neige remontent aux années 1950 aux Etats Unis. En France et en Suisse, il faut attendre une dizaine d'années pour que cette pratique se développe. La variabilité interannuelle de l'enneigement est à l'origine du développement de la pratique. Au départ, les installations étaient « modestes », mais une succession d'hivers peu enneigés dans les années 1990 a favorisé le développement rapide des installations. Aujourd'hui, plus de 20 % des pistes sont enneigeables en France et 30 % en Suisse, loin derrière certains pays de l'arc alpin comme l'Italie (70 %). La production de neige est devenue aujourd'hui un élément majeur du développement économique des stations, un véritable élément marketing dans la course à l'or blanc à laquelle elles se livrent. Le développement des installations ne semble pas ralentir et va probablement rester important dans les années au vu du développement des stations.

Les progrès techniques permettent entre autre d'étendre la saison de ski et de garantir un bon enneigement dans le but d'améliorer l'offre touristique. Mais les volumes d'eau consommés restent importants, en moyenne 4000 m³ d'eau par saison et par hectare de piste. La multifonctionnalité de la ressource en station de montagne pose la question du partage de celle-ci, et des rivalités pouvant exister entre les différentes activités, notamment en période d'étiage hivernal. Cet argument est souvent mis en avant par les détracteurs de l'enneigement. Mais les avis divergent entre les opérateurs de domaine skiable, les associations de protection de l'environnement et les collectivités territoriales. Les opérateurs mettent en avant l'intérêt d'enneiger et sont clairement soutenus par les élus. Nous faisons l'hypothèse

que cette confusion des idées tient surtout du manque de connaissances et de transmission des informations entre les différents acteurs, élus et publics.

Les réglementations pour la production de neige sont globalement suffisantes pour encadrer cette pratique et les prélèvements d'eau. Que ce soit en France ou en Suisse, les différents échelons de réglementations (nationaux à communaux), limitent les prélèvements et les constructions associés aux installations d'enneigement, comme par exemple les retenues collinaires. Cependant, à notre avis, cette réglementation pourrait être améliorée ou du moins mieux contrôlée. Ainsi, en France, les débits réservés imposés par la loi sur l'eau de 2006 après tout ouvrage de prise d'eau, ne sont pas toujours respectés.

Ces divergences de points de vue nous invitent à vérifier les propos tenus par les uns et les autres et à apprécier les implications de la production de neige sur la ressource en eau, le fonctionnement de l'hydrosystème et les autres usages. Pour répondre à ce questionnement de manière la plus objective possible, des investigations sur le terrain sont nécessaires. C'est ce que nous proposons à travers cette étude de cas sur les stations de Champéry et d'Avoriaz et sur le bassin versant de la Dranse de Sous-Saix (Avoriaz).

PARTIE 2 L'ENNEIGEMENT ARTIFICIEL : ATOUS ECONOMIQUES ET IMPACTS HYDROLOGIQUES

« Comment des pratiques peuvent-elles créer de l'espace ? Quand je cherche, je rassemble des éléments hétérogènes et je les construis en corpus (des entretiens, des comptes rendus de thèse ou d'excursion...), je rassemble (par des lectures ou des échanges) des réflexions qui servent à étayer les hypothèses qui me paraissent pertinentes pour instruire ma démarche. Ces diverses pratiques commencent à faire terrain dès lors qu'elles sont spécifiquement agencées afin de mettre au jour le fonctionnement de l'espace qui m'intéresse. »

Y. Calberac, 2011

INTRODUCTION PARTIE 2

Après une première partie posant le cadre de notre travail, la démarche utilisée et la méthodologie de recherche, cette seconde partie concerne spécifiquement le secteur géographique choisi. Elle vise à appréhender concrètement les enjeux d'un territoire de montagne et les impacts de la production de neige sur la ressource en eau et l'hydrosystème de montagne en des termes qualitatifs. L'accent sera mis sur les systèmes de production, de gestion et de partage de la ressource sur la station d'Avoriaz et du bassin versant de la Dranse de Sous-Saix.

Notre choix s'est porté sur les stations d'Avoriaz et de Champéry au cœur du domaine des Portes du Soleil pour des raisons évoquées précédemment et qui pourraient être résumées comme suit :

- l'originalité et l'intérêt de l'approche : les deux stations appartiennent au même domaine skiable transfrontalier qui impose certaines conditions d'ouverture. En parallèle, chaque pays possède ses propres réglementations et ses propres méthodes de production. La station française d'Avoriaz et la station suisse de Champéry doivent donc s'adapter à toutes ces contraintes.

- La possibilité d'accéder à des données : des données ont pu être réunies, non sans difficultés, auprès de la société de remontées mécaniques d'Avoriaz (SERMA), et auprès de la Lyonnaise des eaux. Cette première série de données a ensuite pu être complétée par l'installation d'une sonde dans le bassin versant.

Ce choix s'appuie donc sur des éléments essentiels à la réalisation de nos recherches et à l'intérêt novateur de celles-ci.

Notre étude concerne deux aspects très proches et, nous le verrons, indissociables de l'hydrosystème. Il s'agit dans un premier temps de l'aspect quantitatif de la ressource en eau et dans un deuxième temps de l'aspect fonctionnel de l'hydrosystème. La méthodologie utilisée a pour objectif de mettre en avant le rôle de l'enneigement mécanique sur l'hydrosystème et ses implications sur l'eau. Dans un territoire de montagne, la production de neige n'est pas le seul usage de l'eau et très vite il s'est avéré impossible de dissocier tous ces usages pour réaliser une étude la plus complète et précise possible, compte tenu des informations que nous avons pu obtenir.

Ainsi, cette méthodologie s'est appuyée en premier lieu sur un ensemble d'entretiens menés auprès des opérateurs de domaines skiables. Ils sont souvent les seuls décideurs de la production de neige et par conséquent les seuls à connaître véritablement les volumes de neige produits et les volumes d'eau consommés. Mais ils ne sont pas les seuls à utiliser et devoir gérer la ressource en eau. Les gestionnaires de la production d'eau potable ont eux aussi un rôle important à jouer, en particulier lorsqu'une même ressource est partagée entre ces utilisateurs. En second lieu, cette première démarche a été complétée par des mesures concrètes dans le bassin versant. En effet, pour évaluer les impacts sur l'hydrosystème, il faut

une bonne connaissance de cet hydrosystème, comme par exemple des débits, des volumes d'eau écoulés, des régimes hydrologiques... Or, ces informations sont inexistantes à l'heure actuelle et seule l'instrumentalisation du bassin versant permettrait de les obtenir.

Cette seconde partie analytique est structurée en trois chapitres : l'approche quantitative de la ressource (chapitre 4), l'approche systémique du bassin versant (chapitre 5) et une synthèse des principaux enseignements que nous pourrions tirer de cette étude (chapitre 6).

CHAPITRE 4. LES USAGES DE L'EAU ET L'ENNEIGEMENT ARTIFICIEL DANS UN TERRITOIRE DE MOYENNE MONTAGNE

La méthodologie consiste à analyser les modes de production de neige, les techniques utilisées, les sources d'approvisionnement et les périodes de production pour chacune des stations. Une première partie consiste à définir le volume de la ressource en eau utilisée pour la production de neige à l'échelle des stations de ski et de leur domaine skiable. Une seconde partie évalue plus spécifiquement l'intensité des usages dans une station de moyenne montagne (eau potable, neige de culture...) et leurs implications sur la ressource et sa disponibilité. Le cadre de cette seconde partie est celui de la station d'Avoriaz, pour laquelle il a été possible d'accéder à l'ensemble des données nécessaires, et plus particulièrement la portion du domaine skiable alimenté en eau par le lac 1730 et son bassin versant de Chavanette.

4.1 LE SYSTEME DE PRODUCTION DE NEIGE DANS LES STATIONS D'AVORIAZ ET DE CHAMPERY

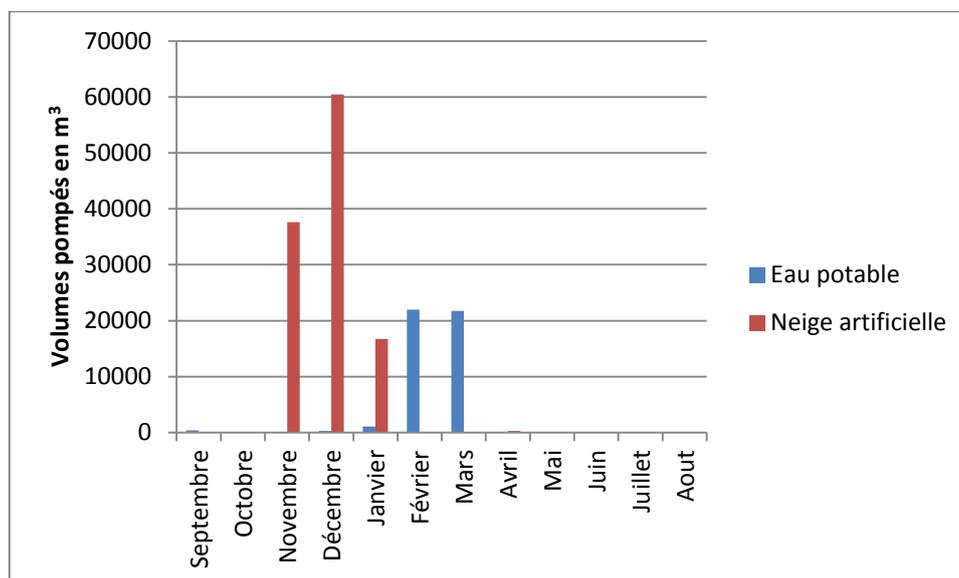
4.1.1 La station d'Avoriaz : le cas du partage d'une même ressource

Dans la station d'Avoriaz, l'eau potable et la distribution dépendent de la Lyonnaise des eaux, filiale de SUEZ environnement. Quand à l'enneigement artificiel, les périodes de production et les volumes produits dépendent de la société d'exploitation des remontées mécaniques d'Avoriaz (la SERMA). La SERMA pompe l'eau dans le lac d'Avoriaz, également utilisé pour l'eau potable et géré par la Lyonnaise des eaux. Un accord a été passé entre ces deux entreprises, autorisant les pompages pour l'enneigement artificiel. La gestion privée et publique de la station et de toutes les activités complique la conciliation des désirs de chacun et la promesse publicitaire faite aux touristes. Tous ces acteurs ont un droit de regard et de décision sur les activités et la gestion de la station. De ce fait, la gestion et les accords passés entre les divers acteurs sont parfois flous et bien souvent non écrits. Dans ce contexte, il paraît donc bien difficile de respecter les réglementations du code de l'environnement.

Les pompages se répartissent toujours selon le même calendrier (d'après les données de la SERMA et de la Lyonnaise des eaux de 2000 à 2012) : les prélèvements pour l'eau potable débutent en décembre avec une forte hausse dès janvier jusqu'en mars. Les autres mois de l'année, l'eau pompée provient des différentes ressources. Les pompages pour l'enneigement s'effectuent de novembre à janvier. A l'échelle de la saison d'hiver (5 mois, de novembre à mars), on observe un décalage des périodes de pompages d'eau potable et de neige artificielle. L'eau est d'abord pompée dans le lac pour l'enneigement artificiel, puis pour la production d'eau potable, ce qui réduit considérablement les risques de conflits d'usage. Cependant, les volumes pompés à l'échelle de la saison dans le bassin versant de la

Dranse de Sous-Saix¹⁰ sont particulièrement importants : 45 674 m³ pour l'eau potable et 115 215 m³ pour l'enneigement (de novembre à mars 2010-2011), et 70 862 m³ pour l'enneigement, 70 543 m³ pour l'eau potable (de novembre à mars 2011-2012). Ces pompages entraînent une baisse du niveau du lac en fin d'hiver et au début du printemps (Fig. 111). Une fois les pompages arrêtés, le niveau du lac augmente à nouveau lors de la fonte du manteau neigeux. Ce décalage des usages complique la gestion de la ressource car il faut prévoir les besoins pour l'enneigement et ceux pour la production d'eau potable. La surveillance du niveau du lac est essentielle ici car en dépend l'alimentation en eau potable. Si le niveau observé par les techniciens de la Lyonnaise des eaux est trop bas, la production de neige est stoppée, ce qui s'est déjà produit plusieurs fois les années passées. Mais il n'y a pas de règle établie, de niveau imposé, il s'agit d'un accord informel entre les deux parties. Si les prévisions sont erronées ou que des erreurs sont commises lors de l'observation des niveaux, il peut y avoir un risque de pénurie d'eau pour les mois suivants, ce qui mettrait en péril l'alimentation en eau potable de la station et créerait ainsi un conflit d'usages. Plus encore, si les précipitations ou la fonte des neiges sont insuffisantes pour recharger le lac, cette situation de pénurie pourrait se prolonger jusqu'en été.

Figure. 111 Les pompages dans le lac 1730 sur la saison 2010-2011. (D'après les données de la SERMA et de la Lyonnaise des Eaux).



4.1.2 Champéry : une évolution rapide des systèmes de production

La période d'étude s'étend cette fois-ci sur les saisons de 2005 à aujourd'hui. La station de Champéry a connu beaucoup de changements au cours de ces dernières

¹⁰ Il faut rappeler que le Lac 1730 est un complément pour l'alimentation en eau potable. L'alimentation de la station se fait majoritairement par d'autres sources indépendantes au réseau Lac 1730.

années. Les prélèvements pour la production de neige ont considérablement augmenté et les réglementations concernant cette production ont parallèlement été renforcées.

L'approvisionnement des enneigeurs de la station de Champéry se fait, depuis le début de l'enneigement artificiel de la station, par prélèvement direct dans les cours d'eau et les lacs naturels ou aménagés situés en amont de la station. Une partie de l'eau provient de la station hydroélectrique du Grand-Paradis ; l'eau y est prélevée après turbinage. Les prélèvements se font donc au jour le jour en fonction des besoins de production. Il n'existe à ce jour aucun relevé des dates de production, des volumes produits ainsi que des volumes d'eau prélevés dans le milieu. Cette absence d'information associée aux prélèvements directs constitue un risque non négligeable quant à la gestion de la ressource, qui ne peut s'appuyer sur des valeurs concrètes. Comme on a pu le voir dans les exemples précédents, la connaissance des volumes prélevés, ainsi que le partage des réservoirs, constituent certes un risque de conflit mais permet de mieux gérer la ressource globale et ainsi d'éviter les risques de pénurie.

Depuis quelques années, des lacs ont été aménagés ou créés et de nouveaux pompages dans les cours d'eau ont été réalisés. Ainsi, les volumes prélevés ont doublé en cinq ans (71675 m³ d'eau consommés en 2005-2006 et près de 150 000 m³ en 2009-2010). Cependant, la question de la gestion de l'eau est ici aussi prise au sérieux, puisqu'une étude sur les besoins en eau pour l'alimentation des installations d'enneigement a été demandée par la société des remontées mécaniques Télé Champéry (Fig. 112 et 113) (Bureau d'ingénieurs et géologues Tissières SA, 2009). Ce document s'intègre dans la planification globale 2005-2020, engagée sur les stations suisses du domaine des Portes du Soleil pour concilier les intérêts économiques et écologiques (Mavilia-Woeffray, 2008). Les besoins futurs pour l'enneigement ont été estimés et de nouvelles sources d'approvisionnement ont été proposées. Ces projets pourront être mis en place progressivement.

Figure. 112 Tendence de l'évolution des prélèvements pour la production de neige à Champéry entre 2005 et 2010. (D'après les données de la société de remontées mécaniques Téléchampéry les Crosets).

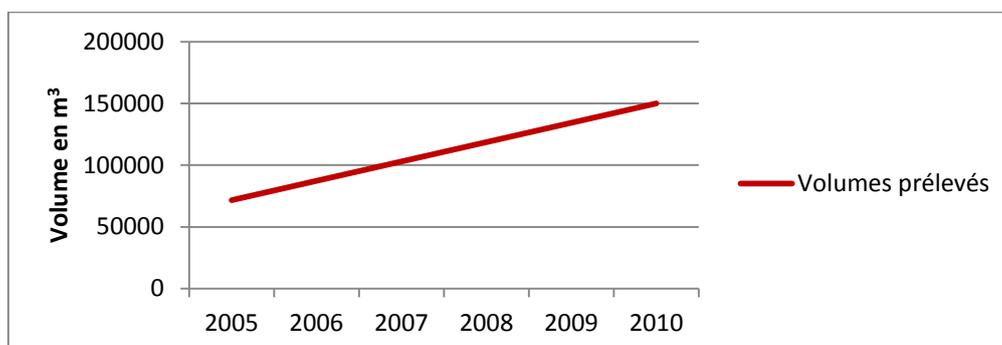
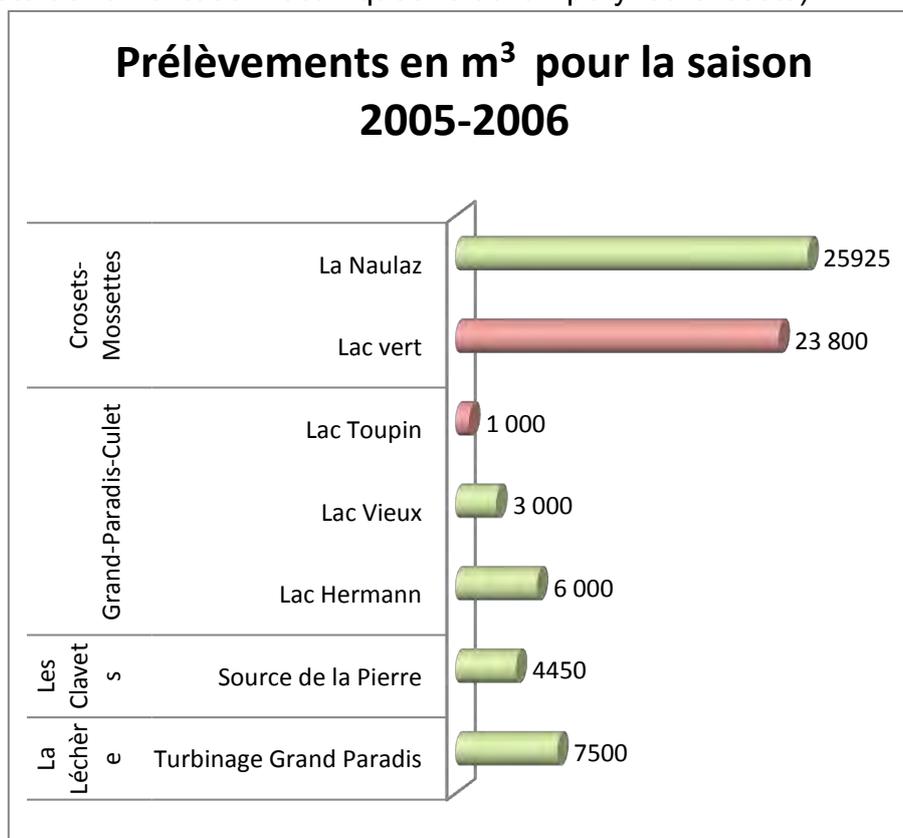


Figure. 113 Les prélèvements selon les différents secteurs. (D'après les données de la société de remontées mécaniques Téléchampéry les Crosets).

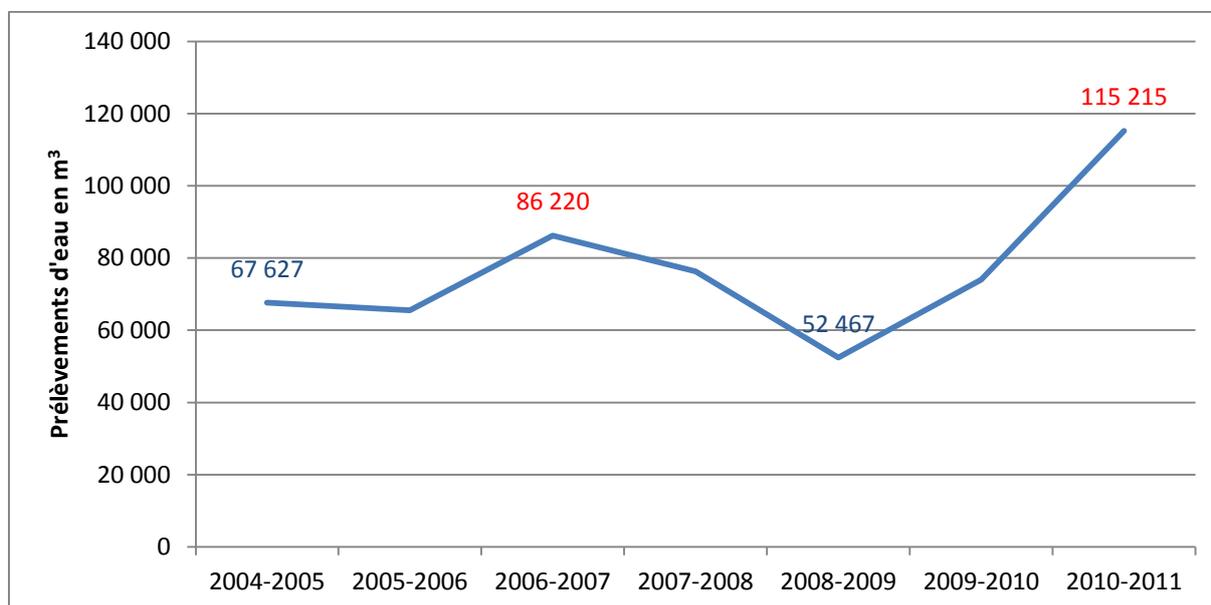


En vert les sources d'approvisionnement conservées dans la planification globale, en rouge les sources qui seront supprimées d'ici 2020.

4.1.3 Les enjeux actuels de l'enneigement

Aujourd'hui, la variabilité climatique est indéniable au regard de ces dernières années (hivers 2006-2007, 2010-2011 et 2011-2012 particulièrement pauvres en neige et hivers 2004-2005, 2008-2009 et 2012-2013 relativement bien enneigés). Cette grande variabilité incite les stations à développer les équipements de production de neige. Ainsi, sur une période de référence de novembre à mars (période de production de neige), les volumes d'eau prélevés pour la production varient fortement d'une année à l'autre. Les hivers particulièrement pauvres en apport neigeux naturels sont également ceux pour lesquels les prélèvements d'eau sont particulièrement importants (Fig. 114). Sur la saison 2006-2007, les prélèvements d'eau atteignent 86 220 m³ et en 2010-2011 ils atteignent 115 215 m³. A l'inverse, les hivers relativement bien enneigés naturellement correspondent aux hivers pour lesquels la consommation d'eau pour la production de neige est moins importante. On peut citer l'exemple de 2004-2005 (67 627 m³) et 2008-2009 (52 467 m³), soit une production de neige doublée en saison peu enneigée.

Figure. 114 Les prélèvements d'eau pour la production de neige à Avoriaz entre 2004 et 2011. (D'après les données de la SERMA).

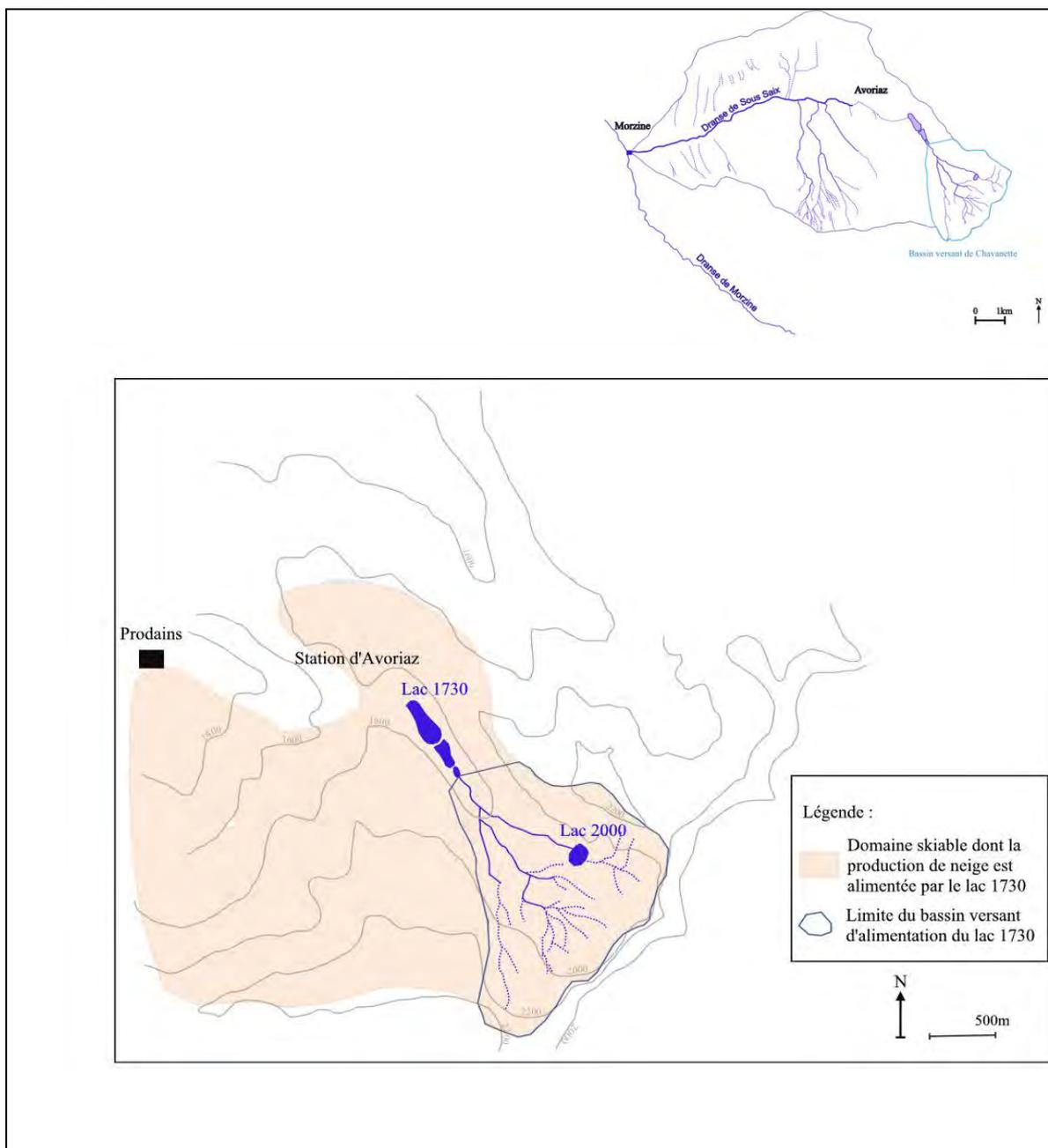


En rouge, les valeurs de prélèvements d'eau correspondantes aux années peu enneigées naturellement et *en bleu* les valeurs pour les années relativement bien enneigées.

4.2 LE PARTAGE DE LA RESSOURCE EAU POTABLE ET NEIGE DE CULTURE DANS LA STATION D'AVORIAZ

Pour évaluer les usages de l'eau en termes de besoin et de ressource, nous utiliserons les données de la SERMA et de la Lyonnaise des eaux à l'échelle du secteur du domaine skiable appelé Chavanette (Fig. 115). Ce secteur correspond également au bassin versant alimentant le lac 1730, d'une superficie de 2.31 km². La production de neige du secteur Chavanette et la production d'eau potable de la station s'effectuent grâce aux prélèvements dans le lac 1730.

Figure. 115 Le secteur Chavanette et le bassin versant d'approvisionnement du lac 1730.



4.2.1 Les prélèvements saisonniers et mensuels dans le lac 1730

Le lac 1730, comme il a été vu précédemment sert aujourd'hui à l'alimentation de l'usine à neige et de l'usine de traitement de l'eau pour l'eau potable de la station. Il était donc particulièrement intéressant d'analyser dans un premier temps les volumes d'eau pompés par ces deux secteurs d'activités et la répartition de ces pompages au cours de l'année. Deux années complètes de mesures journalières de ces pompages au niveau du lac ont pu être fournies par la Lyonnaise des Eaux et la SERMA d'Avoriaz (Fig. 114).

4.2.1.1 Les prélèvements annuels

Les prélèvements pour l'enneigement ou pour la production d'eau potable se concentrent principalement entre les mois de novembre et de mars, soit durant la saison hivernale à forte activité touristique, qui coïncide également avec la période d'étiage des cours d'eau. Au cours de la première année d'étude (2010-2011), les prélèvements pour la production de neige se sont concentrés sur trois mois, de novembre à janvier. C'est seulement dans un second temps que des prélèvements pour la production d'eau potable ont été effectués, en février et en mars. Comme nous l'a expliqué le responsable de l'enneigement de la SERMA au cours d'entretiens, les pompages pour la production de neige se concentrent toujours entre les mois de novembre à mars mais les volumes pompés dépendent des besoins de réapprovisionnement du manteau neigeux et des conditions climatiques favorables au lancement de la production. Il est donc relativement difficile, voire même impossible d'estimer en début de saison les volumes mensuels nécessaires à l'enneigement. Quand à la production d'eau potable, celle-ci dépend également des besoins de compléments. En effet, l'approvisionnement de l'usine de filtration se fait par apport direct de différentes sources dont l'usage est exclusivement réservé pour l'eau potable. Mais durant la saison d'hiver, cet approvisionnement n'est pas suffisant, et le lac sert alors de complément (Fig. 116). Certains mois d'hiver, l'approvisionnement provenant du lac compte presque pour moitié dans les apports pour la production d'eau potable. Ainsi, on comptabilise pour les mois de février 2011, mars 2011 et février 2012 respectivement, 47 %, 43 % et 40 % de la production d'eau potable provenant de l'approvisionnement du lac 1730. Ce complément est, d'après la Lyonnaise des Eaux, généralement utilisé de novembre à mars, mais jamais au-delà de cette période. En fonction des réserves de stockage dans les bassins réservoirs d'eau potable effectuées en fin d'été et à l'automne, le lac n'est pas toujours utilisé dès le mois de novembre. Certaines années, les prélèvements débutent plus tard dans la saison et ne sont de ce fait pas réalisés en même temps (année 2010-2011) (Fig. 117). En revanche, lorsque les stocks d'eau potable sont insuffisants dès le début de saison et que les conditions d'enneigement sont peu favorables, comme ce fut le cas durant l'hiver 2011-2012, les prélèvements commencent dès le mois de novembre et ces deux activités utilisent alors parallèlement la ressource du lac 1730. Les prélèvements pour la production d'eau potable en 2011-2012 sont plus importants car les premiers immeubles (projet d'agrandissement d'Avoriaz) commencent à être occupés (consommation alimentaire et de loisirs avec les nombreux spa privés).

Figure. 116 Les prélèvements pour la production d'eau potable de la station.
(D'après les données de la SERMA et de la Lyonnaise des Eaux).

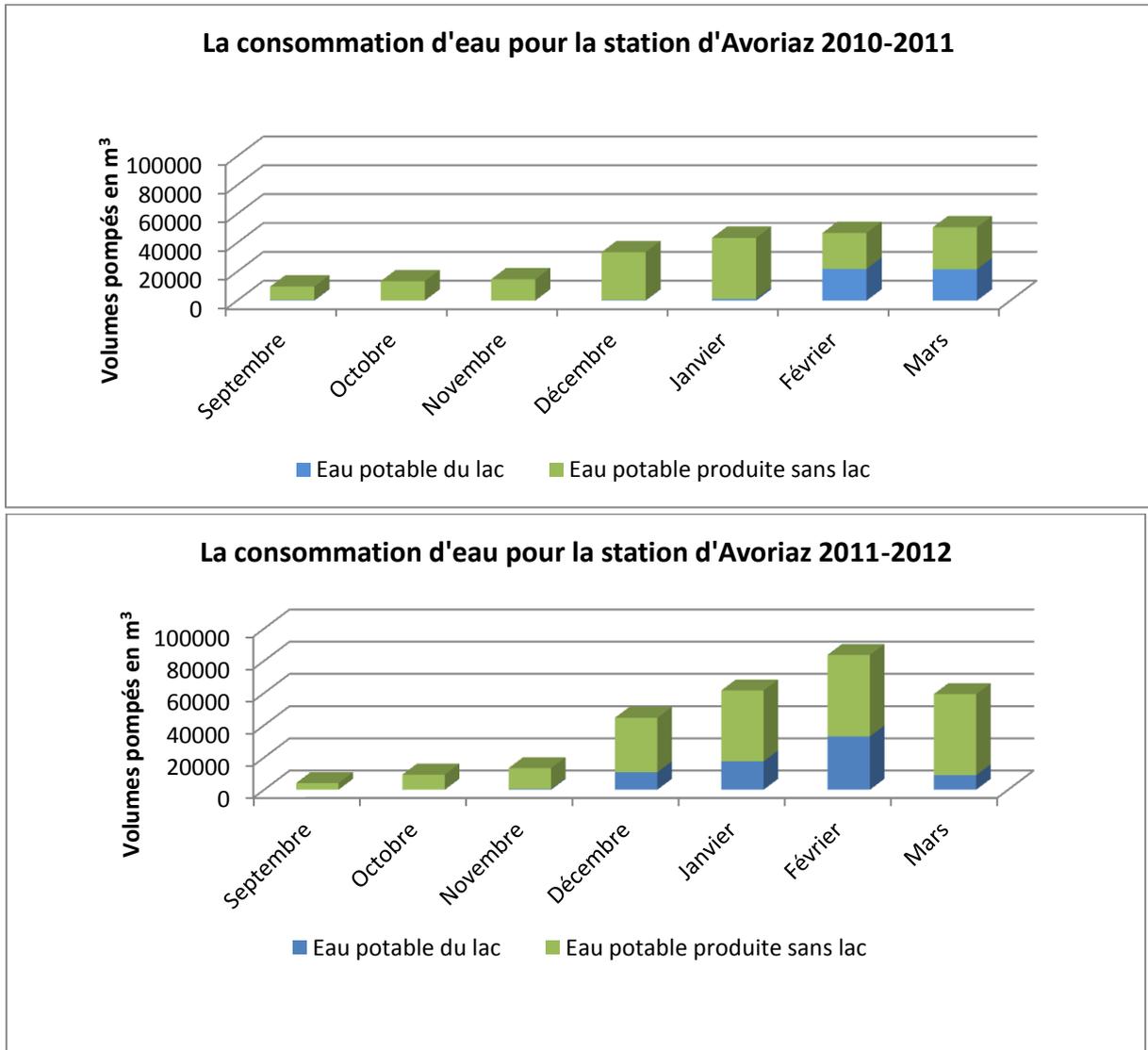
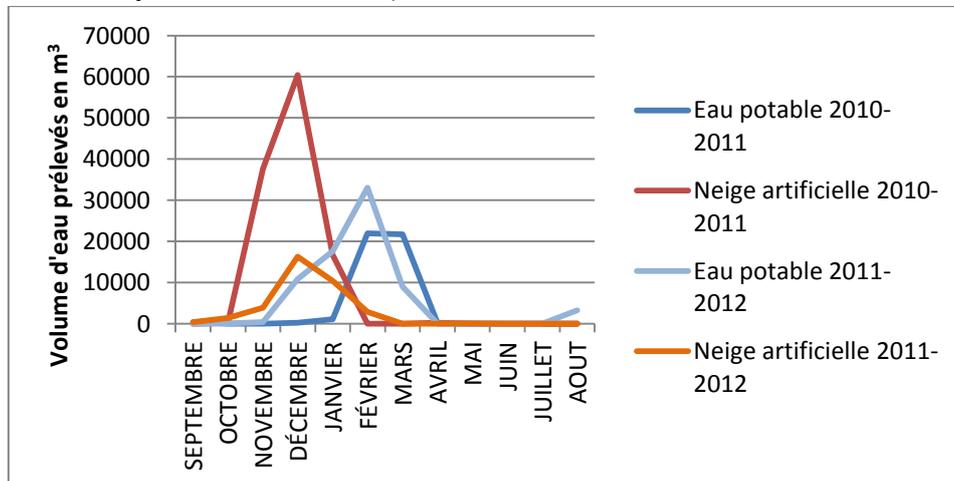


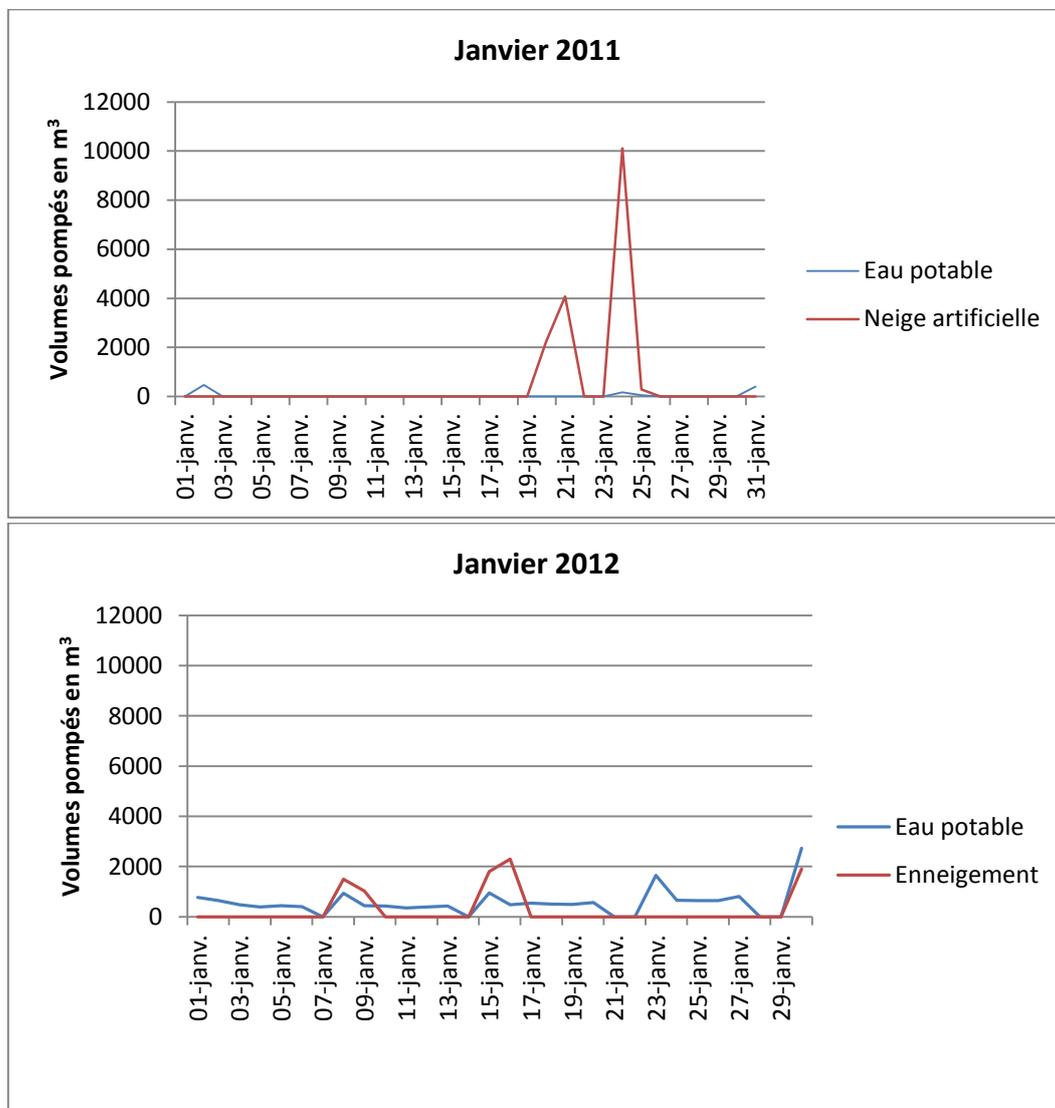
Figure. 117 Les prélèvements dans le lac 1730. (D'après les données de la SERMA et de la Lyonnaise des Eau).



4.2.1.2 A l'échelle mensuelle et journalière

A cette échelle mensuelle, on constate que certains mois d'hiver concentrent de forts prélèvements, que ce soit pour la production d'eau potable ou pour celle de l'enneigement. Une échelle d'analyse plus fine permet de mieux appréhender d'éventuels risques de conflits (Fig. 118). L'échelle choisie est donc l'échelle journalière pour les mois de janvier 2011 et janvier 2012 qui concentrent les principaux prélèvements.

Figure. 118 Les prélèvements d'eau à l'échelle journalière dans le lac 1730 pour le mois de janvier. (D'après les données de la SERMA et de la Lyonnaise des Eaux).



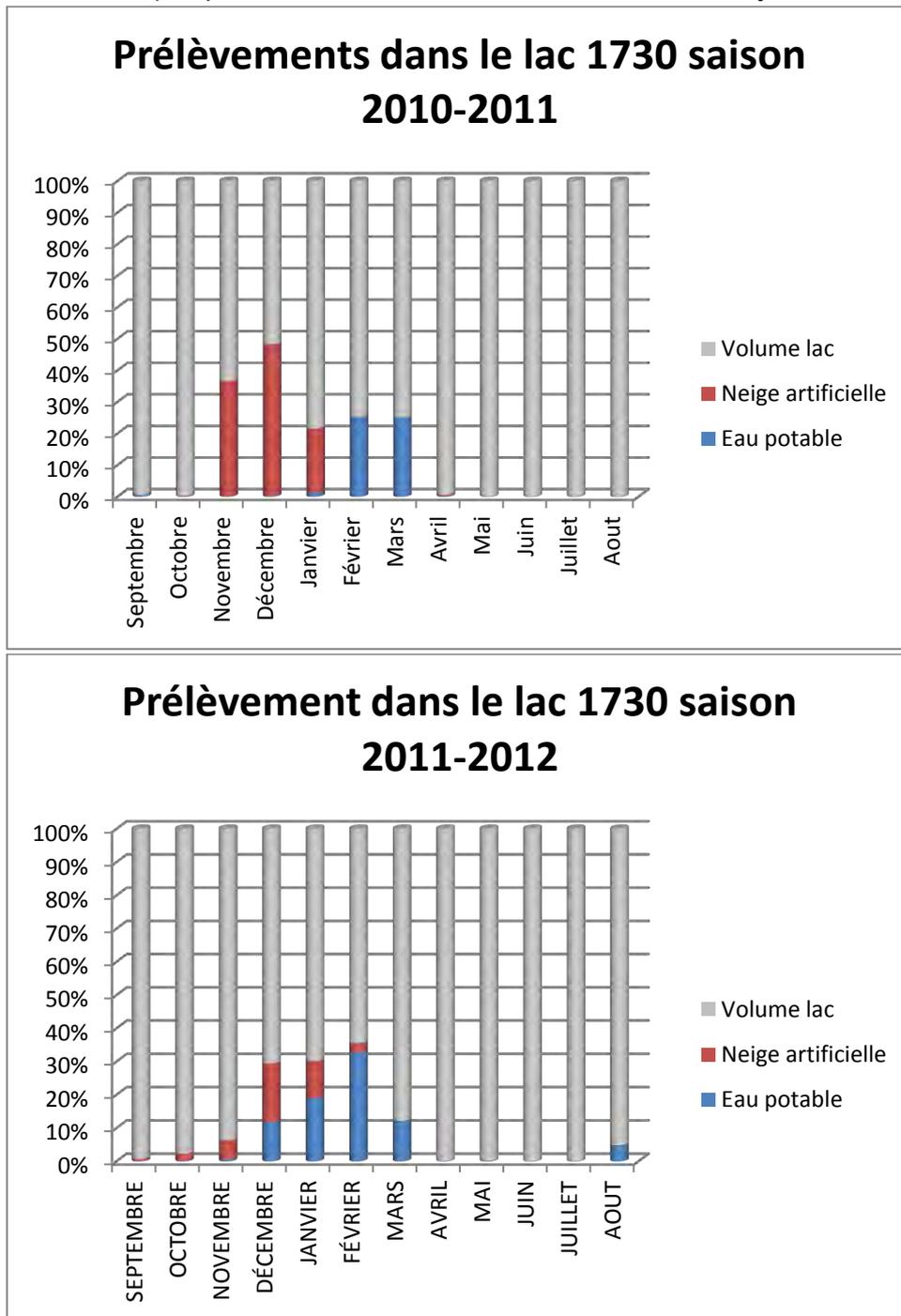
En janvier 2011, quasiment la totalité de la production de neige se concentre sur une seule et même journée le 24 janvier. Des volumes considérables sont prélevés en quelques heures (10 114 m³). Quand aux prélèvements pour l'eau potable, ils sont

presque inexistants, car les autres sources suffisent à satisfaire les besoins. En janvier 2012, la situation est très différente car les deux usages que sont la production de neige et celle d'eau potable effectuent des pompages de manière répétée sur tout le mois de janvier. Ainsi le 8 janvier, 938 m³ sont pompés pour l'eau potable et 1499 m³ pour l'enneigement, le 15 janvier 953 m³ pour l'eau potable et 1800 m³ pour l'enneigement et le 30 janvier 2723 m³ pour l'eau potable et 1900 m³ pour l'enneigement. Ces besoins importants et sur une période très courte (parfois quelques heures) rendent difficile la prévision des pompages pour la production de neige et par conséquent la gestion de la ressource du lac, pourtant nécessaire pour la production d'eau potable.

4.1.2.3 La part des prélèvements à l'échelle de la ressource globale disponible dans le lac 1730

D'après les divers entretiens menés en station, auprès des opérateurs du domaine skiable, de la société de remontées mécaniques d'Avoriaz et de la Lyonnaise des Eaux, il n'y a à ce jour pas eu de pénuries d'eau et de conflits entre ces deux usages de l'eau. Tous ont confirmé que les prélèvements se font en accord avec la Lyonnaise des Eaux qui surveille en permanence le volume et le niveau du lac. Mais en cas de baisse de la disponibilité de la ressource, la priorité sera toujours donnée à la production d'eau potable. Sans règle définie, tout cela accroît le risque de conflits d'usage à différentes échelles spatiales et temporelles. La situation est à surveiller car même s'il n'existe pas à ce jour de conflit et de risque de conflit, cela peut changer dans les années à venir. La station d'Avoriaz devra faire face à des productions de neige de plus en plus importantes et à l'accroissement de la population touristique (les nouvelles constructions seront fonctionnelles en 2014). A l'échelle de la ressource globale du lac 1730, les prélèvements sont relativement importants durant les mois d'hiver (Fig. 119). Pour la saison 2010-2011, ceux-ci atteignent quasiment 50 % du volume global du lac au mois de décembre. Il faut rappeler que le volume global du lac est de 65 000 m³. Et il faut souligner qu'il ne s'agit alors que des prélèvements pour la production de neige, les pompages pour la production d'eau potable n'ayant pas encore débuté. En revanche pour la saison 2011-2012, les prélèvements ne dépassent pas 40 % du volume global du lac. Cependant, il faut nuancer ces propos car le lac est régulièrement réapprovisionné par les apports des différents cours d'eau en tête du bassin versant. L'impact réel des pompages sur le volume du lac devrait en théorie être nettement moins important si l'on tient compte de ce réapprovisionnement. Ainsi l'étude de la variation du niveau du lac en fonction des prélèvements permet d'identifier les impacts de ces prélèvements sur la ressource du lac.

Figure. 119 Les prélèvements dans le lac 1730 en pourcentage du volume total du lac. (D'après les données de la SERMA et de la Lyonnaise des Eaux).



4.2.3 La mobilisation de l'eau du lac 1730, vers un marnage du lac ?

Pour une meilleure gestion de cette ressource, la société de la Lyonnaise des Eaux à Avoriaz a décidé de mettre en place un système de mesure de la hauteur d'eau du lac (2010). Suite à deux saisons de mesures de la hauteur d'eau, on se demande s'il existe une corrélation visible entre les pompages et la variation du niveau du lac.

Il faut au préalable préciser l'ensemble des facteurs naturels et anthropiques responsables de la variation du niveau d'un lac de montagne. Le lac se recharge par l'apport des précipitations et de la fonte du stock neigeux sur les versants, généralement en fin de saison, mais cette recharge peut aussi se produire en hiver en fonction des conditions climatiques (précipitations et températures). Ces facteurs doivent ici être pris en compte pour comprendre les variations du niveau du lac. En ce qui concerne les pertes, celles-ci peuvent être imputables aux prélèvements anthropiques, sujet de notre étude. Mais d'autres facteurs de pertes expliquent la baisse du niveau. Il s'agit d'une part de l'évaporation depuis le plan d'eau, difficilement quantifiable et probablement peu impactant sur la saison d'hiver car la surface du lac est gelée durant cette saison. D'autre part, il s'agit des pertes par infiltration qui sont impossibles ici puisque le fond du lac est recouvert d'une bâche étanche. Ces deux facteurs naturels de perte ne seront donc pas pris en compte dans le cadre de cette étude.

4.2.3.1 Les variations saisonnières du niveau du lac

Sur le graphique mensuel de 2010-2011, on observe une légère baisse du niveau du lac coïncidant avec les périodes de forts prélèvements. En observant les variations journalières du niveau du lac pour la saison 2010-2011, on observe un lien entre pompage et baisse du niveau du lac (Fig. 120 et Fig. 121).

En effet, à l'échelle de la saison, on constate une première baisse du niveau du lac (0,23 m) en décembre correspondant au pompage important pour la production de neige. Une nouvelle baisse significative (1,28 m) apparaît en mars suite à de nombreux pompages successifs les mois précédents. Pour la saison 2011-2012, une première baisse est visible en janvier suite à la production de neige (0,05 m) suivie d'une seconde baisse plus significative en février (0,14 m) due aux nombreux pompages successifs pour la production de neige et d'eau potable. Le niveau du lac semble être particulièrement sensible à l'action conjointe des pompages pour la production de neige et la production d'eau potable, particulièrement en fin de saison. Mais le niveau dépend également des facteurs climatiques (Fig. 122 et Fig. 123).

Figure. 120 La variation du niveau du lac et les prélèvements associés pour la saison 2010-2011. (D'après les données de la SERMA et de la Lyonnaise des Eaux).

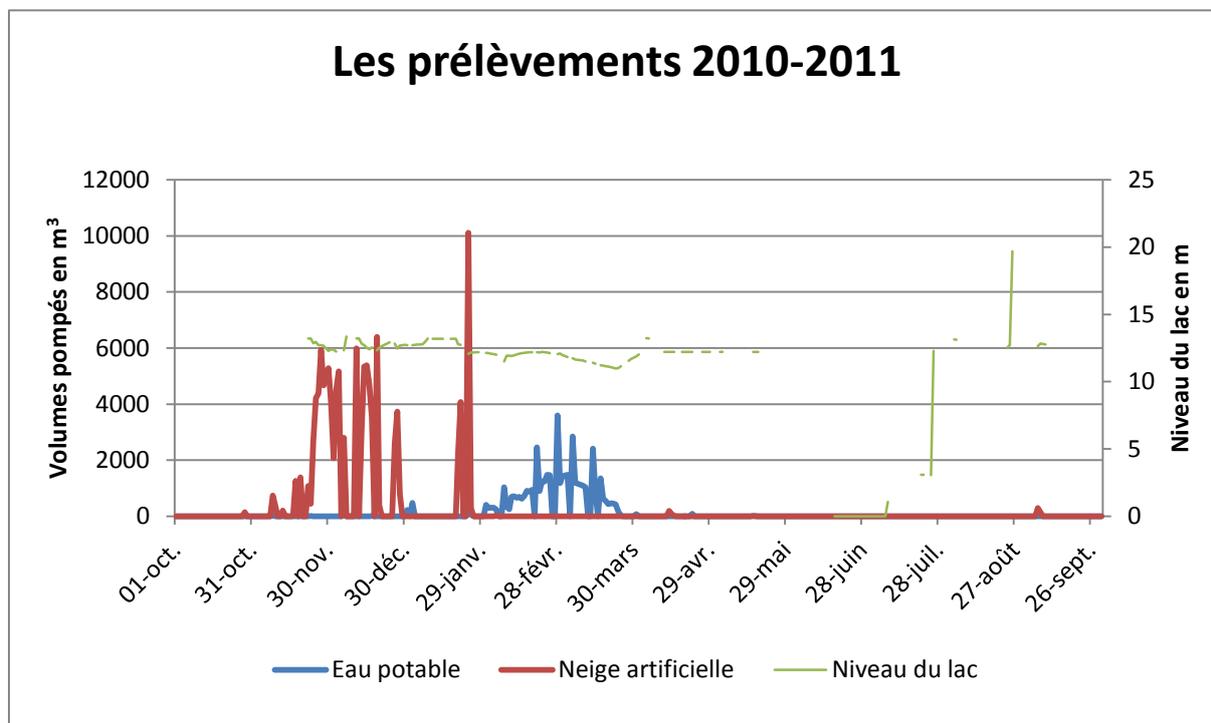


Figure. 121 Les éléments climatiques (température, précipitations et hauteur de neige) pour la saison 2010-2011. (D'après les données MétéoFrance de la station des Gets).

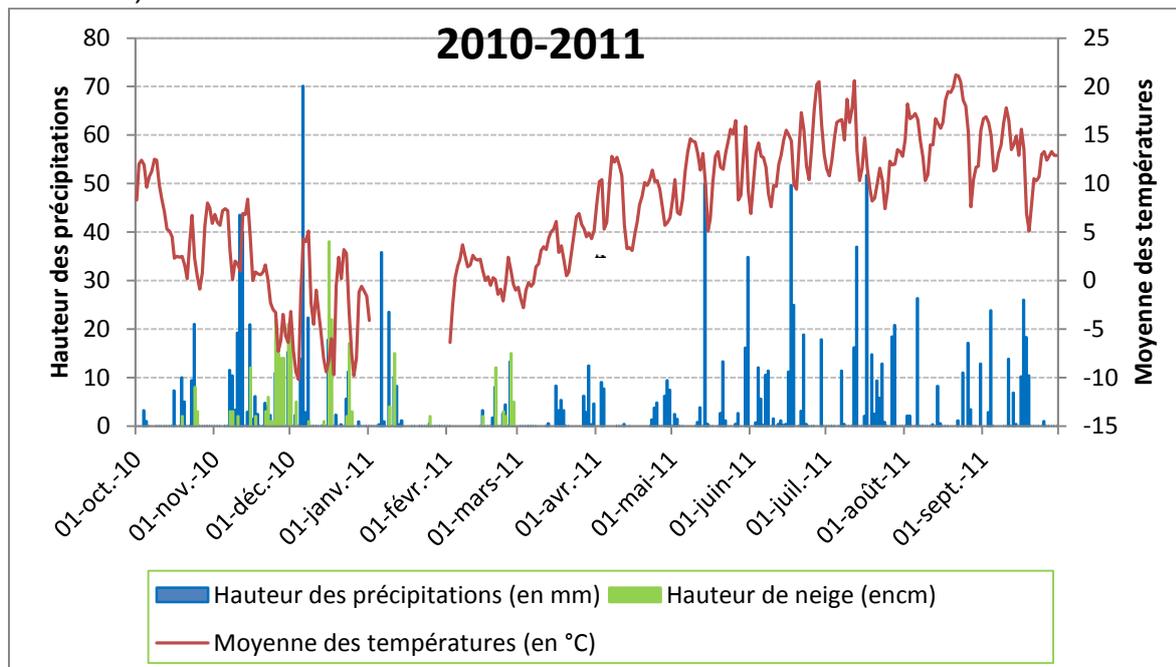


Figure. 122 La variation du niveau du lac et les prélèvements associés pour la saison 2011-2012. (D'après les données de la SERMA et de la Lyonnaise des Eaux).

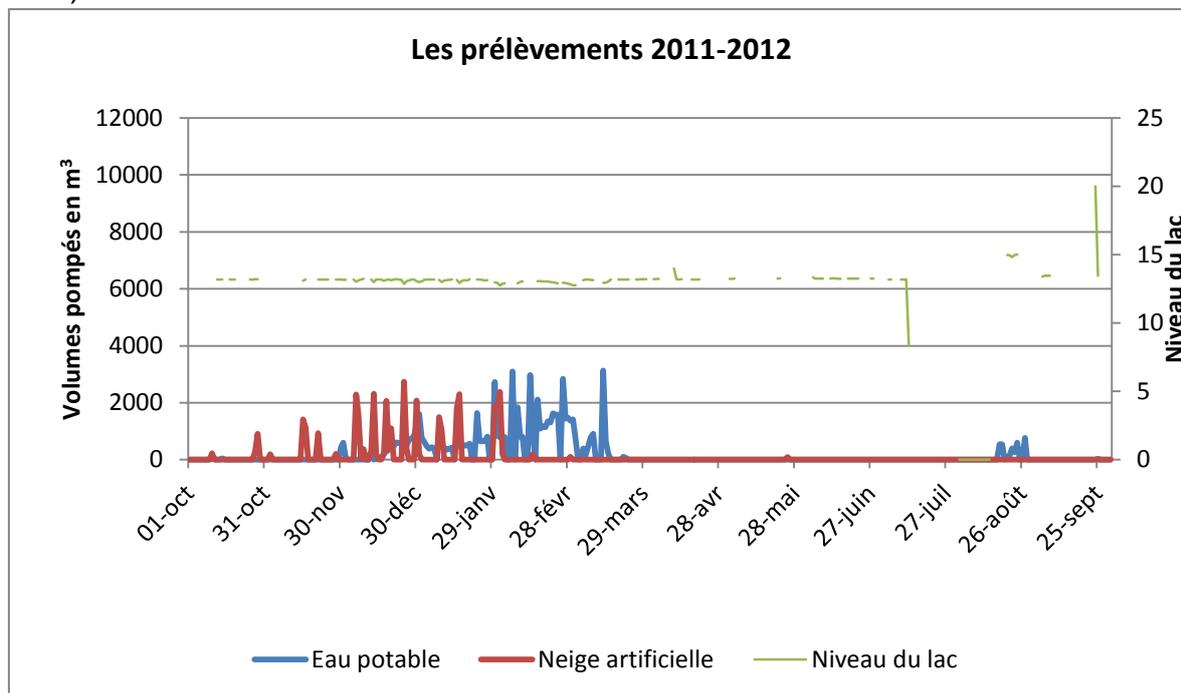
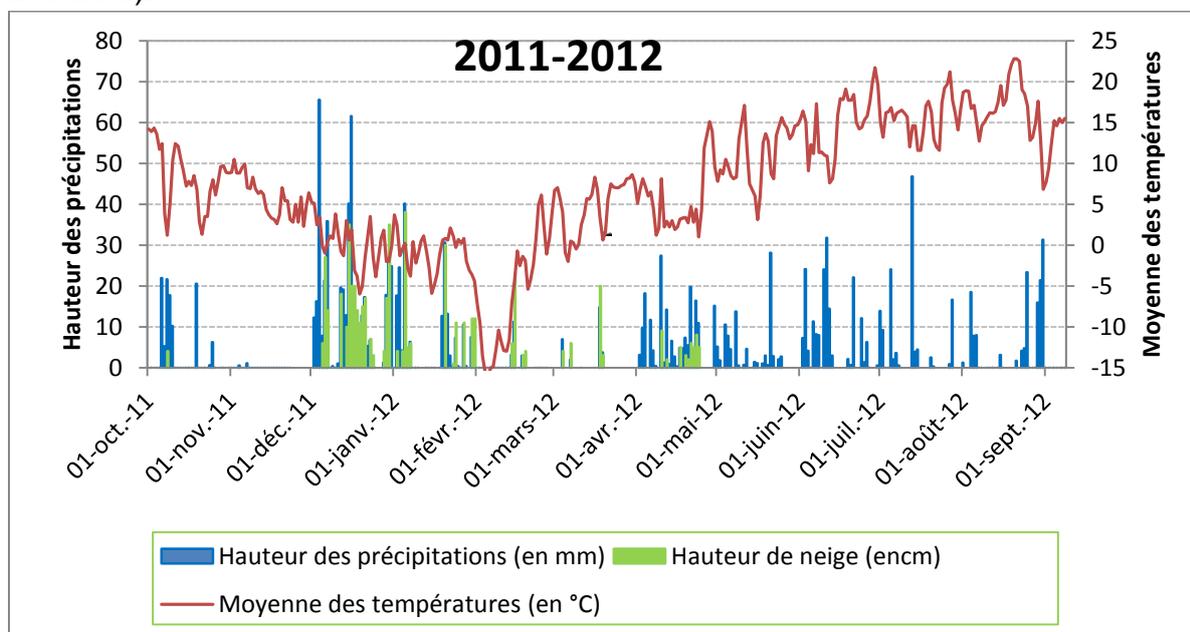


Figure. 123 Les éléments climatiques (température, précipitations et hauteur de neige) pour la saison 2011-2012. (D'après les données MétéoFrance de la station des Gets).



En effet, les facteurs climatiques sont indissociables de la compréhension de la variation du niveau du lac. Ainsi, pour la saison 2010-2011, le niveau du lac est déjà particulièrement bas en début de saison (12.70 m en moyenne pour le mois de

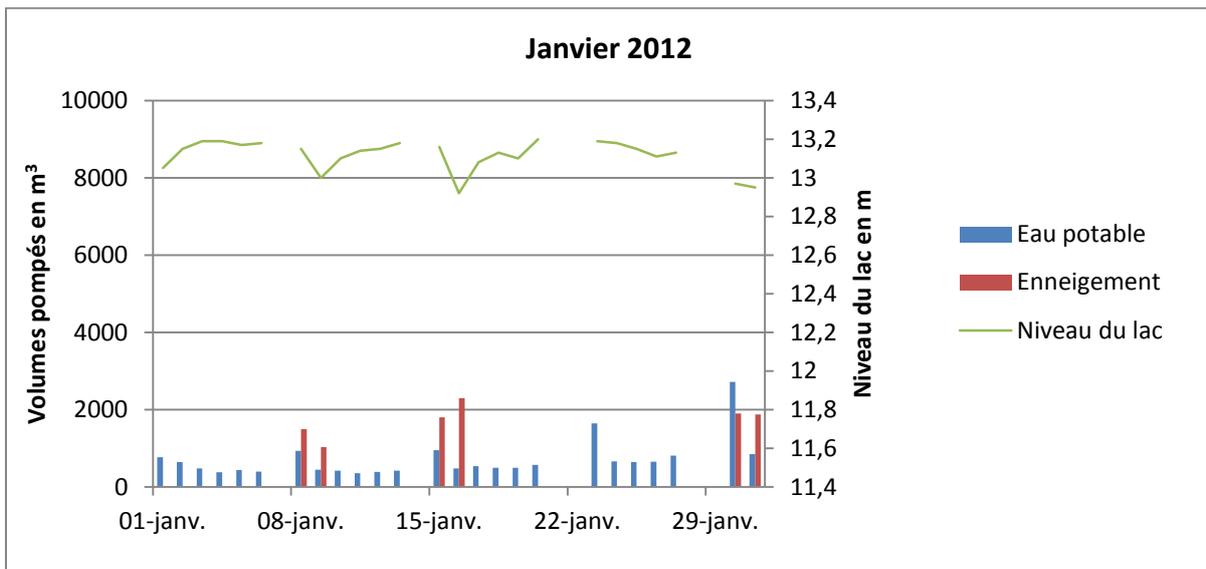
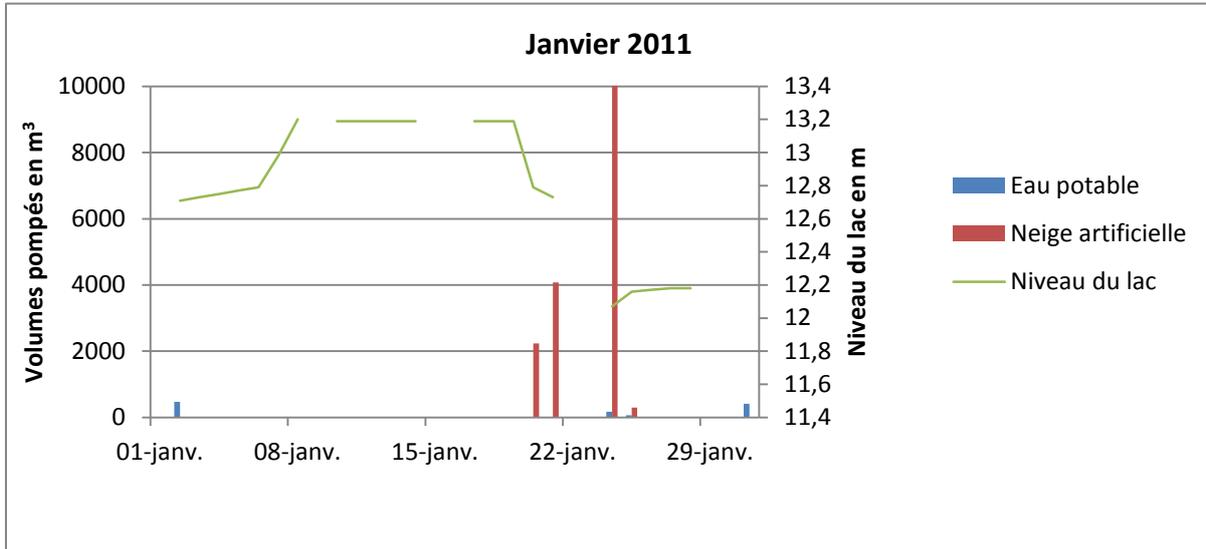
décembre, soit presque 0.50 m sous le trop-plein). Les précipitations du mois de décembre de l'ordre de 173.7 mm cumulée sur le mois limitent l'abaissement du niveau du lac qui se maintient à 12.72 m le 31 décembre, malgré les prélèvements importants. Les températures ne dépassant pas les 5°C limitent la fonte. A cela s'ajoute comme nous venons de le voir des pompages particulièrement importants du fait du manque de neige fraîche au sol (60 716 m³ en décembre, dont 60425 m³ pour la neige). Les mois suivants, les prélèvements continuent pour atteindre un volume total de 122 336 m³ fin mars. Les précipitations de janvier à mars n'étant pas plus importantes (un total de 168.5 mm) et les températures n'excèdent pas les 5°C (jusqu'à -10°C en janvier), ni la fonte ni les précipitations ne permettent la recharge du lac. Ainsi, au mois de mars le lac est particulièrement sensible aux prélèvements et accuse une baisse de 1.28 m sur le mois (pour un prélèvement mensuel de 21 771 m³ pour l'eau potable uniquement).

Pour la saison 2011-2012, les prélèvements sur le mois de décembre sont moins importants (27 132 m³). Il en est de même pour les prélèvements totaux de décembre à mars (100 097 m³), légèrement moins importants que ceux de 2010-2011. Pourtant, la baisse du niveau du lac est moins marquée en cette saison. Là encore les facteurs climatiques jouent un rôle important. Le niveau du lac atteint quasiment le trop-plein en début de saison (13.17 m sur les derniers jours de décembre), rechargé par les précipitations importantes (447.9 mm de pluies cumulées sur le mois de décembre). Le facteur de fonte ne permet pas d'expliquer la recharge du lac car les températures sont comprises entre -5°C et 5°C sur l'ensemble du mois. En fin de saison, le cumul des précipitations (687.5 mm de décembre à mars) a permis un réapprovisionnement du lac et ainsi a limité la baisse du niveau. En effet, à la fin mars, le lac dépasse même le niveau du trop-plein (31 mars, 13.21 m).

4.2.3.2 Les variations journalières du lac

C'est à l'échelle journalière qu'il sera plus aisé de constater un lien entre ces pompages et le niveau du lac. A l'échelle journalière, on peut remarquer que presque à chaque pompage important se répercute une baisse du niveau du lac (Fig. 124). Pour la saison 2010-2011, un certain nombre de jours ont connu des pompages importants : le 27 décembre, 3735 m³ ont été pompés, entraînant une baisse du niveau du lac de 0,37 m en une journée. Le 24 janvier, 10 114 m³ ont été prélevés, engendrant une baisse de 0,66 m en 3 jours. Pour la saison 2011-2012, le constat est le même : chaque pompage important entraîne une baisse du niveau du lac, ainsi 2300 m³ ont été pompés le 6 décembre, le niveau ayant baissé durant cette même journée de 0,18 m, le 16 janvier, 2784 m³ d'eau ont été prélevés, engendrant cette fois-ci une baisse de 0,24 m du lac.

Figure. 124 Les prélèvements et les variations journalières du niveau du lac pour les mois de janvier 2011 et 2012. (D'après les données de la SERMA et de la Lyonnaise des Eaux).

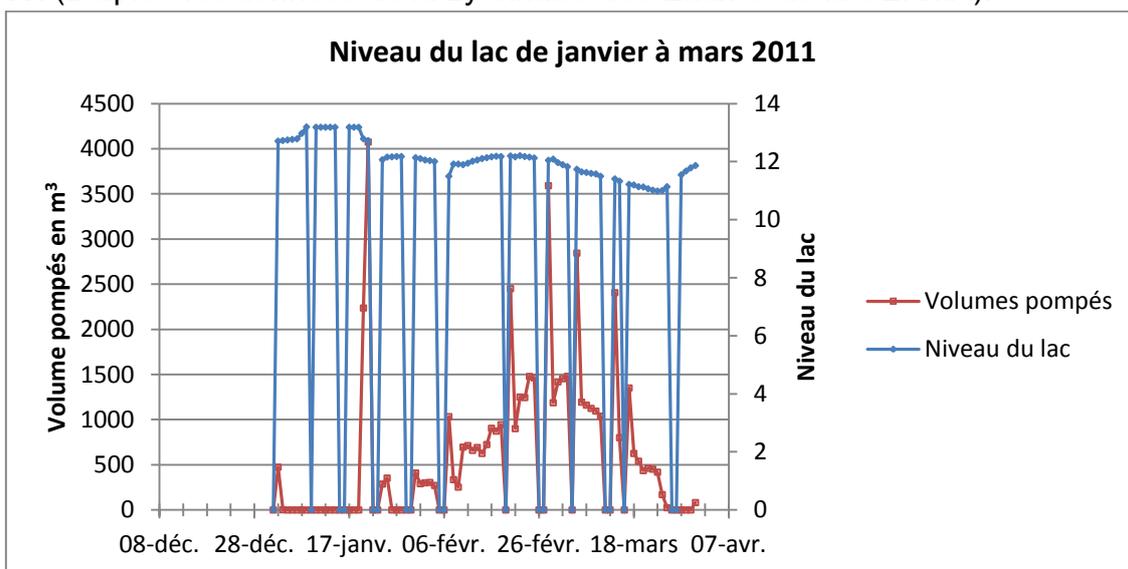


4.2.3.3 Variations du niveau du lac

Finalement, plus que l'impact d'un pompage sur une journée, c'est l'accumulation des pompages qui serait véritablement responsable de la baisse du niveau du lac. En effet, des pompages successifs durant les mois de décembre, janvier et février 2010-2011 ont entraîné une baisse du niveau du lac au mois de mars de 2,23 m (valeur mesurée depuis le 12 novembre correspondant à la plus grande hauteur atteinte par le lac avant le début des pompages, jusqu'au 23 mars, date de l'arrêt des pompages) (Fig. 125). Pour 2011-2012, la baisse est moins marquée puisqu'elle a

été de 0,26 m entre le début de saison (28 octobre, hauteur la plus importante mesurée dans le lac) et l'arrêt des pompages le 13 mars. La différence des volumes pompés en 2010-2011 (160 889 m³), dont 115 215 m³ pour la neige, contre 105 967 m³ en 2011-2012, dont 34 884 m³ pour la neige, ne peut expliquer à elle seule la différence importante de la baisse du niveau du lac.

Figure. 125 La variation du niveau du lac et des prélèvements de janvier à mars 2011. (D'après les données de la Lyonnaise des Eaux et de la SERMA).

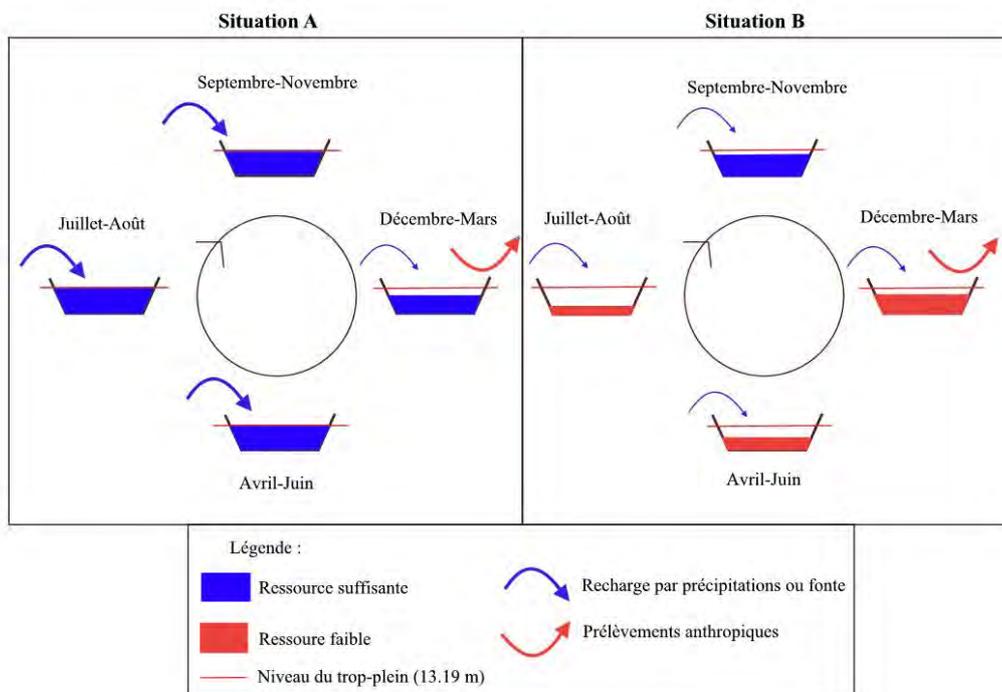


Les prélèvements pour la production de neige ne sont pas seuls responsables de la baisse du niveau du lac. Même s'il semble évident que plus il y a de production de neige, plus le niveau du lac connaîtra une baisse significative, elle ne peut cependant pas expliquer à elle seule cette baisse. C'est véritablement l'accumulation des pompages, pour la production de neige et la production d'eau potable, et la succession de ces pompages dans le temps qui expliquent la baisse de la hauteur d'eau du lac. On peut donc parler d'un marnage du lac en fonction des prélèvements. Ce terme exprime l'idée d'un battement plus ou moins rythmique du niveau du lac. Il a été utilisé pour la première fois par Pierre Paccard (P. Paccard, 2011). Cependant au regard de l'ensemble du volume du lac et du niveau du lac, la fluctuation de celui-ci reste relativement faible puisqu'elle ne dépasse pas 2,5 m sur l'ensemble d'une saison. Le lac se réapprovisionne très rapidement grâce aux apports des divers cours d'eau du bassin versant. En effet, en fin de saison, quelques jours après l'arrêt des pompages, le lac a retrouvé son niveau initial de 13,19 m (trop-plein). En effet dès le mois d'avril, lorsque les températures augmentent, la fonte du manteau neigeux engendre en parallèle une élévation du niveau du lac.

Finalement, plusieurs facteurs entrent en compte pour expliquer la variation du niveau du lac, les facteurs naturels climatiques et les facteurs anthropiques. Le risque de pénurie ne concerne finalement que les années où une accumulation de facteurs entraîne une baisse du niveau du lac. Ainsi lorsque plusieurs conditions sont

réunies la ressource du lac diminue fortement (Fig. 126) : des précipitations faibles en début de saison et au cours de l'hiver, un niveau du lac déjà bas, des prélèvements importants dès le mois de décembre. C'est lorsque tous ces facteurs se conjuguent que le risque de pénurie existe (saison 2010-2011). Ce risque de pénurie est présent à la fois en saison d'hiver, où un conflit entre la production de neige et la production d'eau potable est possible (Situation B). Si les précipitations restent faibles au printemps et en été, empêchant la recharge du lac, le risque de pénurie concerne alors également la saison d'été. Cela serait peu problématique à Avoriaz puisqu'aucun prélèvement n'est effectué dans le lac en saison estivale. En revanche, le niveau du lac reste alors très bas à l'automne et très probablement en début d'hiver suivant, même dans l'hypothèse de précipitations importantes, ce qui ne serait pas sans conséquences sur les usages. La priorité, rappelons-le, sera toujours donnée à la production d'eau potable (confirmation orale des directeurs de la Lyonnaise des Eaux Chablais) et les acteurs de la Lyonnaise des Eaux et de la SERMA semblent s'accorder sur la gestion de la ressource. Le terme de « conflits » n'est de ce fait peut-être pas adapté à ce contexte. Il serait préférable de parler de rivalité ou de concurrence autour de la ressource. A ce jour, en termes d'impact sur le volume global de la ressource du lac 1730, les prélèvements pour l'enneigement artificiel et la production d'eau potable entraînent une légère variation du niveau du lac sans conséquences sur les usages et sur le volume de la ressource. Aujourd'hui, dans les conditions actuelles de production de neige et de consommation d'eau potable, les risques de pénurie et de rivalité sont très limités.

Figure. 126 Le marnage du lac et les situations à risque.



La taille des flèches indique la variation de l'intensité des recharges ou des prélèvements. La situation A correspondrait à une année où le risque de pénurie semble limité. La situation B représente à l'inverse une année à risque.

Le risque de pénurie semble beaucoup plus présent dans les stations prélevant directement dans les cours d'eau et les lacs naturels comme à Champéry. En effet, l'absence de bassin de stockage, et donc, indirectement, d'accord entre les différents utilisateurs, rend la gestion de la ressource plus compliquée, aggravant ainsi le risque de pénurie d'eau. Mais les stations comme Champéry ont compris l'enjeu de gérer la ressource et projettent de construire des retenues collinaires. Le risque est finalement induit par le manque de connaissances en termes de volume de prélèvements. Il n'existe aucun relevé et aucun suivi des prélèvements d'eau pour la production de neige dans la station de Champéry. De ce fait, il n'a pas été possible de quantifier cet usage et d'évaluer véritablement les risques. Le manque de diffusion de données concerne également la France. En effet, même si les volumes d'eau consommés et les volumes de neige produits sont connus à l'échelle locale par les gestionnaires de l'approvisionnement en eau potable (comme la Lyonnaise des Eaux à Avoriaz) et les sociétés de remontées mécaniques, à l'échelle du Département ou de la Région, les services de l'Etat ou bien encore l'Agence de l'eau ne connaissent pas le détail des chiffres. Ce manque de diffusion des données peut altérer la vision globale de la gestion de la ressource à long terme, comme le souligne P. Paccard. (Paccard, 2010). De plus la quantification de l'ensemble des besoins sur l'ensemble des usagers est très difficile, tout comme la quantification de la ressource disponible pour laquelle des données et des mesures manquent indéniablement. Pourtant toutes ces informations sont indispensables à une bonne gestion de la ressource.

Conclusion chapitre 4

Dans un premier temps, nous avons fait un point sur la situation actuelle de la production de neige et des prélèvements d'eau à l'échelle des deux pays étudiés, la France et la Suisse. Et nous avons défini les risques futurs liés à cet usage.

Toutes les études et les données obtenues pour les deux stations d'étude confirment la croissance de la production de neige et des prélèvements d'eau associés ces dernières années. Cette tendance devrait continuer dans les années à venir avec deux objectifs pour les stations, pallier aux variabilités climatiques et à l'usure du manteau neigeux qui devrait s'accroître du fait de l'augmentation de l'offre touristique. En effet, la station d'Avoriaz est un très bon exemple de la tendance actuelle des stations à se développer en termes d'offre d'activité et de capacité de logement touristique. La station d'Avoriaz va ainsi doubler le nombre de lits touristiques d'ici 2014. Elle propose aussi de nombreuses activités comme l'Aquariaz et des spas de luxe. Cette augmentation de l'offre touristique et de la fréquentation s'accompagne d'une croissance importante de la consommation d'eau à l'échelle de la station. Dans les années à venir, cela devrait peser sur la ressource globale en eau à l'échelle de petits bassins versants de montagne associés aux stations.

Cette augmentation des prélèvements pour la production de neige s'accompagne également d'un changement des modes de prélèvement. Si il y a quelques années en France, les prélèvements s'effectuaient essentiellement dans les cours d'eau et les lacs, ce mode est aujourd'hui délaissé au profit de la construction de retenues collinaires. C'est en 2013 le principal mode d'approvisionnement des canons. En Suisse, l'approvisionnement est encore effectué par captage des cours d'eau et pompages dans les lacs. Mais les choses changent et de nombreux projets de construction de retenues collinaires sont en cours. En Savoie et Haute-Savoie, de nombreux accords sont établis entre les gestionnaires de centrales hydroélectriques et les sociétés de remontées mécaniques. Ces accords autorisent les prélèvements dans les retenues des barrages. Cette pratique est particulièrement bien encadrée. Enfin, le partage d'une ressource d'eau potable est moins répandu. Cette technique peut parfois être à l'origine de pénurie d'eau et de coupure d'alimentation en eau potable (Les Gets, 2007). De ce fait une séparation de ces deux usages est recommandée dès que possible.

Dans un second temps, nous avons éprouvé les hypothèses de départ et proposé des solutions concrètes pour améliorer le système actuel et en particulier la gestion de la ressource en eau.

Les recherches menées sur les deux stations étudiées nous ont montré qu'un certain nombre de choses pouvaient être améliorées, d'un point de vue réglementaire, d'un point de vue de la production de neige et d'un point de vue de la gestion de l'eau. Ces propositions s'appuient sur des exemples concrets de Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux et d'un schéma régional climat air et énergie. Ces modèles portent sur trois axes majeurs :

- Renforcer le cadre de la pratique à l'échelle locale et régionale

- Améliorer la production de neige en limitant la surproduction
- Coordonner les besoins et les usages en améliorant la communication

Certains de ces schémas ont déjà fait leurs preuves. Cette échelle du bassin semble être la plus adaptée à la gestion des ressources en eau.

A l'échelle locale des stations, des initiatives locales ont également vu le jour. Les communes et les sociétés de remontées mécaniques sont souvent à l'origine de ces initiatives, mais nous n'avons pas le recul et les données suffisantes pour en évaluer l'efficacité. A l'échelle locale, ces initiatives ont deux objectifs :

- Limiter la production de neige et la surconsommation d'eau en établissant des priorités
- Améliorer les modes de prélèvements en privilégiant les retenues collinaires.

Dans la continuité de ces initiatives, les propositions que nous avons faites ont pour objectif d'améliorer les systèmes de production de neige, de limiter la consommation d'eau et de mieux gérer le partage de la ressource. Il nous apparaît essentiel pour cela d'améliorer la communication entre les différents acteurs à l'échelle locale mais aussi le partage d'informations entre les différentes structures administratives à l'échelle régionale voire nationale.

La production de neige est aujourd'hui devenue indispensable dans le cadre économique des stations. Il est donc important de sortir d'un débat pour ou contre la neige artificielle. Car la production de neige n'est pas un problème en soi mais l'utilisation qui en est faite peut devenir problématique dans certaines situations. Il est donc indispensable de mettre en place dès aujourd'hui des démarches constructives et réalistes qui tiennent compte des paramètres naturels du milieu, des données environnementales, des aspects économiques et des moyens techniques.

CHAPITRE 5. LES IMPACTS HYDROLOGIQUES LIES A L'UTILISATION DE L'ENNEIGEMENT ARTIFICIEL

Introduction Chapitre 5

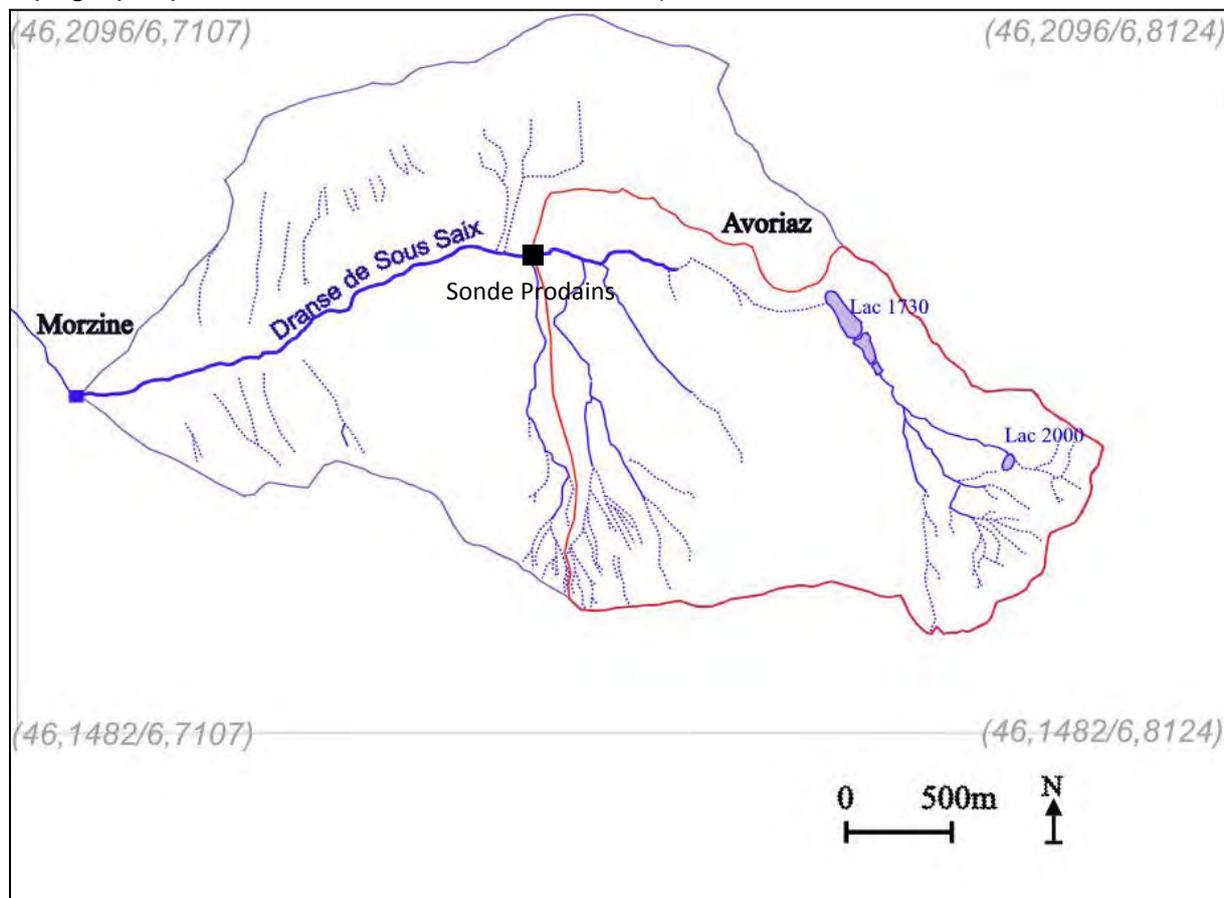
L'augmentation des besoins en eau des hauts-bassins oblige à s'interroger sur le partage de l'eau disponible en amont des bassins et sur la disponibilité des ressources pour l'aval. La méthodologie consiste à définir l'impact des usages de l'eau dans une station de moyenne montagne, Avoriaz, sur l'hydrosystème d'un bassin versant, la Dranse de Sous-Saix, c'est-à-dire, définir les débits, les régimes hydrologiques et les éléments naturels (climat...) et anthropiques qui agissent sur l'hydrosystème. Le cas particulier de la station d'Avoriaz est intéressant à double titre. D'une part, la production de neige y est particulièrement développée, car située au cœur du domaine skiable, elle est un lieu de passage des skieurs qui relie les différentes parties du domaine des Portes du Soleil. De plus, la station, dite skis aux pieds, limite la circulation aux skieurs et piétons. La garantie d'un bon enneigement est donc indispensable. D'autre part, l'approvisionnement en neige d'une partie du domaine skiable s'effectue par prélèvements dans le lac 1730, ce même lac qui permet lorsqu'un certain niveau est atteint, d'alimenter les écoulements de la Dranse de Sous-Saix à l'aval. Ainsi, ce fonctionnement de bassin tampon est quasi unique en France et en fait un site d'étude privilégié.

Pour évaluer ces impacts sur l'hydrosystème, la zone d'étude correspond au bassin versant de Chavanette alimentant le lac 1730 et jusqu'à l'exutoire du lac au niveau des Prodains où une sonde hydrologique a été installée (Fig. 127). Pour éviter les confusions avec la zone d'alimentation du lac, nous appellerons ce bassin d'étude « Prodains ». Cette sonde se localise à l'aval de la station d'Avoriaz au pied de l'exutoire du lac 1730, à proximité du téléphérique. Pour cette étude, les données se réfèrent donc au sous-bassin versant des Prodains dont la superficie calculée est de 11 km² (Fig. 128).

Figure. 127 Sonde des Prodains à l'aval de la station d'Avoriaz. (Cliché : 1^{er} Septembre 2011. E Magnier).



Figure. 128 Délimitation du sous bassin versant des Prodains. (D'après la carte topographique IGN de Morzine au 1/25000^{ème}).



Un premier temps sera consacré à quantifier le poids de la production de neige mais aussi de la production d'eau potable sur les volumes entrants et sortants de ce bassin versant. Cela permettra d'évaluer les implications de ces usages sur la ressource globale en eau du bassin versant et plus spécifiquement sur les écoulements de la Dranse de Sous-Saix et son régime hydrologique. Cette étude porte sur deux années de mesures 2010-2011 (septembre à août) et 2011-2012 (septembre à juin). L'arrêt de la sonde (panne matérielle) le 18 juillet 2012 nous a contraint à limiter l'exploitation des mesures de cette dernière année sur une période de 10 mois. Puis, dans un second temps, à l'échelle des bassins versants plus vastes des Dranses, nous évaluerons l'implication des usages en amont d'un bassin sur les activités à l'aval. Dans ce bassin des Dranses, les activités sont très variées, production hydroélectrique, eau potable, activités de loisirs, activités économiques...

5.1 ESTIMATION DES PRELEVEMENTS SUR LES ENTREES ET LES SORTIES DANS LE BASSIN VERSANT DES PRODAINS

5.1.1 Les volumes d'eau mis en jeu dans le sous bassin versant des Prodains

Une première approximation des volumes d'eau mis en jeu sur le bassin versant peut être établie en comparant les volumes entrants et les volumes sortants en amont de la station de mesure des Prodains mise en place dans le cours de la Dranse de Sous-Saix :

Les volumes entrants correspondent :

- Aux données journalières de précipitations (en mm) fournies par les relevés Météo France de la station des Gets (altitude 1172 m, station la plus proche du bassin versant d'étude).

- Ces valeurs ont ensuite été pondérées en fonction du gradient altitudinal des précipitations. Il faut bien évidemment tenir compte du fait que celles-ci se font sous forme neigeuse à partir d'une certaine altitude. Mais pour faciliter la lecture de nos résultats, nous ne prendrons en compte que les volumes globaux de précipitations par altitude. Ce gradient ainsi calculé reste très approximatif, car sur la base d'un gradient établi à plusieurs kilomètres de la zone d'étude. Pour davantage de précision il aurait fallu appliquer plusieurs gradients calculés à partir des valeurs de différentes stations.

Il est particulièrement intéressant pour évaluer le volume global de la ressource entrant dans le bassin versant de pondérer les valeurs de précipitations annuelles mesurées à 1172 m (station des Gets) en fonction de l'altitude. Les gradients de précipitations ont été calculés sur la base du gradient altitudinal de Schoeneich (1995) entre la station d'Aigle (381 m) et celle des Diablerets (1162 m) (83 mm/100 m). L'auteur calcule les gradients de précipitations sur la base des moyennes annuelles 1981-1990 de 17 stations pluviométriques. Il est évident que la régionalisation des mesures est impossible en raison du trop petit nombre de stations météorologiques sur notre secteur. En effet, il n'existe qu'une seule station aux relevés complets de précipitations et située sur la zone d'étude (station des Gets). De plus il faut rappeler que les valeurs de précipitations mesurées sont souvent erronées (précipitations neigeuses qui peuvent ne pas être toutes captées par le pluviomètre, déplacement par le vent). Pour le Valais, la sous-évaluation moyenne est de 35 % (Sevruk, 1997). De ce fait, la quantification des précipitations par plage d'altitude sera évaluée grossièrement sur la base de ce gradient altitudinal. Plusieurs auteurs ont proposé des gradients de précipitations pour les vallées alpines et notamment la région du Valais et du Chablais (Bouët, 1950 ; Uttinger, 1951 ; Schoeneich, 1995 et Baumgartner et al., 1983 in Reynard, 2000a). On constate de grandes différences entre ces gradients. Bouët (1950) propose pour la période 1901-1940, une série de gradients entre 500 et 2000 mètres d'altitude. Entre la station

d'Avançon (430 m) et celle de Grande eau (1350 m), les plus proches de notre bassin versant, le gradient est de 60 mm/100 m. Baumgartner et al. (1983) proposent un gradient pour la chaîne alpine de 57 mm par 100 m d'élévation. Pour le Valais, il est de 87 mm/100 m (Reynard, 2000a). Ces différences de valeurs de gradients s'expliquent par la variation des précipitations en fonction de la topographie (versant au vent et sous le vent), l'altitude, la direction des courants dominants (Reynard, 2000a). De ce fait, ces valeurs varient fortement d'une vallée à une autre (Castellani, 1986). D'après une étude sur la régionalisation des précipitations par méthode de régression linéaire réalisée par Castellani (1986), en fonction des gradients utilisés, les valeurs de précipitations peuvent varier de presque 200 mm. Cette méthode est fondée sur un découpage des Alpes françaises en 7 échantillons (échantillon E pour le Chablais) pour lesquels un gradient est attribué. Mais nous n'avons pas fait le choix de garder ce gradient, car la zone échantillonnée (E) est particulièrement vaste (de la frontière suisse à l'Isère) englobant un nombre important de vallées. Or comme le précise l'étude, les différences entre vallées sont importantes. D'après les premiers calculs réalisés à partir de ce gradient (61 mm / 100 m), le volume d'eau entrant dans notre bassin versant était estimé à 18 millions de m³ (soit une différence de 10 % avec la valeur obtenue pour le gradient de Schoeneich (1995)). Le gradient altitudinal de précipitations retenu pour l'étude est donc de **83 mm/ 100 m**.

- Ces gradients altitudinaux de précipitations ont ensuite été transformés en volumes d'eau par plages d'altitude, calculés d'après les superficies du bassin versant tous les 100 m.

- Enfin, une valeur globale du volume entrant a été calculée afin de définir le poids des prélèvements sur les entrées et la mise en comparaison des volumes transitant par le bassin versant.

Ces valeurs de précipitations et de volumes entrants se fondent sur les mesures de la station météorologique des Gets, qui ne se localise pas dans le bassin versant des Prodains. Ces mesures peuvent donc varier légèrement dans notre bassin d'étude. Elles ont donc ici une valeur purement qualitative et doivent être considérées en fonction de ces contraintes.

Les volumes sortants ont été calculés de la manière suivante :

- Sur la base des mesures horaires de la sonde hydrologique des Prodains (mesures de hauteur et de pression) et de jaugeages ponctuels au sel (Cf. chapitre méthodologie), ces mesures ont ensuite été calculées à partir de la fonction de la courbe de tarage ($y=1070.8x-84,56$), ce qui nous a permis d'obtenir une valeur de débit horaire sur la période de septembre 2010 à juin 2012.

Cette méthodologie se heurte cependant au manque de mesures de débits (deux années, dont une incomplète) et aux erreurs possibles de débits calculés. En effet, en l'absence de mesures en période d'étiage, la courbe de tarage a dû être extrapolée vers le bas. Les débits calculés sont donc certainement surestimés. Les

résultats avancés ci-après doivent être, de ce fait, appréhendés en considération de ces incertitudes.

- Ces débits (en m³/s) ainsi calculés au droit de la sonde des Prodains ont ensuite été transformés en volume d'eau global sortant du bassin versant, de l'échelle de la journée à l'échelle d'une année.

5.1.1.1 Entrée et sortie à l'échelle de l'année

Nous avons choisi de prendre l'année 2010-2011 (seule année complète de mesures) pour comparer les volumes entrants et sortants du bassin versant des Prodains.

Les volumes de précipitations entrants pondérés en fonction des altitudes nous donnent les valeurs de volumes suivantes (Tab. 4):

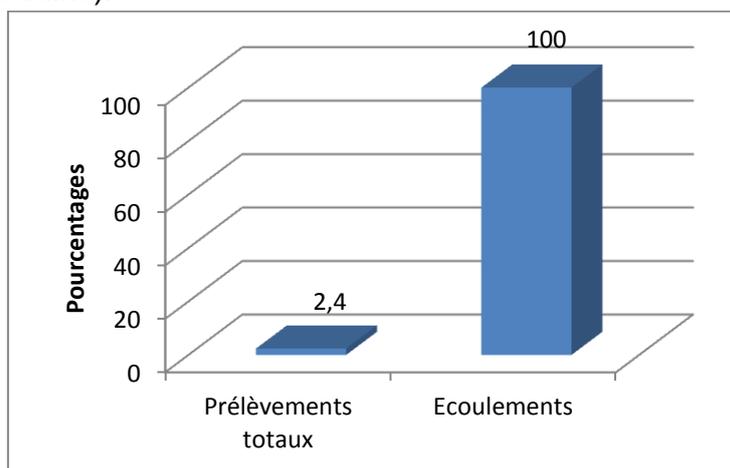
Tab. 4 Les volumes d'eau précipités en fonction des gradients altitudinaux. (D'après le gradient proposé par Schoeneich, 1995).

2010-2011	de octobre à septembre			
Altitude	Superficie du bassin versant en m ²	Gradient pluviométrique	Précipitations en mm	Précipitations moy annuelles pondérées en mm
Supérieur à 2400	31250	83	1379,6	2458,6
2400-2300	46875	83	1379,6	2375,6
2300-2200	593750	83	1379,6	2292,6
2200-2100	1000000	83	1379,6	2209,6
2100-2000	1390625	83	1379,6	2126,6
2000-1900	1437500	83	1379,6	2043,6
1900-1800	1312500	83	1379,6	1960,6
1800-1700	2046875	83	1379,6	1877,6
1700-1600	531250	83	1379,6	1794,6
1600-1500	484375	83	1379,6	1711,6
1500-1400	500000	83	1379,6	1628,6
1400-1300	468750	83	1379,6	1545,6
1300-1200	359375	83	1379,6	1462,6
1200-1100	171875	83	1379,6	1379,6
2011-2012	de octobre à septembre			
Altitude	Superficie du bassin versant	Gradient pluviométrique	Précipitations	Volume des précipitations pondéré
Supérieur à 2400	31250	83	1259,8	2338,8
2400-2300	46875	83	1259,8	2255,8
2300-2200	593750	83	1259,8	2172,8
2200-2100	1000000	83	1259,8	2089,8
2100-2000	1390625	83	1259,8	2006,8
2000-1900	1437500	83	1259,8	1923,8
1900-1800	1312500	83	1259,8	1840,8
1800-1700	2046875	83	1259,8	1757,8
1700-1600	531250	83	1259,8	1674,8
1600-1500	484375	83	1259,8	1591,8
1500-1400	500000	83	1259,8	1508,8
1400-1300	468750	83	1259,8	1425,8
1300-1200	359375	83	1259,8	1342,8
1200-1100	171875	83	1259,8	1259,8

Les volumes sortants ont été calculés sur la base d'un débit moyen annuel de 212,39 l/s. Ainsi, pour l'année 2010-2011 un volume global de 20 155 000 m³ entre sur le bassin versant et un volume de 6 790 000 m³ en ressort en aval de la station. Au regard de ces totaux annuels transitant par le bassin versant, les prélèvements et notamment ceux pour la production de neige peuvent paraître insignifiants (160 913 m³ de prélèvements totaux). En effet, cela correspond pour les

prélèvements totaux à 0,8 % des volumes entrants et 2.4 % des volumes sortants (Fig. 129). Pour 2011-2012 (d'octobre à juin), la part des prélèvements n'excède pas 0.6 % des volumes entrants et 1,5 % des volumes sortants.

Figure. 129 Volumes des prélèvements sur le volume global écoulé dans la Dranse de Sous-Saix à la sonde des Prodains en 2010-2011. (D'après les données de la Lyonnaise des eaux en m³ pour les prélèvements et les mesures réalisées aux Prodains).



La part des prélèvements de neige sur les volumes entrants reste faible (0.6 % en 2010-2011 et 0,2 % d'octobre à juin 2011-2012). Les valeurs sont relativement semblables pour les prélèvements d'eau potable (0.2 % en 2010-2011 et 0,3 % en 2011-2012). Si l'on cherche à définir l'usage de la ressource ayant le plus de poids sur les écoulements de la Dranse, on peut calculer le pourcentage des prélèvements pour chacun des deux grands usages présents sur la station d'Avoriaz (la production de neige et la production d'eau potable) par rapport au volume global des écoulements de la Dranse de Sous-Saix. A l'échelle de l'année 2010-2011, c'est bien la neige de culture qui prélève davantage sur la ressource du lac 1730 (1.7 % contre 0.7 % pour l'eau potable). Il faut rappeler que le lac est un complément pour l'alimentation en eau potable et qu'il ne représente qu'un quart des volumes distribués à l'échelle de la station (311 527 m³). Cependant, cette première observation n'a pas vraiment de sens telle qu'elle est exprimée car les valeurs de prélèvements sont particulièrement faibles et les pompages se répartissent sur les quelques mois d'hiver.

A l'échelle annuelle, les prélèvements totaux (neige artificielle et eau potable) ont un impact limité sur l'hydrosystème.

5.1.1.2 Impacts sur les écoulements à l'échelle mensuelle et journalière

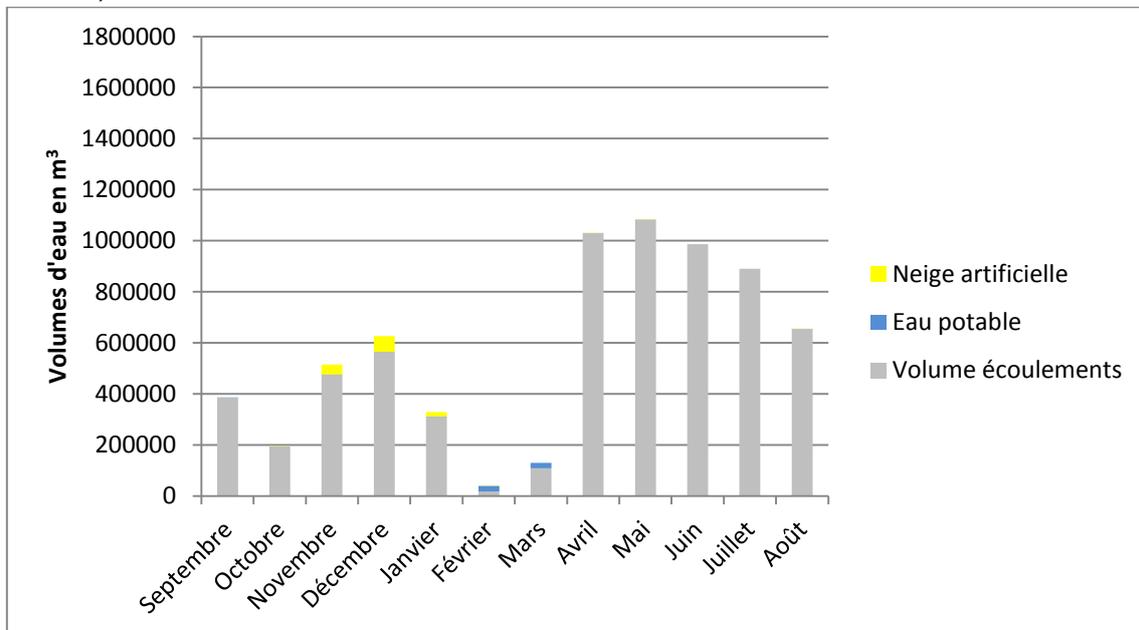
A l'échelle mensuelle, les prélèvements sont là encore relativement faibles et se concentrent sur les mois d'hiver où les débits naturels sont déjà bas. Le graphique de la part des prélèvements sur les écoulements de la Dranse de Sous-Saix

compare les volumes prélevés par l'activité production de neige et l'activité production d'eau potable avec le volume total des écoulements pour chaque mois.

- **Sur la période d'étiage** (de décembre à mars) (Fig. 130) :

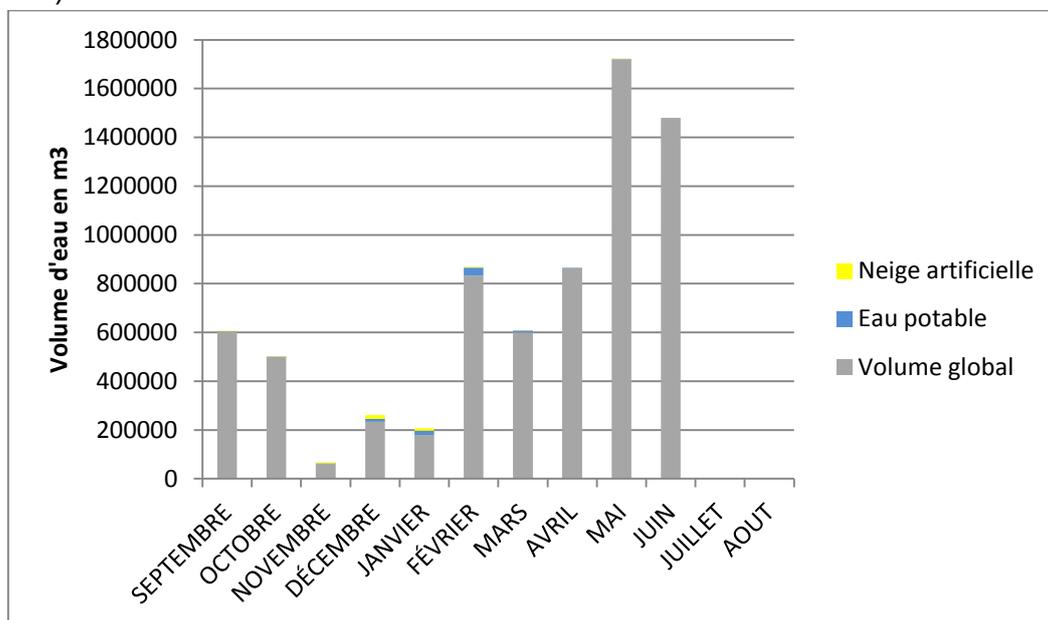
C'est en période d'étiage que les prélèvements pourraient être les plus impactants sur le volume des écoulements. Ainsi, si l'on considère une période d'étiage du 1^{er} décembre 2010 au 31 mars 2011, le débit moyen de la Dranse de Sous-Saix est de 95.75 l/s pour la saison 2010-2011, soit un volume transitant de 1 millions de mètres cube. La part des prélèvements eau potable et neige confondus correspond à 8 % des volumes écoulés.

Figure. 130 Part des prélèvements mensuels sur les écoulements de la Dranse de Sous-Saix à l'échelle de l'année 2010-2011. (D'après les données de la Lyonnaise des eaux pour les volumes prélevés et les mesures de débits aux Prodains).



Pour la saison 2011-2012 (1^{er} décembre au 31 mars) (Fig. 131), le volume d'eau sortant est de 1.2 millions de mètres cube, soit une part des prélèvements de 33 % des volumes sortants.

Figure.131 Part des prélèvements mensuels sur les écoulements de la Dranse de Sous-Saix à l'échelle de l'année 2011-2012. (D'après les données de la Lyonnaise des eaux pour les volumes prélevés et les mesures de débits aux Prodains).



- A l'échelle des mois de décembre, janvier, mars et avril

Pour le mois de décembre 2010, durant lequel les prélèvements sont les plus importants sur la saison 2010-2011, les prélèvements totaux sont de l'ordre de 11 % des écoulements de la Dranse. Au regard de ces résultats, on constate que les prélèvements restent faibles mais non négligeables sur les volumes d'eau transitant dans un petit bassin versant de montagne de moins de 11 km². En décembre 2012, les prélèvements totaux correspondent à 11 % des écoulements.

A l'échelle du mois de janvier 2011, où l'on observe les plus forts pompages pour l'enneigement artificiel, soit 17 838 m³, la part de ces prélèvements sur les volumes sortants du bassin versant reste faible. Le volume sortant est de 310 500 m³ et correspond quant à lui au débit moyen mensuel de la Dranse mesuré au Prodains (115.90 l/s) et rapporté en volume à l'échelle du mois. La part des volumes totaux prélevés sur les volumes sortants est de 6 %. En période de fonte (mois de mars et avril), les prélèvements totaux sont de l'ordre de 1.5 % en mars 2012 ; en avril, ces prélèvements sont toujours inférieurs à 0.03 %.

A l'échelle mensuelle, les résultats semblent assez identiques à ceux de la première année de mesure. En 2010-2011, les volumes prélevés sont particulièrement faibles par rapport aux volumes écoulés (Fig. 130). Cependant, sur la période de septembre à mars, le poids de ces prélèvements augmente par rapport aux écoulements. Cela s'explique par la baisse des débits en période d'étiage. Ainsi, la production de neige prélève pour les mois de novembre, décembre, janvier, respectivement 8 %, 11 % et

5 % des écoulements totaux de la Dranse. L'alimentation en eau potable prélève quand à elle dans le lac 1730 moins de 0,3 % du volume global écoulé pour les mois de décembre et janvier. En revanche ces prélèvements atteignent 126 % du volume écoulé en février. Cela peut s'expliquer par un débit très faible de la Dranse de Sous-Saix (7 l/s) et des prélèvements qui s'effectuent dans le Lac 1730.

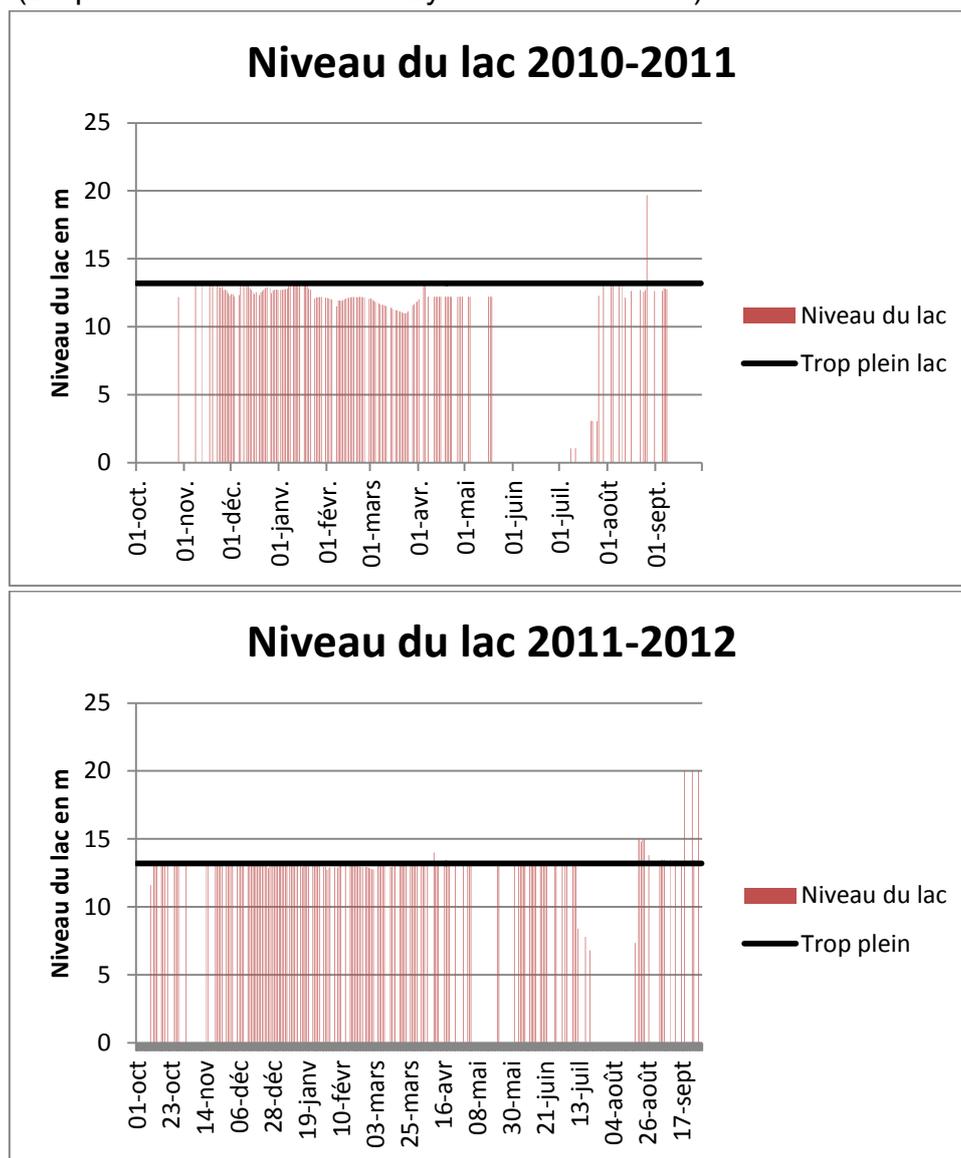
En revanche, en 2011-2012, la tendance s'inverse (Fig. 131). La production de neige étant moins importante, les prélèvements sont de l'ordre de 6 %, 7 % et 6 % pour novembre, décembre et janvier. Les prélèvements pour la production d'eau potable sont quand à eux plus importants (0.7 %, 5 % et 10 % pour novembre, décembre et janvier). Cela s'explique par de plus forts prélèvements pour la production d'eau potable que durant la saison 2010-2011 (augmentation du nombre de logements dans la station et de spa privés).

Au regard de cette première analyse, les prélèvements dans le lac 1730 et plus particulièrement les prélèvements pour la production de neige sont particulièrement faibles mis en comparaison avec les volumes transitant par le bassin versant à l'échelle de l'année. En revanche, à l'échelle des quatre mois d'étiage et au pas de temps mensuel, certains prélèvements atteignent 20 % (exemple mars 2011) des volumes écoulés et ne sont donc pas négligeables.

5.1.2 Le rôle du marnage du lac sur les écoulements

Il est intéressant dans un second temps d'observer le lien direct entre la variation du niveau du lac 1730, induite par les prélèvements anthropiques, la recharge naturelle du lac, et la variation du débit à l'aval. Il faut pour cela rappeler que le trop-plein du lac 1730 joue un rôle important. Il est situé à 13,19 m à partir du fond du lac et nous donne une indication sur les écoulements possibles à l'aval. En effet lorsque le niveau du lac est inférieur à 13,19 m, l'eau ne peut se déverser vers l'aval dans la Dranse de Sous-Saix. Les écoulements y sont donc considérablement réduits et ne dépendent alors que des apports naturels des cours d'eau et résurgences karstiques du bassin versant. Ce deuxième point ne sera pas pris en compte dans l'évaluation des écoulements car il est difficilement quantifiable. Une étude hydrogéologique serait nécessaire pour compléter cette première approche. Les mesures de hauteur d'eau dans le lac sur les 2 années d'étude (2010-2012) sont un bon indicatif des jours de l'année où le lac se déverse vers l'aval (Fig. 132).

Figure. 132 Le niveau du lac et le trop plein à 13,19 m pour les deux années d'étude. (D'après les données de la Lyonnaise des eaux).



Sur la première année d'étude, qui correspond également à la première année de mise en service de la sonde de mesure de la hauteur d'eau du lac, le niveau est supérieur au trop-plein 18 jours entre le 1^{er} novembre et le 1^{er} avril. En fin d'hiver, le niveau du lac a considérablement baissé et n'atteint plus le trop-plein. Les prélèvements du mois de février (126 % des écoulements de la Dranse, soit 22 000 m³ prélevés) entraînent une baisse importante de la hauteur d'eau du lac. Il n'y a donc plus d'écoulement vers l'aval et pourtant un débit de 7 l/s est enregistré par la sonde. Les écoulements de la Dranse sont donc alimentés par divers cours d'eau à l'aval du lac 1730. Cela nous est confirmé pour le mois de mars, avec des prélèvements de l'ordre de 22 000 m³ et un débit de la Dranse de 40 l/s (soit des prélèvements correspondants à 20 % des écoulements). Dès le printemps, le Lac est entièrement vidangé pour nettoyage et réparation de la bache étanche. Puis, suite à

une phase de remplissage fin juillet, le niveau du lac dépasse à nouveau 13,19 m dès le 8 août.

Sur l'année 2011-2012, le niveau égale ou dépasse les 13,19 m, durant 36 jours entre le 1^{er} novembre et le 1^{er} avril. Cela se vérifie par un niveau du lac qui fluctue moins pendant la saison et dont la baisse est nettement moins importante en fin de saison. Mais il convient maintenant d'observer la réponse de cette variation du niveau sur les écoulements à l'aval.

5.2 IMPACTS SUR LE REGIME HYDROLOGIQUE DE LA DRANSE DE SOUS-SAIX

Il faut maintenant ajouter à ces informations les débits mesurés à la sonde des Prodains en aval de la station d'Avoriaz. En comparant les données climatiques (précipitations et températures) fournies par Météo France pour la station de mesure des Gets, les prélèvements totaux et les prélèvements pour l'enneigement ainsi que les débits mesurés à la sonde des Prodains, il est possible d'évaluer l'impact de la production de neige et de manière générale des prélèvements dans le lac 1730 sur le volume des écoulements à l'aval dans la Dranse de Sous-Saix.

Si l'on regarde le volume des prélèvements sur l'année 2010-2011 mis en lien avec le volume global des écoulements, celui-ci ne représente qu'une infime partie, soit 2,4 % des écoulements totaux. Que ce soit à l'échelle mensuelle ou à l'échelle annuelle, les prélèvements sur la station d'Avoriaz ne peuvent avoir qu'un impact très limité voire nul sur les écoulements de la Dranse de Sous-Saix en aval. Mais comme nous l'avons précisé précédemment, les prélèvements, que ce soit pour la production d'eau potable ou la production de neige, ne s'effectuent pas directement dans les écoulements de surface mais par le biais du lac 1730. Et c'est également ce lac qui détermine en partie les périodes d'écoulement et les volumes écoulés à l'aval. En corrélant les informations du climat (précipitations, précipitations neigeuses, températures), les données de débit et celles de la hauteur d'eau du lac, il est possible d'établir le lien entre les prélèvements et la variation du débit. Cependant, il n'est pas possible de quantifier la part des écoulements de la Dranse provenant du lac et celle provenant de l'alimentation des petits cours d'eau tributaires. Pour ce faire, d'autres stations de mesures auraient été nécessaires sur chaque affluent ce qui aurait été particulièrement complexe. En effet, on se trouve ici en tête de bassin versant, les écoulements alimentant la Dranse de Sous-Saix sont tous des écoulements intermittents. Il faut également rappeler que le trop-plein du lac conditionne une partie des écoulements de la Dranse de Sous-Saix. Car, lorsque le niveau du lac dépasse 13.19 m (trop-plein), l'eau stockée dans le lac s'écoule vers la Dranse. A l'inverse, lorsque le niveau est inférieur à cette hauteur, il n'y a pas d'écoulement en direction de la Dranse de Sous-Saix.

5.2.1 Description du régime hydrologique

Rappelons que le régime hydrologique naturel de la Dranse de Sous-Saix est un régime nival de montagne caractérisé par une période d'étiage hivernal du fait des températures négatives et des précipitations sous forme neigeuse, une première période de hautes eaux au printemps lors de la fonte du stock neigeux et une seconde période de hautes eaux en fin d'été induite par les orages estivaux. Malheureusement, aucune mesure de débit n'a été effectuée avant notre étude, nous permettant de comparer de manière précise les débits avant et après aménagements.

Lorsque l'on observe la courbe du débit de la Dranse de Sous-Saix pour 2010-2011, on constate qu'il y a une première période d'étiage très marquée de fin février à mi avril (absence d'écoulement du 13 février au 16 mars) (Fig. 133). Une deuxième période (11 et 12 juillet) où les écoulements sont inexistant est identifiable à la mi-juillet. Cette seconde période est très brève mais très marquée. Le débit augmente au printemps lors de la fonte et reste important en été. Pour comprendre la variation du débit il faut comparer deux paramètres :

- Les données climatiques (précipitations et températures)
- Les volumes prélevés et la variation du niveau du lac.

Si l'on compare toutes ces informations aux données climatiques mesurées à la station MétéoFrance des Gets, on remarque que ces périodes de basses eaux ne peuvent s'expliquer uniquement par des phénomènes climatiques (Fig. 135 et Fig. 136.).

Figure. 133 Le débit de la Dranse de Sous-Saix pour l'année 2010-2011. (D'après les données de la sonde aux Prodains).

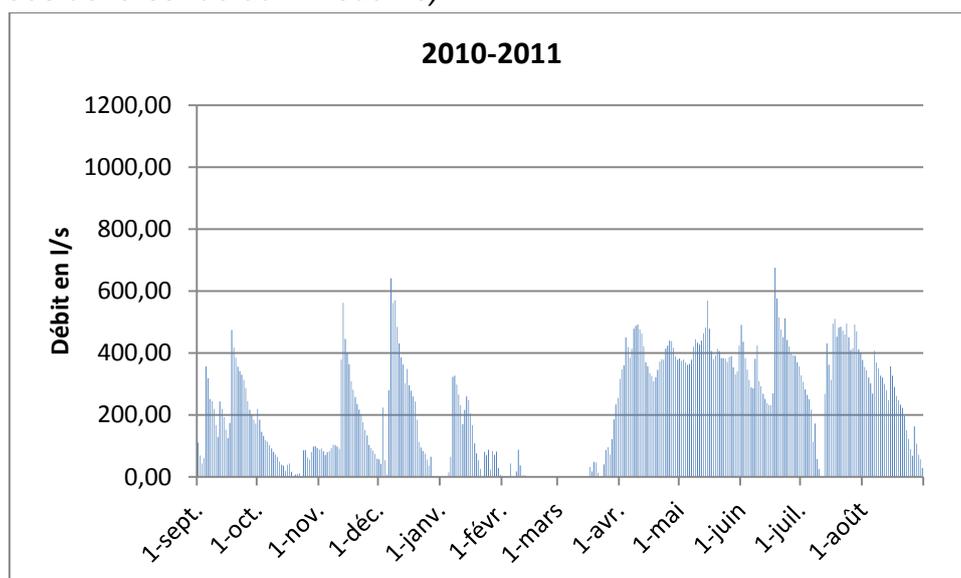
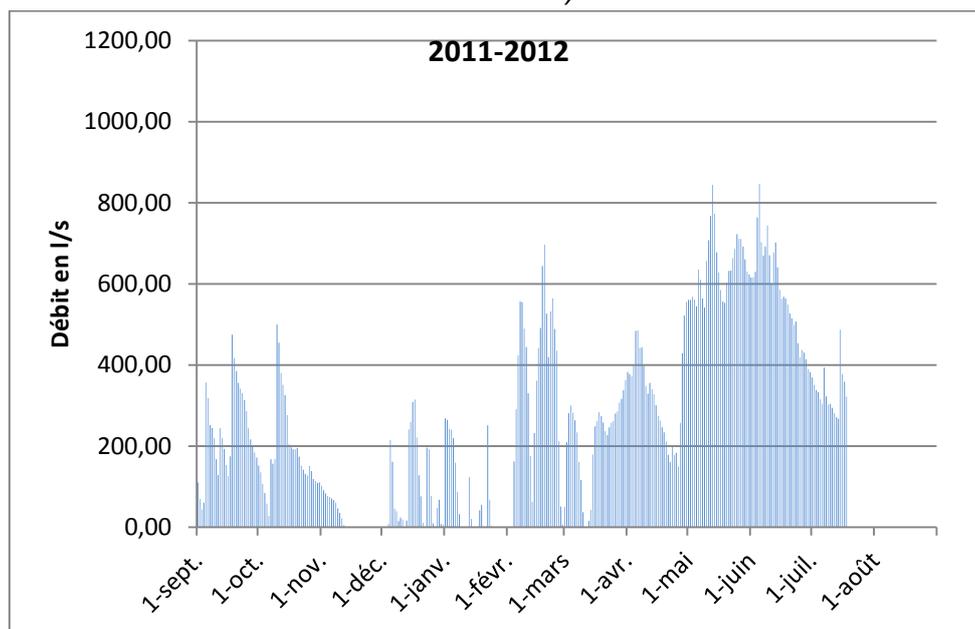


Figure. 134. Le débit de la Dranse de Sous-Saix pour l'année 2011-2012.
(D'après les données de la sonde aux Prodains).



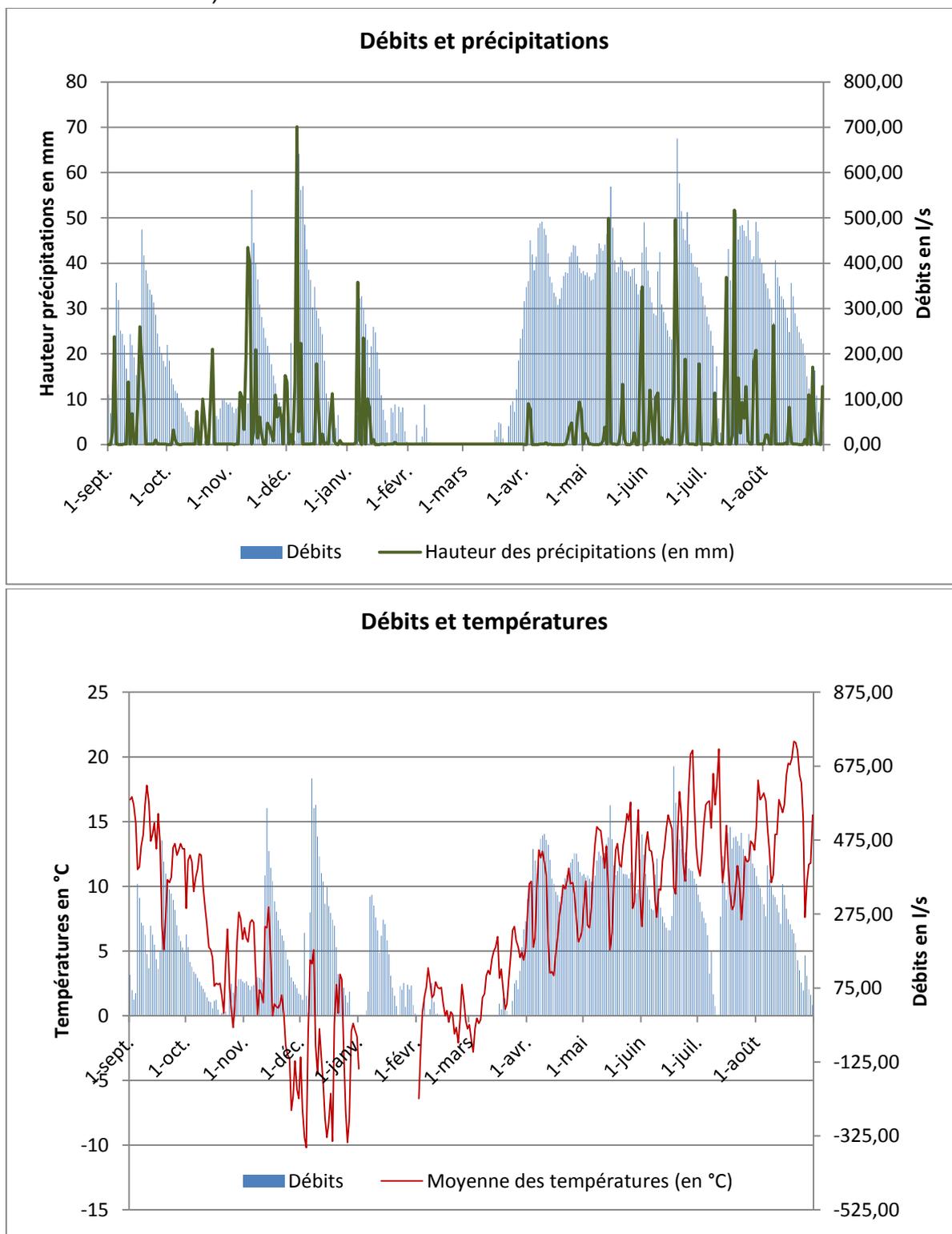
5.2.2 Analyse du débit pour 2010-2011

En début d'hiver (décembre, janvier), les débits moyens journaliers sont particulièrement élevés (supérieurs à 200 l/s). Cette hausse du débit en décembre (jusqu'à 641 l/s le 7 décembre) et une seconde hausse jusqu'au 19 janvier (avec des valeurs journalières supérieures à 250 l/s) peuvent s'expliquer en partie par des facteurs climatiques. En effet, en décembre cette augmentation du débit fait suite à de fortes précipitations (plus de 140 mm sur les 8 jours précédents la hausse du débit (du 30 novembre au 7 décembre)), associées à un redoux à partir du 6 décembre (environ 5° C). Le débit passe alors de 40 l/s ces premiers jours de décembre à 641 l/s le 7 décembre). Pour le mois de janvier, la hausse du débit est moins marquée puisque celui-ci est en moyenne de 240 l/s (du 7 au 18 janvier). Les précipitations sont de l'ordre de 37 mm les 3 jours précédents la hausse. Sur cette même période de 12 jours les précipitations totales sont de 80 mm. En revanche, l'absence de mesure de températures relevées par la sonde MétéoFrance des Gets, ne nous permet pas d'expliquer cette hausse.

Lors de la première période de basses eaux de fin février à mi-avril, les précipitations sont relativement faibles (moins de 10 mm par jour) mais les températures en hausse, supérieures à 0°C et atteignant même les 12°C en avril auraient dû entraîner la fonte du stock neigeux et par conséquent une hausse du débit de la Dranse (Fig. 135). Lors de la deuxième période d'étiage, à mi-juillet 2011, les précipitations sont relativement importantes, jusqu'à 50 mm journalier. Le débit reste nul dans la Dranse les jours suivant ces épisodes de pluie. Pour comprendre la variation des

écoulements, il faut ajouter une donnée supplémentaire, celle du marnage du lac 1730.

Figure. 135 Données de températures, de précipitations et de hauteurs de neige pour l'année 2010-2011. (D'après les données de Météo France mesurées à la station des Gets).



Il faut rappeler que les prélèvements pour l'enneigement artificiel n'expliquent pas à eux seuls les variations du niveau du lac. Ce sont bien les prélèvements répétés pour la production de neige et la production d'eau potable qui entraînent un marnage du lac 1730. Pour comprendre l'impact des prélèvements sur les écoulements de la Dranse, il est donc impossible de dissocier ceux pour la production de neige et ceux pour la production d'eau potable. Ainsi, si l'on compare le niveau du lac avec le débit en aval, on constate que pour la première période d'étiage identifiée, le niveau du lac se trouvait sous le trop-plein (Fig. 136). Durant cette période, les écoulements de la Dranse provenaient donc uniquement de l'alimentation directe par les petits cours d'eau affluents. Les précipitations sont relativement faibles en cette période (86.1 mm de précipitations totales du 1^{er} février au 31 mars). Et les températures négatives ou faibles (moins de 5°C) ne permettent pas la fonte du stock neigeux. Cela explique le débit relativement faible ou l'absence de débit dès mi-février.

Les températures augmentent dès le mois de mars entraînant la fonte du stock neigeux. En amont du bassin versant, cette fonte va dans un premier temps alimenter le lac 1730 dont le niveau augmente dès le 23 mars. Le niveau du trop-plein est atteint le 4 avril. Le débit de la Dranse de Sous-Saix augmente alors de manière significative alors que les précipitations sont relativement faibles (moins de 10 mm journalier). La fonte du stock neigeux est très importante et rapide et explique la hausse du débit en cette période. Le débit devrait ensuite diminuer légèrement plus la fonte est avancée. Mais celui-ci reste élevé, soutenu par la vidange du lac; et les apports naturels de la fonte et des précipitations durant la phase de vidange du 19 mai au 16 juin. En effet pour des raisons d'entretien, dues au remplacement de la bâche étanche au fond du lac, le lac 1730 a été entièrement vidangé (Fig. 137).

Lors de la seconde période d'étiage à la mi-juillet, le niveau du lac est à 0 et y reste jusqu'au 7 juillet. Puis, suite aux réparations, le lac est en phase de remplissage dès le 8 juillet jusqu'au 8 août où le lac atteint à nouveau le trop-plein. Or, le débit de la Dranse reste important durant cette même période, plus de 300 l/s par jour, excepté les 11 et 12 juillet. Ce débit est donc exclusivement alimenté par les apports naturels (précipitations les jours précédents). Les apports naturels sont donc dominants au printemps et en été et l'impact du lac 1730 reste faible sur les écoulements.

Figure. 136 Niveau du lac 1730 et débits de la Dranse de Sous-Saix pour l'année 2010-2011. (D'après les données de la Lyonnaise des eaux pour la hauteur d'eau du lac et le niveau du trop plein et les mesures de la sonde des Prodains pour le débit de la Dranse).

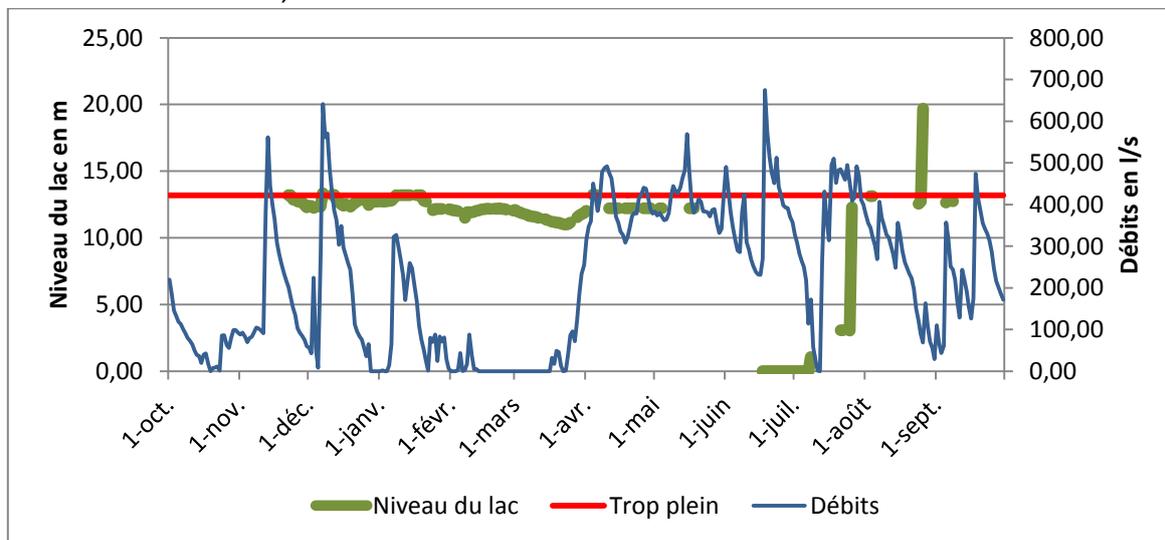


Figure. 137 Lac vidangé pour réparation de la bache de fond. (Cliché : 2 juillet 2011. E. Magnier).



5.2.3 Analyse du débit de la Dranse en 2011-2012

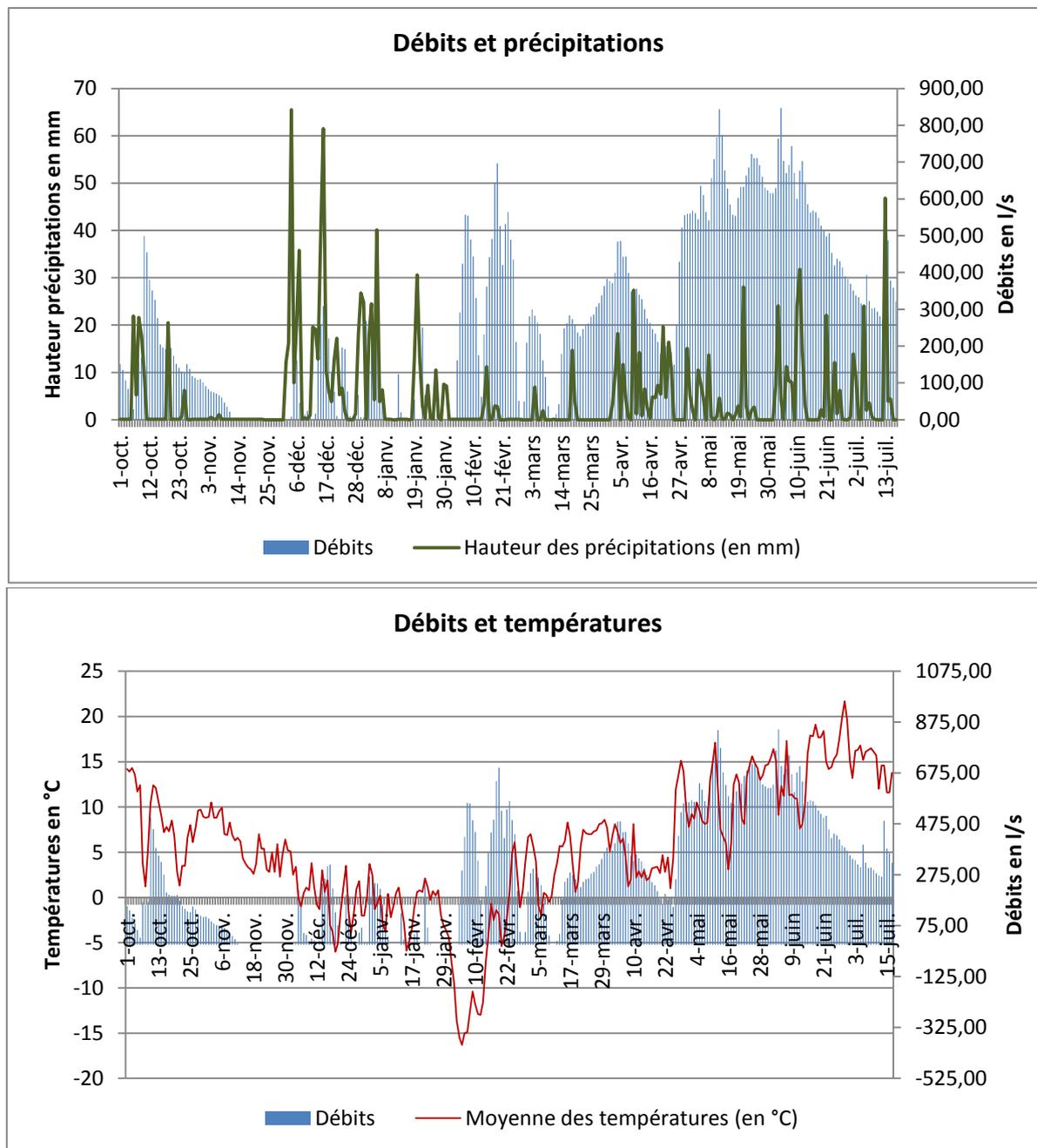
Cette seconde période d'étude confirme ce qui vient d'être dit pour l'année 2010-2011 (Fig. 134). La variation du débit dépend principalement des conditions climatiques. Du 2 décembre au 5 janvier, les précipitations sont relativement importantes (534.4 mm cumulés) (Fig. 138). Cependant, ces précipitations se font presque exclusivement sous forme de neige car durant cette période les températures sont négatives. Ainsi le débit est relativement faible, 112 l/s en moyenne sur cette période avec des valeurs de débit inférieures à 50 l/s sur le début de la période.

Du 3 au 6 janvier, on remarque une brève augmentation de débit, avec des valeurs moyennes journalières supérieures à 200 l/s. Du 29 décembre au 2 janvier, un premier épisode de pluie apporte 70 mm, et le total de précipitations pour la période du 29 décembre au 6 janvier est de 160 mm. Cet épisode de pluie s'accompagne d'une hausse des températures du premier au 5 janvier, avec des valeurs positives atteignant 4°C le 1^{er} janvier. Puis, les températures s'abaissent rapidement dès le 7 janvier (-4°C). Le débit diminue alors très rapidement dès le 7 janvier (86 l/s ; 32 l/s le 8 janvier). Puis le débit reste nul durant plusieurs jours (températures négatives jusqu'à -6 °C). Le 22 janvier, le débit augmente à nouveau (250 l/s), du fait d'un apport de précipitations important les quatre jours précédents (total de 60 mm de précipitations du 19 au 22 janvier) et d'un bref redoux sur cette même période (valeurs supérieures à 0 °C et jusqu'à 2.1 °C le 22 janvier). Les températures redeviennent alors négatives dès le 23 janvier, expliquant une nouvelle baisse du débit (débits nul dès le 24 janvier).

Dès le 25 février, les températures augmentent (elles sont supérieures à 10°C), provoquant la fonte d'une partie du stock neigeux. Mais la hausse du débit est plus significative en avril avec des valeurs dépassant les 350 l/s dès le 30 mars et atteignant 584 l/s le 4 avril. Les précipitations sont fréquentes du 4 avril au 13 juillet avec un total pluviométrique de 550 mm pour cette période. Les températures dépassent régulièrement les 15°C (en particulier à partir du 28 avril), favorisant la fonte du stock neigeux. La fonte associée aux précipitations explique la hausse importante du débit.

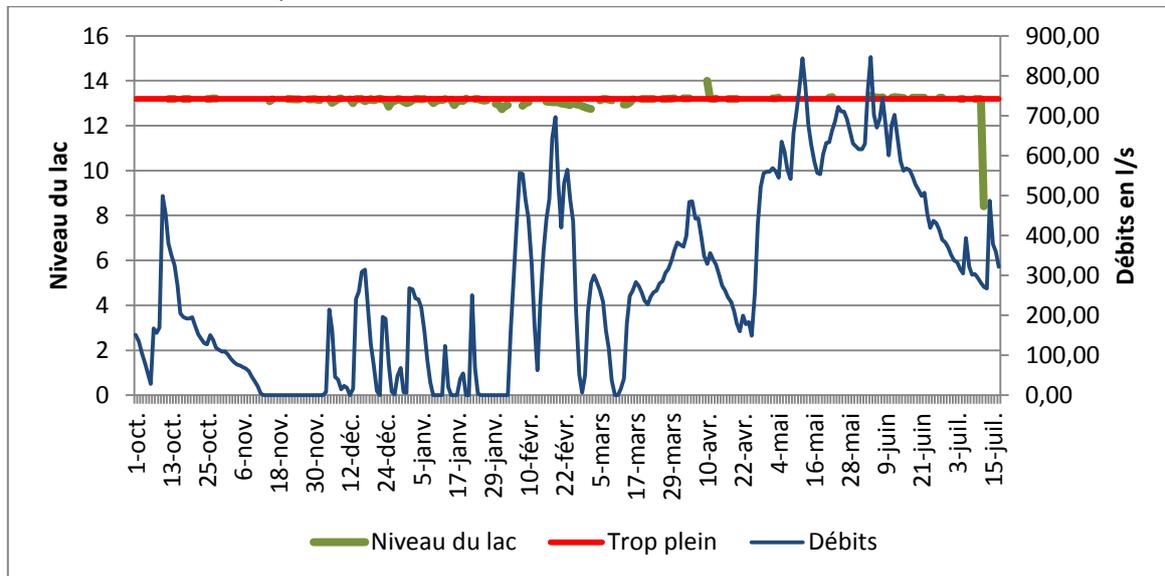
En revanche, du 4 au 26 février, le débit augmente fortement, atteignant quasiment 700 l/s le 19 février. Cette hausse du débit ne peut s'expliquer par la fonte du manteau neigeux car les températures sont basses, voire négatives (jusqu'à -16.3°C le 5 février, et -2°C le 19 février). Elle ne peut pas non plus s'expliquer par d'importantes précipitations, celles-ci étant restées relativement faibles sur cette période (21.6 mm). De plus, rappelons-le, il s'agit principalement de précipitations sous forme neigeuse du fait des températures négatives.

Figure. 138 Données de températures, de précipitations et de débits pour l'année 2011-2012.



Durant cette période, le niveau du lac est presque toujours au niveau du trop-plein ou légèrement en dessous (Fig. 139). Les écoulements entre le lac 1730 et la Dranse de Sous-Saix en aval sont faibles et ne permettent pas d'expliquer la variation du débit.

Figure. 139 Niveau du lac 1730 et débits de la Dranse de Sous-Saix pour l'année 2011-2012. (D'après les données de la Lyonnaise des eaux pour la hauteur d'eau du lac et le niveau du trop plein et les mesures de la sonde des Prodains pour le débit de la Dranse).

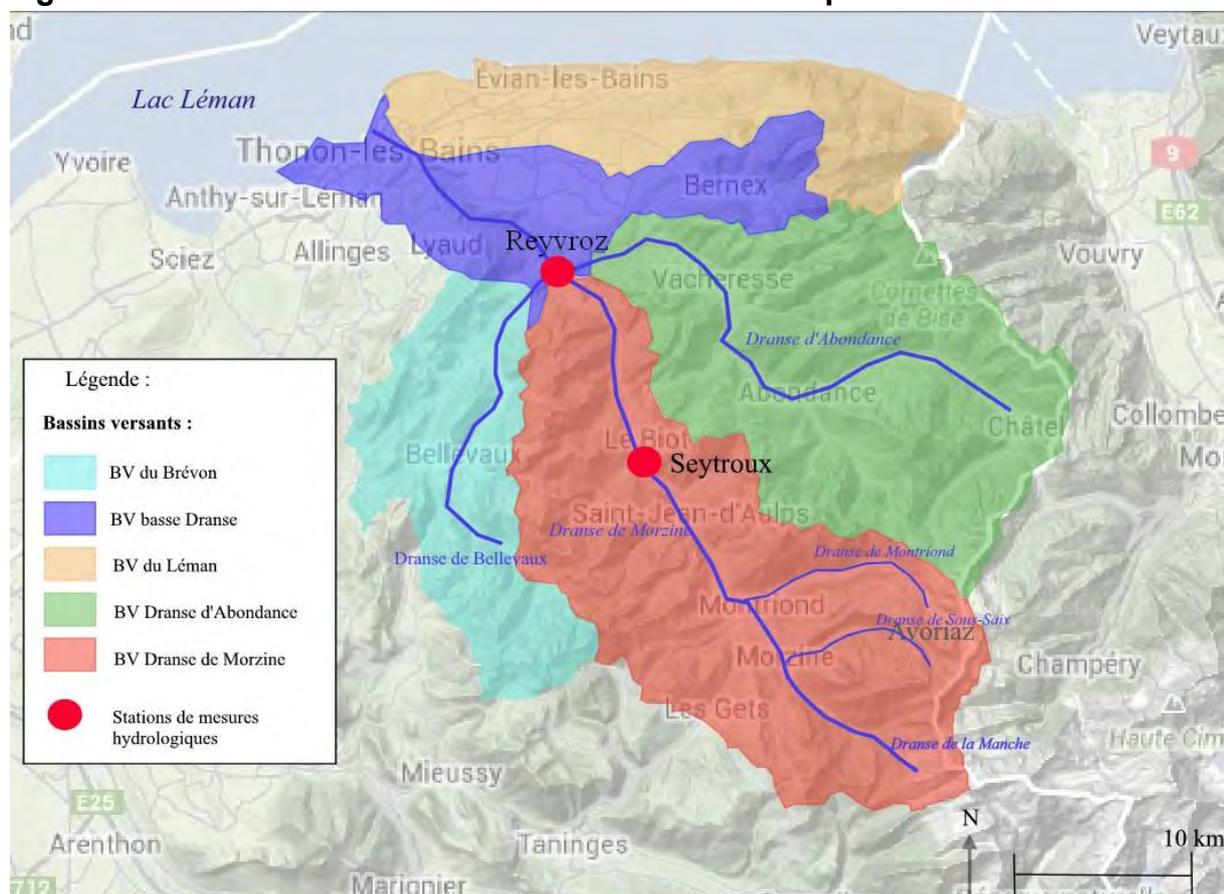


De manière générale, on constate une très bonne concordance des courbes de précipitations et de débits. On peut donc penser que les écoulements de la Dranse sont essentiellement liés aux variations des précipitations. Cependant, quelques événements exceptionnels, nous montrent que le lac 1730 joue tout de même un rôle, même faible, sur le régime de la Dranse. En effet, le régime est modifié par le stockage de l'eau dans le lac dont le niveau varie en fonction des activités anthropiques et dépasse ou non le trop-plein. En hiver, ce sont surtout les prélèvements pour les usages de la station (marnage du lac) qui modifient le volume stocké et en été, il s'agit presque exclusivement des réparations dans le lac. C'est principalement en hiver, en période d'étiage, que le lac impacte le plus les écoulements à l'aval. En effet, les précipitations se faisant principalement sous forme neigeuse et la fonte étant relativement faible du fait des températures négatives, les écoulements naturels sont limités. La majeure partie des écoulements de la Dranse provient donc du trop-plein du lac. Il est possible d'en déduire que les prélèvements dans le lac 1730 n'ont pas ou peu d'impact sur le régime des écoulements de la Dranse, en terme de répartition dans le temps et en terme de volume des écoulements. Cependant, on ne peut pas parler ici d'un régime naturel mais on utilisera plutôt le terme de régime artificialisé du fait des aménagements qui régulent une faible partie des écoulements. Cependant, le régime de la Dranse aujourd'hui est peu éloigné du régime naturel avec une période d'étiage en hiver et des périodes de hautes eaux au printemps et en été. L'impact reste donc limité sur l'hydrosystème. Le lac joue le rôle d'un bassin tampon par lequel transite l'eau de l'amont du bassin de Chavanette jusqu'aux Prodains, retardant à certaines périodes les écoulements (recharge du lac au printemps).

5.2.4 QU'EN EST-IL DU DEBIT RESERVE IMPOSE PAR LA LOI ?

En France, la loi sur l'eau de 2006 fixe un débit réservé dans les cours d'eau à 1/10 du module du cours d'eau. C'est le débit minimum obligatoire que les propriétaires ou gestionnaires d'un ouvrage hydraulique doivent réserver au cours d'eau. Ce débit réservé doit permettre de maintenir un écoulement minimum dans le cours d'eau pour contribuer aux équilibres écologiques et aux solidarités amont-aval. Tout cours d'eau aménagé est concerné par ce débit réservé. La loi de 2006 impose la mise en œuvre de cette réglementation à l'échéance du 1^{er} janvier 2014. Dans la réalité un certain nombre de dérogations ou d'adaptations sont prévues. L'ONEMA (Office national de l'eau et des milieux aquatiques) assure les contrôles avec les services de police de l'eau des directions départementales des territoires (DDT).

Figure. 140 Le bassin versant des Dranses et ses cinq sous bassins versants.

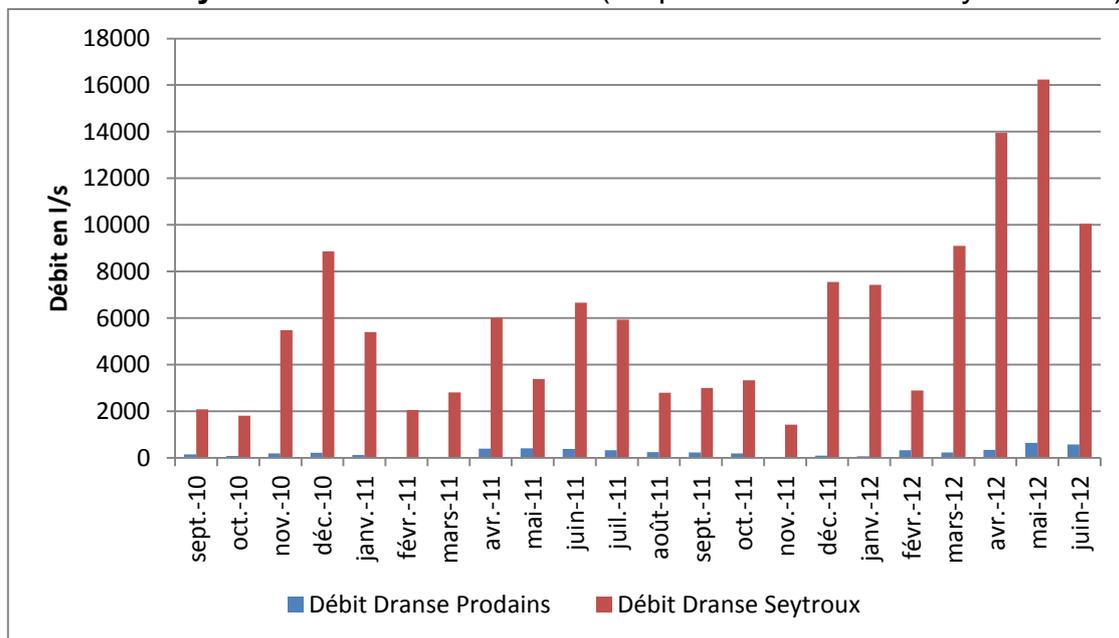


Au niveau de la Dranse de Sous-Saix, il n'existait pas de mesures de débit avant la mise en place de la sonde aux Prodains, et à notre connaissance, aucun débit réservé n'est maintenu dans le cours d'eau. De ce fait, en l'absence de ces données, il nous est impossible de calculer le module qui correspond aux débits moyens annuels d'un cours d'eau sur une période de référence d'au moins 30 années consécutives. Nous avons calculé le module du cours d'eau pour chacune des années d'étude; il est de 213.9 l/s pour 2010-2011. Mais cela a peu de valeur et ne nous permet pas d'établir la valeur du débit minimum à maintenir dans le cours d'eau

et de vérifier le respect d'un débit réservé. Cependant, les écoulements étant nuls une partie de l'année (13 février au 16 mars) ou très faibles (moins de 50 l/s du 9 au 13 juillet), cela pourrait avoir des répercussions sur les activités à l'aval sur le bassin versant des Dranses (production d'eau potable, activités de loisirs et activités économiques). Les bassins versants des Dranses concentrent un grand nombre d'activités énergétiques comme la production d'énergie ou la production d'eau potable mais aussi de nombreuses activités de loisirs (production de neige, activité nautique, pêche...). Le bassin versant des Dranses comporte deux stations de mesures hydrologiques, la première à Seytroux (bassin versant de 170 km²) et la seconde plus en aval à Reyvroz (bassin versant de 495 km²)¹¹ (Fig. 140).

La Dranse de Seytroux a un débit moyen de 5.8 m³/s et les écoulements de la Dranse de Sous-Saix (débit mesuré aux Prodains) ne représentent que 4.7 % des écoulements totaux (Fig. 141). La variation des écoulements est relativement semblable avec une élévation des débits au printemps et à l'automne et des basses eaux hivernales. La variation des débits de la Dranse de Sous-Saix, faiblement impactée par les prélèvements sur la station d'Avoriaz, n'a que peu d'impacts sur les débits de la Dranse à Seytroux (point de mesure situé 12.3 km plus en aval).

Figure. 141 Le débit mensuel moyen de la Dranse à la sonde des Prodains et à la station de Seytroux entre 2010 et 2012. (D'après les données d'Hydrofrance).



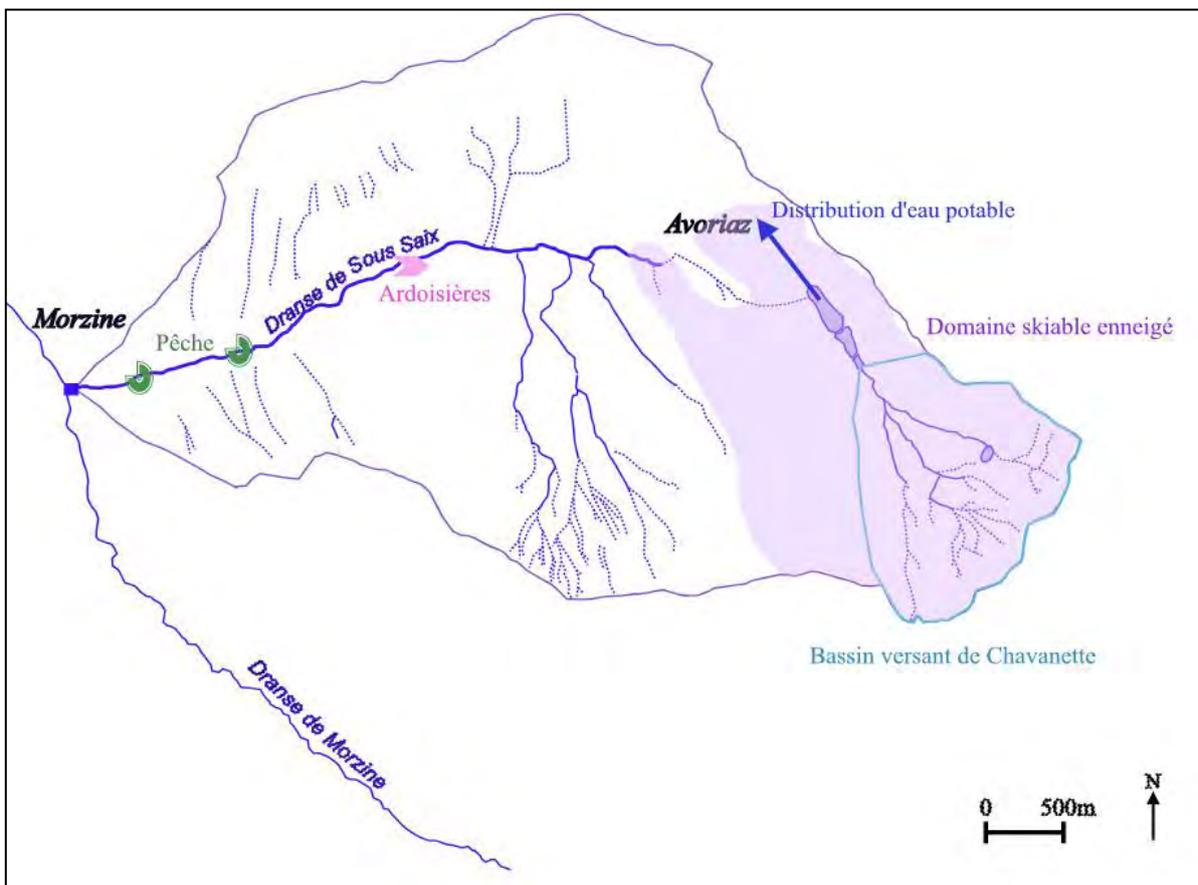
¹¹ Les données de la station de mesure de Reyvroz n'ont pu être exploitées, car cette station n'a pas fonctionné durant les années d'étude.

5.3 LES IMPACTS AMONT-AVAL

5.3.1 A l'échelle du bassin de la Dranse de Sous-Saix

Le bassin versant de la Dranse de Sous-Saix est le support d'activités économiques et de loisirs (Fig.142). On y retrouve à l'amont du bassin versant, la production de neige et d'eau potable (station d'Avoriaz). A l'aval de la station, deux activités sont tributaires des écoulements de la Dranse. Il s'agit d'une part d'une activité de loisir, la pêche à la truite, et d'autre part de la production d'ardoise.

Figure. 142 Les activités dans le bassin versant de la Dranse de Sous-Saix.

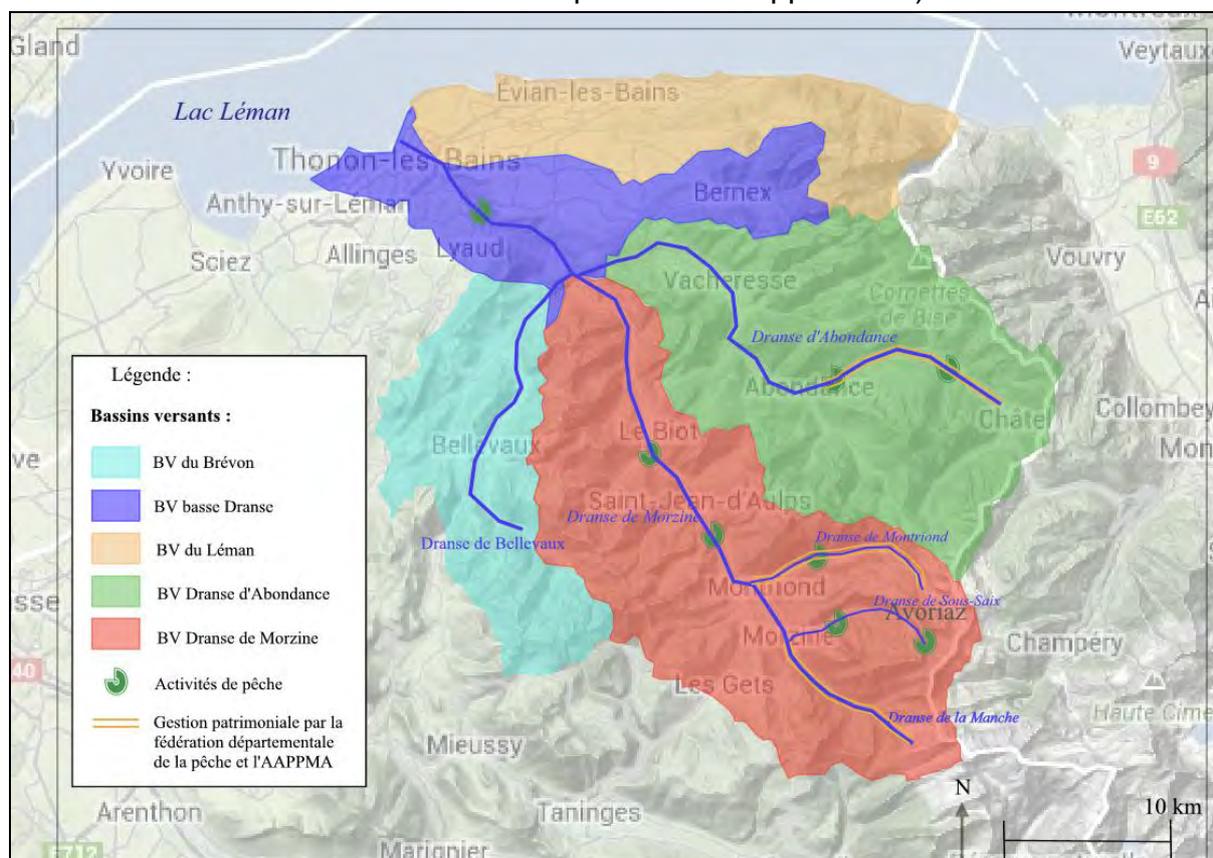


La pêche est fortement tributaire du débit. L'activité se localise essentiellement dans la partie aval de la Dranse de Sous-Saix, où le cours d'eau reçoit de nombreux affluents. Cette activité se déroule de manière générale du printemps jusqu'à l'automne, du 9 mars au 6 octobre (dates pour l'année 2013). Ces dates sont définies par arrêté ministériel. Plus en amont, au niveau du téléphérique des Prodains, la pêche n'est pas possible, car le débit est très variable certains jours d'été. Le maintien d'un débit réservé ou d'un minimum biologique serait favorable à cette activité. En effet, le débit minimum biologique garantit en permanence la vie, la

circulation et la reproduction des espèces vivant dans le cours d'eau. Il correspond généralement à 1/10 du module interannuel du cours d'eau. Le ministère de l'Ecologie a publié au Bulletin officiel du 10 août 2011, une circulaire datée du 5 juillet 2011 relative aux débits réservés à maintenir en cours d'eau. Le texte constitue un rappel et une mise à jour des principes généraux d'application de l'article L.214-18 du code de l'environnement, concernant l'obligation légale de débit minimal à respecter pour les ouvrages en cours d'eau. Cependant, il ne semble pas y avoir un débit réservé respecté au niveau de la Dranse de Sous-Saix et aucun contrôle ne semble être fait. Sur la Dranse de Sous-Saix, il n'y a pas encore de plan de préservation des espèces mis en place. Pourtant ce cours d'eau est le lieu privilégié de reproduction de la truite de souche sauvage.

Plus à l'aval, la Dranse d'Abondance, la Dranse de la Manche en amont de Morzine et la Dranse de Montriond font l'objet d'une gestion patrimoniale par la fédération départementale de la pêche et l'AAPPMA (association agréée pour la pêche et la protection des milieux aquatiques) du Chablais Genevois (suivi des populations de truites fario, identification et préservation des frayères...) (Fig. 143).

Figure. 143 Carte de l'activité pêche sur le bassin des Dranses. (D'après le SIAC, 25 juin 2008. Gestion intégrée de l'eau et des milieux aquatiques sur le bassin versant des Dranses et de l'est Lémanique. Etude d'opportunité).



La seconde activité est celle de la production d'ardoise. Il s'agit de l'un des derniers sites de production en France. La mine des ardoisières et la commercialisation de ces ardoises datent de la fin du 18^{ème} siècle. Les mineurs travaillaient de novembre à avril ; le reste de l'année, ils travaillaient aux champs et s'occupaient des bêtes. Cette activité a connu une expansion vers 1830. Il y eut jusqu'à 70 carrières exploitées employant 250 personnes. Cette activité représentait un atout économique pour le village de Morzine. Mais vers 1930, l'arrivée du tourisme et de nouveaux matériaux de couverture ralentirent considérablement cette activité. En 1970, il n'y avait plus que quatre carrières en exploitation. De nos jours, quatre ardoisières sont toujours en activité et des visites du site sont organisées en hiver comme en été. Cette activité ne nécessite pas de grands volumes d'eau, mais les écoulements de la Dranse sont utilisés pour nettoyer l'ardoise. Cette activité se déroule durant les mois d'hiver où les écoulements sont très faibles. Si le débit est insuffisant, l'activité est ralentie, voire stoppée, entraînant des répercussions économiques. Nous ne savons pas si cela s'est déjà produit par le passé. Au cours des diverses discussions, cette problématique n'est jamais ressortie.

5.3.2 A l'échelle du bassin de la Dranse de Morzine

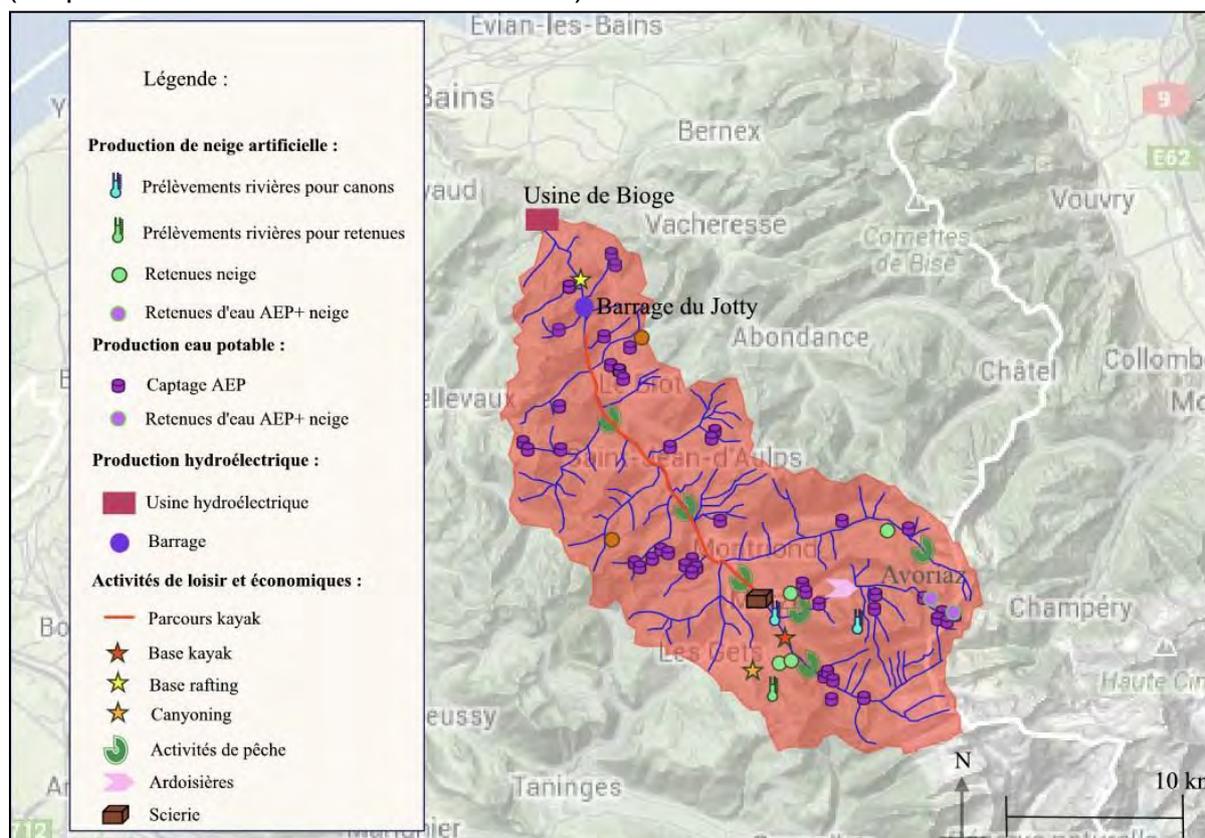
Le bassin de la Dranse de Morzine concentre à lui seul les 4 principales activités localisées dans la partie amont du bassin (Fig. 144). En effet, on y retrouve de l'amont à l'aval du bassin versant, la production de neige sur la station d'Avoriaz, la production d'eau potable, les activités de loisirs (pêche, activités nautiques) et la production hydroélectrique avec l'usine de Bioge. Mais on y trouve également deux activités économiques, la production d'ardoise et la production de bois. Toutes ces activités peuvent entrer en conflits si la ressource est insuffisante.

Les activités localisées à l'aval pouvant être affectées par les prélèvements dans la station d'Avoriaz sont de deux ordres, de l'amont à l'aval du bassin versant :

- Les activités de loisirs
- Les activités économiques

Sur le bassin de la Dranse de Morzine (190 km²), quatre activités sont présentes, la production d'eau potable, les activités de la scierie et les activités de loisirs pêche et canoë.

Figure. 144 Les activités sur le bassin versant de la Dranse de Morzine.
(D'après les données du SIAC Chablais).



L'approvisionnement en eau de la commune de Morzine se fait par captage de plusieurs sources et par pompage de la nappe phréatique. Les captages se répartissent sur le bassin versant de la Dranse de Morzine et sont approvisionnés par les écoulements naturels sur les hauteurs du bassin versant. Il est improbable que ces captages soient affectés par les prélèvements de la station d'Avoriaz.

L'activité de la scierie à eau de Morzine est également impactée par les écoulements de la Dranse de Morzine mais dans une moindre mesure. La scie est mue par un moulin actionné par la vitesse d'écoulement. Ainsi, si le débit est trop faible, l'activité de la scierie est ralentie.

Les activités de loisirs, pêche et canoë, sont également présentes sur la Dranse de Morzine. L'activité de pêche se déroule du 9 mars au 6 octobre selon arrêté ministériel de 2013, mais ces dates fluctuent légèrement chaque année. Mais de manière générale cette activité est pratiquée au printemps jusqu'à l'automne, durant les périodes de hautes eaux. Quand à la pratique du canoë, elle se limite aux mois de fonte nivale, d'avril à juin, lorsque le débit est plus soutenu. Mais elle est réservée à des pratiquants de haut niveau en raison de la haute technicité du tronçon. Ces activités se sont développées il y a une vingtaine d'années. Après la zone de confluence de la Dranse de Sous-Saix et de la Dranse de Morzine, entre Montriond

et le barrage de Jotty la pratique du canoë kayak est très répandue. Pour des raisons de sécurité, elle se limite au printemps et à l'été lorsque le débit est le plus important.

L'impact des activités de la station d'Avoriaz semble peu probable sur ces activités du fait de l'éloignement des sites, de la superficie du bassin versant considéré qui reçoit de nombreux affluents, du faible impact des prélèvements sur Avoriaz sur les écoulements de la Dranse de Sous-Saix, des périodes de pratique de certaines activités.

5.3.3 A l'aval de Seytroux jusqu'au lac Léman

- La première activité de loisir est la pêche.

Un Schéma départemental à vocation piscicole (SDVP) a été mis en place en 2007, il fournit un inventaire détaillé de la situation des cours d'eau du bassin versant des Dranses et principalement au niveau du Léman. La pêche est considérée comme une activité à fort potentiel de développement touristique pour le territoire.

- Les activités nautiques.

La seconde activité de loisirs sont les activités nautiques très présentes sur les Dranses (rafting, hydrospeed, canoë kayak et nage en eau vive). C'est la pratique du rafting qui domine à l'aval de Seytroux, avec en moyenne 28 000 pratiquants chaque année (contre 3000 personnes pour le canoë et la nage en eau vive). L'activité se déroule de mars à octobre avec une hausse importante de la fréquentation durant les mois d'été. Plusieurs sociétés de rafting, toutes regroupées au sein d'une association « le regroupement des professionnels des Dranses », se partagent l'activité. L'activité se déroule presque exclusivement sur la basse Dranse à l'aval du barrage de Bioge, les débits en amont étant jugés insuffisants. Les lâchers d'eau du barrage soutiennent la pratique. Sans ces lâchers, ces activités ne seraient pas possibles car le débit d'étiage de la basse Dranse est trop faible (3 à 4 m³/s). Un protocole d'accord avec EDF a été signé ; il fixe les débits mis à disposition pour les activités à l'aval du barrage et les périodes de pratique. L'activité est donc bien réglementée. Elle ne peut se dérouler lorsque les débits sont inférieurs à 6 m³/s pour le canoë kayak et 12 m³/s pour le rafting. Ces activités ne sont pas affectées par les prélèvements sur la station d'Avoriaz mais dépendent des conditions climatiques qui influencent les écoulements. Seule la pratique du kayak dépend des lâchers d'eau du barrage hydroélectrique.

- La production d'énergie.

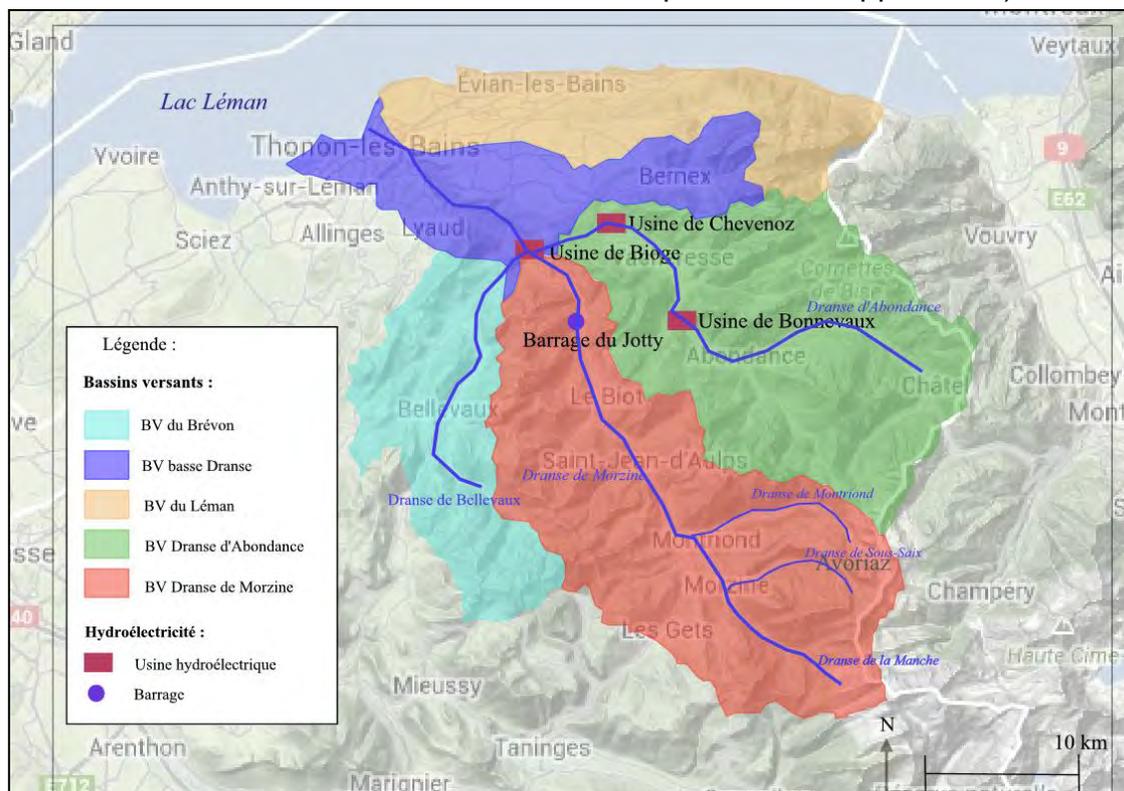
Le groupement EDF d'usine Fessy-Bioge produit 120 millions de kWh en moyenne par an grâce à l'exploitation de trois centrales hydroélectriques (Fig. 145) :

- L'usine de Bioge sur la commune de Vinzier, à la confluence de la Dranse de Morzine et de la Dranse d'Abondance. Elle turbine entre autre les eaux issues du barrage de Jotty (700 000 m³) sur la Dranse de Morzine.

- L'usine de Chevenoz, sur la Dranse d'Abondance au niveau du lieu-dit des Châtelards.
- L'usine de Bonnevaux sur la Dranse d'Abondance à l'aval de la commune d'Abondance.

La centrale hydroélectrique de Bioge fonctionne par écluse lorsque les débits entrants sont trop faibles. En phase de stockage dans le barrage du Jotty, le débit de la Dranse est inférieur au débit naturel et inversement en période de turbinage où le débit est supérieur. Jusqu'en 2012, le débit réservé à l'aval du barrage du Jotty était de 0.21 m³/s (soit 1/40^{ème} du module du cours d'eau). A l'aval de la centrale de Bioge le débit réservé était de 2.4 m³/s du 15 novembre au 15 février, de 3.1 m³/s du 16 février au 15 juin et de 1.1 m³/s du 16 juin au 15 novembre. La loi sur l'eau impose un débit réservé correspondant à 1/10 du module du cours d'eau pour tous les cours d'eau d'ici 2014. Ainsi en 2012, le débit réservé à l'aval de la centrale de Bioge est passé à 2 m³/s sur l'année. Et progressivement, le débit réservé à l'aval du barrage de Jotty devrait être modifié. Aujourd'hui un décret interdit la construction de nouvelles centrales hydroélectriques sur les Dranses.

Figure. 145 Les Dranses Lémaniques et les aménagements hydroélectriques. (D'après le SIAC, 25juin2008. Gestion intégrée de l'eau et des milieux aquatiques sur le bassin versant des Dranses et de l'est Lémanique. Etude d'opportunité).



En Europe depuis la Directive cadre sur l'eau, le débit minimum imposé doit également s'adapter aux besoins énergétiques. De ce fait la mesure du débit en amont de ces aménagements est donc indispensable. Bien que des impacts des

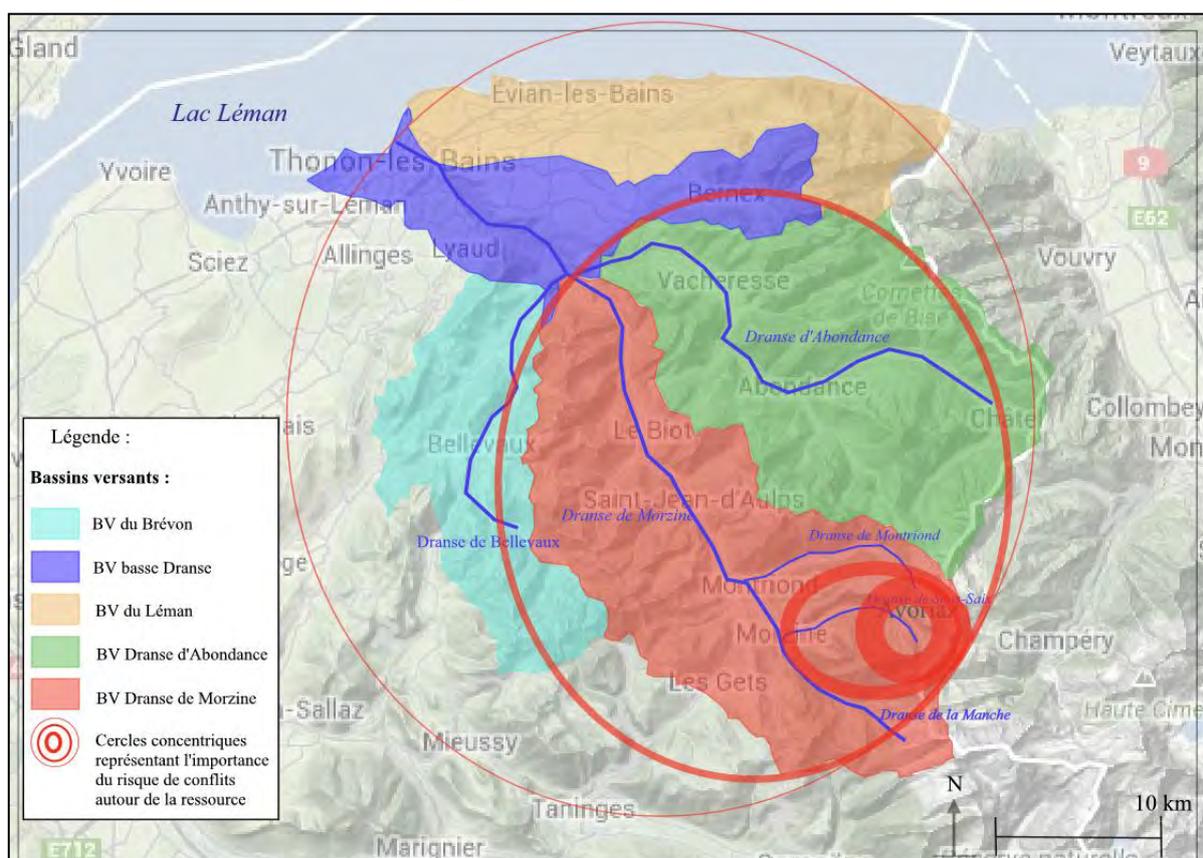
prélèvements à Avoriaz sur les écoulements au niveau de la centrale hydroélectrique soient peu probables, du fait de l'éloignement et de l'alimentation de la Dranse de Morzine par divers affluents en amont de la centrale, il serait tout de même intéressant de contrôler les débits de l'amont à l'aval du bassin versant. Ce contrôle passe par des points de mesures et par un contrôle du débit réservé à l'aval du lac 1730 d'Avoriaz, du débit à la confluence de la Dranse de Morzine et de la Dranse de Sous-Saix, et du débit de la Dranse de Morzine en amont des activités (loisirs et production électrique). Une seule station de mesure est installée sur la Dranse de Morzine au niveau du pont de Couvaloup. Cette station limnimétrique gérée par la DIREN (Direction générale de l'environnement) mesure les écoulements d'un bassin versant de 170 km², inclue la Dranse de Sous Saix dans sa partie amont. Le module du cours d'eau est de 7.71 m³/s. Ces écoulements diminuent à 2.12 m³/s en période d'étiage.

Le régime hydrologique des Dranses à l'aval de Morzine est de type pluvio-nival avec un maximum principal en mai lors de la fonte des neiges et un maximum secondaire en novembre-décembre. Cette répartition des écoulements au cours de l'année conditionne les périodes de pratiques de certains loisirs (en particulier les activités nautiques). Les divers aménagements et activités anthropiques peuvent modifier les écoulements de l'amont à l'aval du bassin versant.

5.4 Une pluriactivité à l'échelle régionale du bassin de la Dranse de Morzine : des risques de conflits.

Comme nous venons de l'expliquer les risques de conflits d'usage ne sont pas inexistantes mais concernent essentiellement la partie amont du bassin versant des Dranses et plus précisément les secteurs en tête de bassin où se localisent d'ailleurs les domaines skiables (Avoriaz, les Gets, Morzine...). Ainsi, les petits bassins versants (dont la superficie est inférieure à 30 km² en moyenne) en tête de bassin sont concernés par le risque de conflits en particulier entre deux secteurs d'activités (la production de neige et la production d'eau potable) (Fig. 146). Même si ce risque reste très faible à l'échelle des volumes mis en jeu dans la station d'Avoriaz, il ne doit cependant pas être traité avec légèreté. A l'aval, le risque diminue proportionnellement avec l'accroissement de la superficie du bassin versant. C'est principalement la multiplication des activités (de loisirs, de production hydroélectrique...) qui peut entraîner une situation de conflits. Ainsi, sur le secteur du bassin versant de la Dranse de Sous-Saix, les activités susceptibles d'entrer en conflit sont la production de neige, la production d'eau potable et la pêche. Plus à l'aval, les activités nautiques et la production d'électricité ne sont a priori pas concernées par les prélèvements en amont. Ce qui ne signifie pas pour autant qu'il ne peut y avoir de conflits entre toutes ces diverses activités, comme entre la production hydroélectrique et la pêche. Mais ce n'était pas la question de cette étude.

Figure. 146 Les zones à risques de conflits liés aux prélèvements en tête de bassin sur la station d'Avoriaz.



La gestion amont-aval de la ressource est importante. Pour cela, les connaissances des impacts des différentes activités sur les écoulements sont aujourd'hui insuffisantes pour bien gérer la ressource globale à l'échelle de bassins versants plus ou moins vastes. Ces connaissances sont particulièrement limitées en tête de bassin versant, sur les petits cours d'eau affectés par les activités des stations de sports d'hiver, production de neige et production d'eau potable. Multiplier les points de mesure des débits serait favorable à une bonne gestion de la ressource en particulier pour les années à venir dans un contexte de changement climatique.

Conclusion chapitre 5

Cette seconde partie de l'étude s'intéresse plus spécifiquement aux impacts de la production de neige sur l'hydrosystème et son fonctionnement, c'est-à-dire sur le débit et le régime hydrologique d'un cours d'eau. Le secteur d'étude choisi est celui du bassin versant des Prodains. Ce bassin versant est un sous-bassin de la Dranse de Sous-Saix. Il se compose dans sa partie amont, du bassin versant de Chavanette dont les écoulements rejoignent le lac 1730 et d'une portion du bassin versant de la Dranse de Sous-Saix située juste à l'aval de la station d'Avoriaz. L'exutoire de ce bassin correspond à l'emplacement de la sonde de mesure installée dans la Dranse de Sous-Saix au niveau du téléphérique des Prodains.

D'un point de vue méthodologique, un certain nombre de données ont été recueillies auprès des opérateurs de domaines skiables, de la Lyonnaise des Eaux mais aussi de MétéoFrance. Ces données ont été complétées par une série de mesures de débits dans la Dranse de Sous-Saix. L'intérêt de ces informations est de mettre en avant le rôle que jouent les prélèvements et restitutions d'eau sur les écoulements du cours d'eau et de s'interroger sur l'impact de l'activité de production de neige sur l'hydrosystème.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressée aux volumes d'eau en entrée c'est-à-dire les précipitations à l'échelle du bassin versant et les volumes d'eau en sortie au niveau de la sonde (débits). D'un point de vue des entrées et des sorties, la part des prélèvements est infime sur le total des volumes transitant dans le bassin versant (moins de 1 % pour les entrées et moins de 2.4 % pour les sorties). A l'échelle des mois d'hiver (de décembre à mars), en période d'étiage des cours d'eau la part des prélèvements totaux n'est pas négligeable (environ 20 % sur la saison et en moyenne 7 % à l'échelle du mois) au regard des volumes écoulés.

Dans un second temps, nous avons essayé d'établir le lien entre le marnage du lac et les débits à l'aval. Ce lien est peu marqué. Dans ce petit bassin versant d'étude d'une superficie d'environ 11 km², les précipitations et les écoulements issus de la fonte du stock neigeux semblent être la principale source d'alimentation du débit. En effet, à chaque épisode de pluie important correspond une élévation du débit. Cependant, durant les mois d'hiver, lorsque les précipitations sont faibles ou sous forme neigeuse, que les températures négatives limitent la fonte, les écoulements de la Dranse de Sous-Saix sont alors issus presque exclusivement des « lâchers » d'eau du lac 1730. Si le niveau du lac est supérieur au trop-plein, le débit de la Dranse augmente légèrement et ce, même en l'absence de précipitations. A l'inverse, lorsque le niveau du lac est inférieur au trop-plein, le débit est nul. Cela ne tient bien évidemment pas compte de l'approvisionnement par les résurgences karstiques difficilement quantifiable mais théoriquement plutôt faible puisque nous avons choisi de placer la sonde juste à l'aval de la résurgence du lac 1730.

Ainsi, à l'échelle d'un petit bassin versant de montagne, l'impact des prélèvements sur les écoulements d'un cours d'eau à l'aval reste faible mais non nul (impacts sur certaines activités comme l'ardoisière de Morzine). Le lac 1730 joue le rôle de bassin tampon entre les écoulements du sous-bassin de Chavanette (qui alimentent le lac 1730) et la Dranse de Sous-Saix à l'aval. Les prélèvements lorsqu'ils sont importants en saison hivernale et lorsqu'il y a peu ou pas de recharge du lac par apport des précipitations ou des eaux de fonte font baisser le niveau. Mais la production de neige seule ne permet pas d'expliquer cette baisse qui est induite par une accumulation des usages autour d'une même ressource. Si le niveau est trop bas (inférieur au trop-plein), alors le lac ne se déverse plus à l'aval, réduisant les écoulements dans la Dranse de Sous-Saix. Cependant le rôle du lac reste limité et les apports principaux au cours d'eau dépendent majoritairement des conditions climatiques.

Le régime actuel de la Dranse de Sous-Saix est un régime artificialisé par les différents aménagements des activités anthropiques. Il connaît une période de basse eau en hiver induite par les conditions climatiques et les prélèvements d'eau et deux périodes de hautes eaux correspondantes au printemps à la fonte du stock neigeux et en été aux précipitations d'orages estivaux. Finalement, ce régime artificialisé ne s'éloigne que très peu du régime nival naturel du cours d'eau avant aménagements.

La loi sur l'eau de 2006 fixe un débit réservé à maintenir dans le cours d'eau à l'aval des aménagements de prise d'eau. Théoriquement, la Dranse de Sous-Saix devrait être concernée par cette réglementation et un débit minimum devrait s'écouler toute l'année. Ce n'est visiblement pas le cas puisque le cours d'eau connaît de longue période d'étiage (débit nul) en hiver. Cependant, dans le cadre d'un petit cours d'eau de montagne, l'étiage d'hiver est naturel et l'instauration d'un débit minimal n'est probablement pas justifiée. Le non maintien de ce débit réservé peut avoir des conséquences à l'aval notamment sur les activités. Ainsi à l'échelle du bassin de la Dranse de Sous-Saix, les secteurs concernés sont ceux de la pêche et de l'ardoisière. Mais à notre connaissance, à ce jour ils ne semblent pas impactés. L'ardoisière, située à l'aval du bassin versant, continue de fonctionner en saison hivernale grâce à l'apport des affluents. Et l'activité de pêche n'est pas concernée puisqu'elle se déroule au printemps et en été lorsque les débits sont plus importants. A une échelle plus vaste, celle du bassin versant de la Dranse de Morzine ou celle des bassins des Dranses, les activités sont nombreuses. Il s'agit des activités de loisir (activités nautiques diverses, pêche...), des activités de production de bois et la production hydroélectrique. A cette échelle, il n'y a pas ou très peu d'impact. Par l'apport de nombreux affluents, le bassin versant connaît des débits importants toute l'année, mesurés à la station limnimétrique de Couvaloup. Cependant même si les impacts sont très limités et les rivalités d'usages avec la production de neige peu présentes, cela n'exclue pas les conflits inter usages à l'aval du bassin, mais ce n'est pas le sujet de notre question.

CHAPITRE 6. DISCUSSION DES RESULTATS

Introduction Chapitre 6

Nous l'avons mis en évidence, le système de production de neige est un système complexe et souvent fortement controversé. Pour cette raison, il nous a souvent été difficile d'obtenir des informations et des données concrètes pour la réalisation des recherches. Cependant, la production de neige est une technique de plus en plus utilisée. Au cours des dernières années, les stations de ski ont investi dans des équipements de production de neige artificielle (46 millions d'euros en France en 2002). Ce déploiement de « canons à neige » assure potentiellement une fréquentation régulière pendant la saison touristique, mais a des impacts plus ou moins importants sur le milieu naturel montagnard. La question de la ressource en eau a été posée à plusieurs reprises ces dernières années.

Ce dernier chapitre a pour objectif de vérifier le questionnement de départ et d'émettre des propositions pour l'avenir.

Le premier objectif est de vérifier les hypothèses posées au départ. Certaines ne trouveront pas d'éléments de réponse, ouvrant ainsi sur de nouvelles recherches.

Le second objectif est celui d'émettre des propositions constructives pour améliorer la gestion de la ressource dans les années à venir. En effet, la vulnérabilité interannuelle motive les stations à développer les usines à neige. Ce développement est également motivé par la croissance des stations, qui multiplie depuis quelques années l'offre de lits touristiques, à l'image de la station d'Avoriaz. Cette extension des stations conduit inévitablement à une augmentation de la fréquentation des pistes créant ainsi une usure plus rapide du manteau neigeux et conduit parfois aussi à l'extension du domaine skiable. Tous ces facteurs entraînent un accroissement des surfaces enneigées mécaniquement. Les questionnements autour des variations liées au changement climatique sont nombreux. Ces variations semblent amplifiées dans les régions de montagne. Ces propositions constructives prendront en compte ce changement climatique d'un point de vue enneigement naturel, augmentation des températures et disponibilité de la ressource en eau. Les incertitudes quant à tous ces paramètres sont grandes. Notre démarche a pour objectif d'utiliser ces données pour comprendre les risques futurs sur la ressource en eau et adapter les propositions.

Enfin nous terminerons par la présentation d'initiatives pilotes mises en œuvre par différents acteurs (pouvoirs publics, gestionnaires des domaines skiables et de l'eau potable...). Toutes ces initiatives vont dans le sens d'un meilleur partage de la ressource en eau et de la conciliation de la production de neige avec les différents usages des stations de ski.

6.1 VERIFICATION DES HYPOTHESES DE DEPART

Il faut rappeler que ces hypothèses ont été formulées au début de notre travail à partir de nombreuses lectures et des interrogations redondantes de la part des médias et associations de protection de la nature. Elles ont permis de fixer le cadre des recherches et avaient pour but d'être vérifiées en fin de travail. Ces hypothèses vont ainsi être reprises une par une, vérifiées ou réfutées à partir de l'ensemble des résultats de nos recherches.

- 1^{ère} hypothèse : La production de neige nécessite l'utilisation de volumes considérables qui pèsent sur la ressource globale d'une station de sport d'hiver.

Cette hypothèse est dans l'ensemble confirmée. Cependant la seconde partie doit être nuancée.

Il faut rappeler que pour produire une hauteur de 70 cm de neige au sol sur 1 ha la quantité d'eau nécessaire est de 3500 m³. En 2007, 4821 m³ à l'hectare de prélèvements ont été déclarés à l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse pour la Savoie et 1523 m³ à l'hectare pour la Haute-Savoie, deux fois moins équipée que la Savoie (Direction départementale des territoires de la Savoie, 2011). A l'échelle nationale, en 2008-2009 ce sont près de 18 millions de m³ d'eau qui ont été consommés pour la production de neige. Les volumes captés sont donc considérables pour une seule saison d'hiver qui ne dure, rappelons le, que cinq mois en moyenne (la durée d'ouverture du domaine skiable dépend des stations). Notre étude sur la station d'Avoriaz à l'échelle de petits bassins versants de montagne (11 km² pour le bassin de la Dranse aux Prodains), les volumes sont tout autant considérables. Pour les cinq mois d'hiver de la saison 2010-2011 (de novembre à mars), 159 986 m³ d'eau ont été prélevés dans le lac 1730 pour la production de neige, sur cette même période, 104 443 m³ ont été prélevés en 2011-2012, soit environ deux fois le volume du lac (60 000 m³). Les volumes utilisés pour la production de neige sont tout autant importants que ceux prélevés pour la production d'eau potable (114 791 m³ pour la neige durant la saison d'hiver 2010-2011 et 45 195 m³ pour l'eau potable). A Champéry, les volumes prélevés directement dans le réseau de surface (cours d'eau et lacs) atteignaient en 2010, 150 000 m³. Mais ces prélèvements restent inférieurs à ceux d'autres stations comme en témoigne l'étude de P. Paccard (2010). Dans le cas de la station d'Orcières-Merlette, les besoins en eau pour la production de neige dépassent les 70 000 m³ par mois avec un total de novembre à février de plus de 340 000 m³. A Crans-Montana (Bonriposi, 2013), la quantité d'eau utilisée par saison pour la production de neige varie entre 260 000 et 450 000 m³. Plus que les volumes prélevés à l'échelle de la saison, c'est l'intensité de l'usage (prélèvements importants en quelques heures) qui peut poser problème. A l'échelle de la journée, voire même de l'heure, le volume des prélèvements peut atteindre 10 114 m³ en quelques heures le 24 janvier à Avoriaz. Mais cette intensité des prélèvements est tamponnée en amont par la présence du lac 1730. Ces prélèvements n'ont donc pas d'impact direct sur les écoulements à

l'aval. En revanche, l'accumulation des usages sur l'ensemble des mois d'hiver entraîne la baisse de la ressource stockée dans le lac 1730 (baisse du niveau du lac de près de 2,23 m durant l'hiver 2010-2011).

Cependant, au regard de la consommation de certains autres usages (eau potable, hydroélectricité), la part des prélèvements pour la production de neige doit être relativisée. En effet, 18 millions de m³ sont prélevés pour la production de neige à l'échelle de toute la France, alors que 40 millions de m³ servent à l'irrigation des cultures de maïs sur le seul département de l'Isère (Reynaud, 2008) dans les Alpes du Nord, et que 25 millions de mètres cubes d'eau sont perdus dans l'adduction en eau potable sur le seul département de la Haute-Savoie (Informations fournies par Laurent Reynaud de Domaine skiable de France). A l'échelle de nos stations d'étude, la part de l'eau destinée à l'alimentation en eau potable est également importante (45 689 m³ en 2010-2011 sur le lac 1730 à Avoriaz et 311 527 m³ distribués à l'échelle de la station). En revanche, les prélèvements à l'échelle de la journée ou sur quelques heures sont nettement moins importants que ceux de la production de neige de culture (2723 m³ prélevés pour l'eau potable à Avoriaz le 30 janvier 2012, 5076 m³ distribués à l'échelle de la station). Selon une étude de Bonriposi (2013), à Montana, la consommation annuelle d'eau dépasse régulièrement les 700 000 m³ et à Zermatt, la consommation en eau potable est particulièrement importante puisqu'elle dépasse les 140 000 m³ par mois en hiver. Cela s'explique en partie par le fait que l'eau potable est également utilisée pour l'approvisionnement des enneigeurs.

- 2^{ème} hypothèse : Le développement des techniques d'enneigement et des stations de ski va entraîner une augmentation importante des volumes d'eau utilisés.

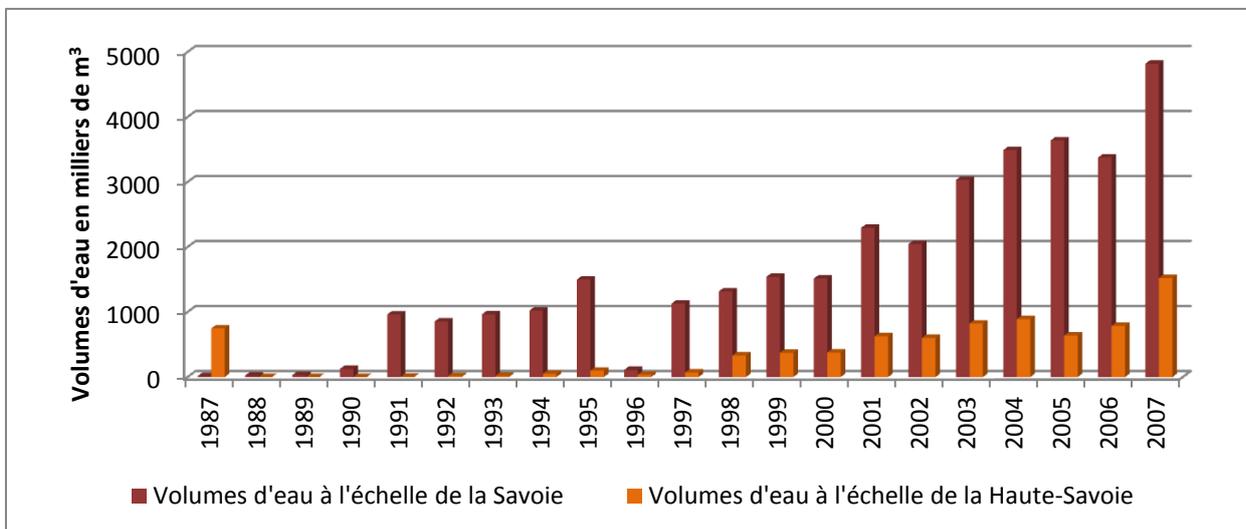
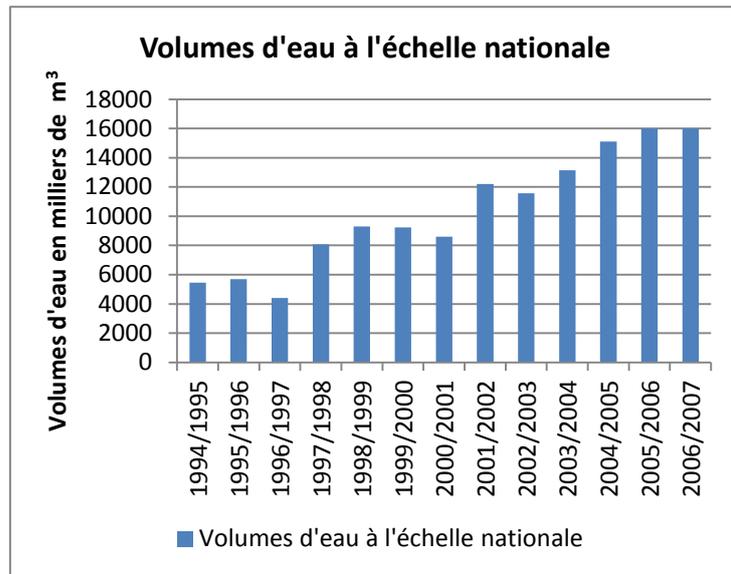
Cette affirmation est à nuancer. Apparue dans les années 1950 aux Etats-Unis, la fabrication de neige arrive en France en 1963. Mais cette technique ne se généralise qu'à partir de 1980 en raison des difficultés rencontrées par les stations sur un plan financier par suite de plusieurs hivers sans neige.

Aujourd'hui plus de 200 stations sur les 300 stations françaises sont équipées de système de production. L'enneigement artificiel représente aujourd'hui 5333 hectares de pistes enneigées soit 23 % de la superficie totale des pistes. En Savoie et Haute-Savoie, les surfaces équipées ont considérablement augmenté depuis les années 90 pour atteindre 1783 ha en Savoie et 874 ha en Haute-Savoie en 2007-2008. La station d'Avoriaz suit cette logique d'évolution puisque les surfaces enneigées ont presque doublé entre 1995-1996 et 2008-2009¹². Une augmentation très rapide ou au contraire une baisse importante s'explique par le renouvellement des parcs à canons et la suppression de canons trop anciens. Très logiquement si les surfaces équipées augmentent, les volumes d'eau mobilisés évoluent.

¹² Les données utilisées ici sont celles d'Atout France et s'arrêtent donc aux années 2008 et 2009. Les relevés pour les années suivantes ne nous ont pas été fournis.

La consommation d'eau associée est proportionnelle au développement de ces installations puisqu'en 1999, 9 millions de m³ d'eau ont été utilisés contre près de 16 millions en 2009. La courbe des volumes d'eau mobilisés pour la production de neige réalisée d'après les données d'Atout France¹³ nous montre là encore une forte croissance ces dernières années. En 2007, 4821 m³ d'eau ont été déclarés à l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse pour la Savoie et 1523 m³ pour la Haute-Savoie (Fig. 147).

Figure. 147 Evolution des volumes d'eau utilisés pour la production de neige à l'échelle nationale de 1994 à 2007, et en Savoie et Haute-Savoie de 1988 à 2007 en milliers de mètres cube. (D'après l'enquête annuelle d'ODIT France auprès des opérateurs de domaines skiables et les données de l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse, 2008).



Les différences de valeurs relevées par l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse et l'enquête ODIT France rendent compte de la réalité des comptages des prélèvements en eau pour la production de neige. Même si les ordres de grandeur sont connus, il n'existe pas de données très précises sur ces prélèvements (Badré,

¹³ ODIT France est le nom de l'ancienne structure aujourd'hui appelée Atout France depuis 2009. Pour les données étant antérieures à 2009 nous mentionnerons la tout de même la référence d'Atout France.

Prime et al., 2009). Sur Avoriaz, l'augmentation est aussi très nette, les prélèvements ont doublé en l'espace de neuf ans. La progression est donc très rapide. Toujours selon Atout France (2009), la croissance des prélèvements est de 990 000 m³ supplémentaires par an à l'échelle nationale.

Si cette évolution continue dans les mêmes proportions, la surface enneigeable des domaines skiables français pourrait atteindre jusqu'à 9000 hectares en 2020 avec un taux d'équipement de 30 à 40 % (Paccard, 2011). La consommation d'eau à l'échelle de la saison dépasserait 31 500 000 m³ sur l'ensemble des stations françaises¹⁴. En effet les nouvelles constructions porteront à terme la capacité touristique d'Avoriaz à 36 200 lits. La fréquentation touristique se concentre actuellement principalement durant les mois d'hiver avec un pic de fréquentation entre Noël et le jour de l'an (95 % d'occupation de la station) (PLU Morzine consulté en 2012). L'augmentation de la fréquentation et du nombre de spas privés posent la question de la pérennité du système actuel. Dans les conditions climatiques actuelles et sans forte augmentation de la production de neige, la ressource en eau semble être suffisante, car elle est estimée à 20 000 000 m³ sur le bassin versant du Lac 1730. Mais rappelons-le, les gestionnaires de la Lyonnaise des eaux s'inquiètent de l'absence de plan de prévision des prélèvements et de volumes (nouvelles constructions et Aquariaz). Sans estimation de l'augmentation de la consommation il est difficile de répondre précisément à cette hypothèse. Mais dans un contexte de changement climatique on peut se demander si la ressource en eau sera suffisante pour satisfaire l'ensemble des usages.

- 3^{ème} hypothèse : Le captage de l'eau pour l'alimentation des canons à neige se fait à partir de plusieurs sources. Associé à une pression démographique élevée en saison hivernale qui coïncide avec la période d'étiage des sources et des cours d'eau, cela diminue localement et temporairement la ressource disponible pour les différents usages.

Cette hypothèse est à nuancer. L'augmentation de la fréquentation touristique en période hivernale entraîne un accroissement de la consommation d'eau potable. Cette période est également caractérisée par un étiage marqué des cours d'eau à régime nival de montagne. La ressource en eau disponible est donc théoriquement plus faible en cette saison. Si l'on ajoute à cela la pression exercée par les prélèvements pour la production de neige, l'impact sur la disponibilité de la ressource pourrait être important mais uniquement dans le cas de prélèvements directs sur les cours d'eau comme sur la station de Champéry. En effet, le volume global de la ressource est difficilement quantifiable et les prélèvements se font au jour le jour pour la production de neige. Cependant, cela n'a pu être vérifié par des données mesurées sur le terrain. Dans le cas d'un partage d'une même ressource (lac 1730

¹⁴ Sur la base d'une consommation de 3500 m³ d'eau par hectare pour une surface totale enneigée de 9000 hectares.

dans la station d'Avoriaz), la production de neige ne peut expliquer à elle seule la baisse de la ressource disponible dans le lac. Il a été constaté au cours de cette étude une diminution de la hauteur d'eau dans le lac de quelques mètres en fin d'hiver. Mais il a été démontré que seuls, les prélèvements pour l'enneigement ne pouvaient expliquer cette baisse. C'est bien le cumul des usages (ici les prélèvements pour la production de neige et ceux pour la production d'eau potable) qui explique la diminution de la ressource du lac. En effet, la valeur cumulée des prélèvements en fin de saison est relativement importante ; elle atteint par exemple 160 889 m³ en 2010-2011 et 105 967 m³ en 2011-2012 (trois remplissages au cours de la saison). Cependant, il faut préciser que le marnage du lac induit par ces prélèvements reste relativement faible. La variation relevée la plus forte étant de 2.23 mètres sur les cinq mois de l'hiver 2010-2011, l'impact sur la ressource globale reste faible. Car il faut rappeler que le volume total du lac est de 60 000 m³.

- 4^{ème} hypothèse : L'intensité de ce nouvel usage qu'est la production de neige peut créer des conflits d'usage avec les autres utilisateurs de la ressource et des pénuries d'eau.

Cette hypothèse n'est vérifiée que pour un seul cas connu. Pour le reste elle est infirmée. En effet, la station des Gets partageant une même ressource pour la production de neige et l'alimentation en eau potable a connu en 2007 un conflit d'usage autour de cette ressource et une pénurie d'eau engendrant l'alimentation en eau potable de la commune par des camions. C'est le seul cas à notre connaissance où la production de neige a clairement été identifiée comme étant responsable de cette pénurie. D'après la définition qui peut être donnée d'un « conflit d'usage » - « la superposition d'usages autour d'une même ressource, qui implique que certains usages ne sont pas pleinement alimentés » (APTV, 2008) -, alors la situation des Gets peut être apparentée à un conflit d'usage. Il faut préciser que l'alimentation en eau potable avait été privilégiée et la production de neige immédiatement stoppée.

Dans le cadre de notre étude, aucune situation de pénurie d'eau et de conflits d'usage n'a pu être relevée. Le partage de la ressource du lac 1730 sur la station d'Avoriaz se fait selon un accord commun de la société gestionnaire du réseau d'eau potable (la Lyonnaise des eaux) et la société de remontées mécaniques d'Avoriaz. En cas de baisse significative de la ressource du lac, les responsables de la Lyonnaise des eaux nous ont assuré que la priorité sera toujours donnée à l'alimentation en eau potable de la station. De plus, un instrument de mesure de la hauteur d'eau du lac a été installé depuis 2010 par la Lyonnaise des Eaux afin de contrôler les variations du niveau du lac, de mieux gérer la ressource et d'éviter les situations de conflits. Des situations de pénuries et de conflits semblent peu probables dans l'état actuel des choses ; cependant, la séparation des réseaux est à privilégier dans l'intérêt de tous.

- 5^{ème} hypothèse : Le risque concerne principalement les conflits d'usage autour du secteur de la production de neige et celui de l'alimentation en eau potable de la station.

Cette affirmation est à nuancer. L'approvisionnement en eau potable et la production de neige sont les deux principaux secteurs prélevant dans la ressource des stations de montagne durant la saison hivernale. En cas de baisse de la ressource, le non approvisionnement en eau potable de la station serait particulièrement problématique et aurait des retombées économiques négatives pour la station. La situation la plus à risque concerne donc ces deux usages et plus particulièrement les stations utilisant le réseau AEP pour l'approvisionnement des canons.

La production de neige d'après un réseau d'eau potable ne concerne que 5 % des installations en France (2 % sont concernées par un couplage prélèvement réseau AEP et retenue, et 3 % sont concernées par des prélèvements uniquement dans le réseau AEP). Il existe 2 systèmes de prélèvements dans le réseau AEP. Un premier système consiste à capter les trop-pleins de réservoirs. Ce système ne présente donc pas de risque car le branchement s'effectue en sortie du réseau AEP. Un second système consiste à partager un même réservoir, comme c'est le cas dans la station d'Avoriaz. Dans ce cas, un accord est passé entre la société gestionnaire de la production d'eau potable et la société des remontées mécaniques. Le risque réside essentiellement dans la gestion qui est faite de la ressource. Mais, rappelons-le, les gestionnaires ont réaffirmé l'évidence de la priorité donnée à l'alimentation en eau potable. Rappelons également qu'à ce jour aucune situation de conflits n'a été relevée exceptée dans la station des Gets en 2007.

- 6^{ème} hypothèse : Les captages réalisés par les divers secteurs, que ce soit l'alimentation en eau potable, la production de neige, la production hydroélectrique, l'irrigation ou d'autres usages touristiques de l'eau (golf...) se font sans concertation et répondent aux besoins propres à chaque secteur.

Cette affirmation se vérifie selon certains modes d'approvisionnement. Dans le cas des prélèvements pour la production de neige, point central de notre étude, ceux-ci sont bien réalisés au jour le jour en fonction des besoins de production (réapprovisionnement du manteau neigeux dans certains secteurs) et des conditions climatiques favorables à la production. En effet, certaines conditions climatiques doivent être réunies pour lancer la production (température ambiante de l'air à -1°C, peu de vent, hygrométrie de l'air inférieure à 50 %) ; celle-ci n'est donc pas possible certains jours.

Le dialogue entre les différents acteurs à l'échelle locale ne se fait pas toujours. Lorsque les prélèvements pour l'enneigement se font directement dans le réseau de surface (cours d'eau et lac) comme à Champéry, les captages sont réalisés sans concertation avec les autres usagers de l'eau (eau potable, hydroélectricité à l'aval et

milieu naturel). A l'inverse, lorsque les prélèvements se font au sein d'un même réservoir comme à Avoriaz, les discussions entre les gestionnaires à l'échelle locale sont indispensables pour gérer au mieux cette ressource. Des accords, parfois informels, sont passés entre les différents acteurs, entre la société des remontées mécaniques et le gestionnaire de l'eau potable à Avoriaz. La société des remontées mécaniques est alors abonnée au service de distribution au titre d'utilisateur industriel de la ressource. Il en est de même dans le cas du partage de la ressource d'un réservoir hydroélectrique, pour lequel les différents acteurs signent une convention de partage de la ressource pour une durée de plusieurs années. Cette convention stipule les conditions de partage, les volumes pouvant être dérivés ainsi que les indemnités à verser au concessionnaire.

Que ce soit à Champéry ou à Avoriaz, cette gestion de la ressource avec ou sans concertation n'a jamais posé de problèmes. Mais jusqu'à présent la ressource a toujours été suffisamment abondante pour satisfaire l'ensemble des usages. Et les accords ou arrangements locaux lorsqu'ils existent ont toujours su trouver jusqu'à présent une réponse à leurs besoins. Il peut s'agir d'une réponse technique (instrumentalisation du bassin versant pour mesurer la ressource comme dans le lac 1730 à Avoriaz, mise en place de nouveaux captages, construction de retenues collinaires...), ou bien d'une réponse administrative (concession d'utilisation de l'eau d'une retenue hydroélectrique...). Cependant, la limite de la ressource doit être posée dans les années à venir en considérant les projets de développement des surfaces enneigées et des capacités d'accueil touristique des stations. L'eau est bien une ressource renouvelable mais elle est aussi une ressource épuisable à l'échelle locale d'une station ou d'un bassin versant de montagne au pas de temps court de la journée ou du mois.

- 7^{ème} hypothèse : Les retenues collinaires ont un impact sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant.

Cette hypothèse est partiellement affirmée. A l'échelle d'une année, les retenues collinaires ont un impact très faible sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant. En effet lors du remplissage de la retenue au printemps et en été en préparation de la saison d'hiver, l'eau issue des écoulements est retenue jusqu'à l'hiver où elle est redistribuée sous forme solide par le biais de la production de neige. Cette eau est restituée à l'écoulement au printemps de l'année suivante au moment de la fonte du stock neigeux. La retenue d'eau du lac 1730 fonctionne sur le même principe que les retenues collinaires. Elle est remplie une première fois au printemps et en été. L'eau y est stockée jusqu'à l'hiver où elle est ensuite redistribuée pour la production de neige et la production d'eau potable. L'eau sous forme de neige retournera aux écoulements le printemps suivant. L'eau potable est envoyée à l'usine des eaux usées de Morzine Vallée d'Aups à 9 km de l'endroit où elle a été pompée. Elle sort donc de notre bassin d'étude.

Au regard des résultats, l'impact du lac 1730 sur les écoulements de la Dranse reste faible. Dans cet exemple, le trop-plein du lac joue un rôle très limité car il détermine une faible partie de l'écoulement de la Dranse de Sous-Saix à l'aval du lac. En effet, lorsque le niveau du lac est supérieur au trop-plein, l'eau s'écoule en direction du cours d'eau, en revanche lorsque le niveau du lac est inférieur, les écoulements deviennent faibles voire nuls à l'aval. Ainsi, en hiver, les écoulements de la Dranse de Sous-Saix ne sont plus alimentés par le lac car les nombreux pompages en amont (pour la production de neige et la production d'eau potable) entraînent une baisse du niveau du lac sous le trop-plein. Mais du fait des apports des différents affluents, la variation du débit induite reste peu visible et dépend essentiellement des conditions climatiques (fonte du manteau neigeux et précipitations). En effet, le débit de la Dranse n'est pas nul même lorsque le niveau du lac se trouve sous le trop-plein. En février 2012, le niveau du lac est bien inférieur au trop-plein (moins de 12,90 m), mais les écoulements moyens journaliers sont supérieurs à 330 l/s avec un pic le 19 février à presque 700 l/s. Les écoulements de la Dranse proviennent donc des différents affluents alimentés par la fonte (légère hausse des températures, 0°C) et les précipitations (pic journalier à 10 mm). Le lac joue donc le rôle d'un bassin tampon qui limite les impacts directs des prélèvements sur les écoulements. En revanche pour des cours d'eau au débit plus important pour lesquels dans des conditions naturelles avant aménagement un écoulement minimum est toujours maintenu, l'impact de ces retenues peut être plus grand sur le milieu.

- 8^{ème} hypothèse : La neige artificielle est un élément majeur du cycle hydrologique naturel. On peut ainsi parler d'un cycle hydrologique artificiel. Et on peut envisager une modification spatio-temporelle du cycle naturel.

Cette hypothèse est à regrouper avec l'hypothèse précédente. Mais s'il est difficile de répondre à cette hypothèse, nos recherches ne traitant pas explicitement de cette question, il est important de rappeler que l'alimentation des canons se fait soit par prélèvement direct, soit par pompage dans des réserves déjà existantes. Ce dernier point a été abordé dans l'hypothèse précédente. Dans le cas de prélèvements directs dans les cours d'eau, les captages sont réalisés au cours de l'hiver. Mais les prélèvements pour la neige à l'échelle d'une journée ou à l'échelle mensuelle restent relativement faibles par rapport au volume global des écoulements (moins de 7 %).

Au printemps, lors de la fonte des neiges, cette eau immobilisée pendant la saison d'hiver, retourne globalement au cours d'eau. Il faut rappeler que la fonte de ces importants stocks neigeux peut être décalée de trois semaines par rapport à la fonte de la neige naturelle, ce qui a un impact sur la reprise de la végétation. Mais ce décalage n'a pas d'impact sur les débits à l'échelle d'un bassin versant bien plus vaste que la zone de production de neige. Les impacts sont principalement liés aux transferts entre sous bassins versants élémentaires, du fait des lieux de prélèvements qui diffèrent souvent des lieux de production de neige. Le cycle naturel peut donc en être modifié spatialement et temporairement sur les petits cours d'eau

de montagne. Or sur le bassin d'Avoriaz, les prélèvements et la production de neige se font au sein du même bassin versant. De plus, la part de ces prélèvements reste relativement faible à l'échelle du bassin versant de la Dranse de Sous-Saix (généralement moins de 10 % des écoulements). Selon P. Paccard (2010), les impacts des prélèvements ne sont plus significatifs lorsque la taille du bassin versant dépasse 50 km². Cependant notre étude montre qu'à l'échelle de petit bassin versant (11 km²) les impacts sont tout autant limités sur le régime des cours d'eau, qui connaissent des débits faibles voire nuls (étiages) en hiver. En revanche si l'on considère les prélèvements totaux dans le lac 1730 (neige artificielle et eau potable), ceux-ci correspondent durant les mois d'hiver à environ 20 % des écoulements mensuels, et ne sont de ce fait pas négligeables. C'est donc davantage l'accumulation des usages en hiver qui peut entraîner une modification des écoulements à l'aval. Cependant, nous avons vu que ceux-ci dépendent principalement des conditions climatiques (hausse des températures, précipitations) et donc de l'apport des différents cours d'eau à l'aval de l'exutoire du lac 1730. Le débit de la Dranse au niveau de la sonde des Prodains reste peu modifié par ces différents usages.

Finalement l'anthropisation du bassin versant n'est pas réellement liée à la modification du fonctionnement hydrologique mais davantage aux nombreux aménagements visibles et non visibles (lac de retenue, canons, conduites d'air et d'eau) présents dans le bassin.

- 9^{ème} hypothèse : L'impact de la production de neige sur les hydrosystèmes est important, notamment par les captages directs dans les écoulements de surfaces réalisés durant les étiages hivernaux entraînant une baisse significative du débit en aval pouvant engendrer des conflits entre l'amont et l'aval d'un bassin versant.

Cette hypothèse est à nuancer. Que ce soit par captages directs ou indirects (retenues d'altitude) dans les cours d'eau, les prélèvements pour l'enneigement soustraient une partie des écoulements naturels. Cependant les volumes retenus restent relativement faibles en comparaison du volume global des écoulements à l'échelle de la saison. A l'échelle de la journée, ces prélèvements pour la production de neige sont plus conséquents pouvant atteindre plusieurs dizaines de milliers de mètres cube (10 187 m³ le 24 janvier 2011). Par rapport aux volumes écoulés dans le bassin versant de la Dranse de Sous-Saix (11 km²) ces prélèvements sont de l'ordre de 7 % des écoulements à l'échelle des mois d'hiver. Mais ces conclusions sont surtout à nuancer en fonction de la taille du bassin versant considéré. Selon l'étude de P. Paccard, les prélèvements à Orcières-Merlette représentent plus de 27 % des écoulements théoriques du Drac Noir sur les mois d'hiver (novembre à mars) pour un bassin versant de 6.4 km². A Courchevel, les prélèvements représentent moins de 9 % des écoulements mensuels du bassin versant (26 km²). A l'échelle de l'ensemble des prélèvements (neige et eau potable), ceux-ci peuvent entraîner une faible baisse du débit. Cette baisse reste limitée car la Dranse de

Sous-Saix est alimentée par de nombreux cours d'eau à l'aval du lac 1730. Cependant elle peut avoir, en hiver, des répercussions sur les activités économiques dépendantes directement des volumes écoulés, telles que la production d'ardoise dans la vallée de la Dranse de Sous-Saix. A plus petite échelle, celle de la Dranse de Morzine puis celle des Dranses, nous n'avons pas relevé d'impacts liés à ces prélèvements. De manière générale, plus les prélèvements sont effectués dans de petits bassins versants sur des cours d'eau aux débits naturels faibles, plus les impacts sur les écoulements peuvent être importants. Cela dépend également des volumes prélevés. A l'échelle de petits bassins versants en période d'étiage, les impacts hydrologiques peuvent être conséquents mais à l'échelle de grands bassins versants ils restent relativement faibles.

La notion de conflit est également à nuancer. Les conflits existants aujourd'hui opposent essentiellement les producteurs de neige aux détracteurs divers. Dans la réalité, à l'échelle de grands bassins versants, les risques de pénuries et donc de conflits entre l'amont et l'aval semblent relativement faibles tant les prélèvements pour l'enneigement sont faibles. Il n'y a eu jusqu'à présent aucun antécédent de conflits entre l'amont et l'aval et cela semble peu probable dans le contexte actuel. Les études à l'échelle locale des impacts des prélèvements sur la ressource et sur les écoulements (en terme qualitatif) doivent être encouragées afin d'ouvrir les discussions et de clarifier cette pratique (ce qui limiterait les polémiques).

- 10^{ème} hypothèse : Le cadre légal est insuffisant.

Cette hypothèse peut être confirmée si elle est prise dans sa globalité. Même s'il n'existe pas de cadre légal propre à la production de neige, les réglementations existantes encadrent particulièrement bien les prélèvements d'eau et les constructions associées aux installations de production de neige. L'instauration d'un débit réservé ou d'un débit minimum biologique est imposée par la loi sur l'eau de 1992. Les ouvrages de retenues sont concernés par cette loi. Mais dans la réalité, le contrôle sur le terrain du respect de ces débits n'est pas fait. Pour le Lac 1730, ce débit réservé n'est pas maintenu, puisque le cours d'eau connaît une longue période d'étiage en hiver (débit nul). Cependant, dans le cadre de petit cours d'eau de montagne comme la Dranse de Sous-Saix, le débit réservé n'a pas vraiment de sens, car ces cours d'eau connaissent naturellement des débits d'étiage en hiver. En termes de ressource en eau, en France, à l'échelle du bassin versant, le schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) aide à une utilisation rationnelle de l'eau. Pour tous projets d'installation ou d'extension d'équipements pour l'enneigement une analyse des besoins, un bilan des ressources sollicitées et des volumes d'eau utilisés en fonction des périodes, et une simulation du fonctionnement en période de pénurie hivernale sont réalisés. Mais les installations de production de neige ayant été construites avant la mise en place de ces SDAGE, ces analyses n'ont pas été réalisées. Les Schémas d'aménagement et de gestion

des eaux (SAGE), document de planification de la gestion de l'eau à l'échelle d'une unité hydrographique cohérente (bassin versant, aquifère...) se mettent progressivement en place, avec un intérêt de plus en plus grand à la problématique de l'enneigement artificiel. A ce jour, un seul SAGE, le SAGE Drac Romanche a établi un schéma de conciliation de la neige de culture avec les milieux et les autres usages de l'eau à l'échelle des différentes stations du domaine (Sepia conseil, 2007). Un second SAGE, celui de l'Arve est actuellement en train de se mettre en place. Il n'en existe pas encore pour notre bassin d'étude. En ce qui concerne les prélèvements, ceux-ci sont réglementés par la loi sur l'eau du 30 décembre 2006 qui impose également le maintien d'un débit réservé dans les cours d'eau à l'aval d'aménagements.

Des limites à ce système peuvent être relevées. D'une part, les réglementations ou les outils de planification (type SAGE) spécifiques à la ressource en eau pourraient être développés. D'autre part, ces réglementations ne sont pas toujours appliquées. En Haute-Savoie, entre 2006 et 2009, ces débits à respecter ne l'ont pas été par deux fois. Les contrôles sont difficiles du fait de la localisation des sites de prélèvements souvent à des altitudes élevées et peu accessibles à cause de la neige.

En Suisse, selon les réglementations, un débit minimal doit être maintenu dans le lit des rivières et des ruisseaux après prélèvements (d'après la loi fédérale sur la protection des eaux du 24 janvier 1991 ; RS n°814.20). Dans le Valais, un plan directeur appelé Fiche de coordination D.10 a été institué. Le but de cette fiche est de définir les principes et la procédure à suivre lors de l'installation d'enneigement technique. L'exploitation des installations doit entre autre respecter un calendrier de production (de début novembre à fin mars), limiter l'enneigement aux zones appropriées et garantir des ressources en eau suffisantes pour couvrir l'ensemble des besoins de la population. La station de Champéry respecte ce calendrier de production (de novembre à mars). Cependant les valeurs de production de neige et de prélèvement n'étant pas mesurées et conservées, et en l'absence d'étude sur les ressources et les besoins à l'échelle locale, il apparaît pour l'instant impossible de garantir des ressources suffisantes pour la population. A l'échelle des Portes du Soleil, une planification globale a été mise en place en 2006 afin de planifier de nouvelles installations en tenant compte équitablement des intérêts de chacun.

Toutes ces réglementations, qu'elles soient françaises ou suisses, semblent suffisamment développées pour réglementer convenablement la production de neige. Une limite pourrait être formulée. En effet, il existe de nombreuses réglementations à différentes échelles nationale, régionale, départementale et communale pour la France, nationale, cantonale et communale pour la Suisse. Ces différentes échelles entraînent une sectorisation des lois qui complique leur mise en application et le contrôle de leur application. Les données réunies par les différents organismes sont souvent peu échangées entre les divers échelons, ce qui complique

là encore les vérifications. Une seule et même structure administrative devrait être définie pour assurer l'ensemble des contrôles.

- 11^{ème} hypothèse : la pérennité de ce système se pose surtout en vue du changement climatique annoncé.

Cette hypothèse est à fortement nuancer. La première partie de l'hypothèse se confirme mais nous ne sommes pas en mesure de répondre à la seconde partie. La neige artificielle était au départ utilisée comme un avantage sur le marché de l'économie du ski. Aujourd'hui, de nombreuses stations sont équipées de canons à neige. Il s'agit surtout d'un produit permettant d'atténuer les variabilités interannuelles des conditions neigeuses et d'améliorer la qualité de l'offre ski. Mais il est impossible de savoir si les domaines skiables l'utilisent aujourd'hui délibérément pour lutter contre les effets du changement climatique.

Les conditions nécessaires à la production de neige sont au cœur des questionnements sur le changement climatique. Ainsi, pour lancer la production, il faut une température de l'air ambiante inférieure à -1°C et une ressource en eau suffisamment abondante. Notre zone d'étude a été marquée ces derniers hivers par des températures élevées et des précipitations neigeuses plus faibles, limitant l'enneigement naturel. Cependant, la production de neige a été possible et a permis de maintenir une couche neige au sol suffisante sur toute la durée de la saison. Mais des études de ces changements à l'échelle des stations manquent sérieusement pour évaluer les limites de l'enneigement. Nous ne sommes pas en mesure d'affirmer ou de réfuter la pérennité de ce système en fonction des changements du climat.

En effet, la question de la pérennité de la production de neige se pose et reste entière. Des changements de la température de l'air et du volume de la ressource disponible seront inévitables, mais dans quelle proportion ? Ces changements affecteront la production de neige. Le nombre d'heures favorables à la production diminuera considérablement passant en dessous des 500 h (Bonriposi, 2013). La modification de ces conditions climatiques sera un facteur limitant à la production mais le sera-t-il partout ? Ces changements ne seront pas identiques dans toutes les stations car ils dépendent de l'altitude et de la localisation géographique des stations. En effet, comme le précise l'OCDE (2007), les différences climatiques, en termes de température, de précipitations (solides ou liquides), sont grandes entre les massifs. Ainsi le climat de la Haute Maurienne assez sec (vallée intra-alpine du département de la Savoie) contraste avec les précipitations abondantes que l'on peut retrouver sur l'ensemble des massifs préalpins des départements savoyards : Chablais, Bauges et Chartreuse. De plus, l'altitude d'un domaine skiable (définie par la moyenne altitudinale entre le point haut et le point bas d'un domaine), et plus précisément l'altitude de la majeure partie du domaine (qui peut en réalité se trouver soit à haute altitude et de ce fait s'affranchir du risque d'un faible enneigement à basse altitude, soit à basse altitude ce qui augmente sa vulnérabilité) varient fortement d'une station à une autre. Mais de manière générale, il semblerait que les stations de basse et moyenne altitudes comme Champéry et Avoriaz seront plus

affectées que les stations de haute altitude. Enfin les échéances temporelles de ces changements sont fortement discutées par les scientifiques, même si aujourd'hui les stations de ski sont encore performantes sur un plan économique. Des études locales plus approfondies devront être réalisées rapidement avant tout nouveau projet d'enneigement artificiel ou d'extension du réseau existant afin de limiter les risques en termes d'investissement.

6.2 DISCUSSION DES RESULTATS

6.2.1 Des risques limités

Cette étude a mis en avant la superposition des usages pour la production de neige et la production d'eau potable en période d'étiage hivernal. Les conclusions ne montrent pas aujourd'hui de risques de conflits ou de pénuries importantes à l'échelle d'un petit bassin versant de montagne. La thèse de P. Paccard sur la gestion de l'eau en montagne et plus précisément dans le cadre de l'utilisation de neige de culture démontre également qu'à une échelle locale, il n'y a jusqu'à présent pas eu de conflits d'usages sur la ressource en eau. En effet, les acteurs locaux de la production de neige et ceux de la production d'eau potable dialoguent et concilient leurs intérêts en particulier lorsqu'un réseau d'alimentation en eau potable est utilisé et que le gestionnaire du domaine skiable est abonné au service de distribution au titre d'utilisateur industriel de la ressource. En cas de baisse significative de la ressource en période d'étiage, la priorité sera toujours donnée à la production d'eau potable. Cette recommandation est d'ailleurs stipulée par l'ANMSM (2007).

Nous avons pu le vérifier en début d'hiver 2012, le niveau du lac 1730 est alors très bas et le peu de précipitations ne permettent pas une recharge rapide. La production de neige est alors stoppée pour favoriser la production d'eau potable. La société de remontées mécaniques a ensuite pu reprendre sa production courant décembre et début janvier lorsque le lac a retrouvé son niveau initial de 13,19 m. Cependant, il faut insister sur l'absence de réglementation et de lois spécifiques à l'enneigement artificiel associées à une gestion parfois informelle de la ressource entre les diverses institutions qui complique cette gestion et accroît le risque de conflits d'usage. De plus, nous avons mis l'accent sur le manque de données et d'informations disponibles pour la réalisation d'une étude précise sur les besoins et la disponibilité de la ressource en eau en station de moyenne montagne. Cela avait d'ailleurs déjà été constaté dans divers travaux de recherches sur la ressource en eau en montagne (Charnay, 2010 ; Paccard, 2011 ; Bonriposi, 2013). La connaissance sur les hydrosystèmes de montagne et sur les petits cours d'eau en tête de bassin versant est insuffisante. Quand aux données sur les besoins de production de neige et sur les prélèvements divers, elles sont souvent connues par les gestionnaires de domaines skiables mais à une échelle plus vaste elles ne sont pas communiquées aux services de l'Etat et plus précisément aux Agences de l'eau. Il n'y a donc pas de centralisation des données comme le mentionnent Badré et al. (2009), ce qui

permettrait de réaliser de meilleures analyses. Ce point a d'ailleurs été mis en avant par une étude du Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement des territoires : « les prélèvements sont effectués sans connaissance des débits réels et sans analyse des conséquences » et « le suivi et le contrôle des volumes prélevés dans la ressource semblent déficients » (MEEDDAT, 2009).

Une étude sur la station de Méribel a démontré qu'en l'absence de retenues collinaires, au pas de temps du mois d'hiver, le rapport des prélèvements sur la ressource représente 61 %, ce qui est particulièrement important. Sur des données annuelles l'impact des prélèvements semble très faible, inférieur à 5 % alors qu'il est extrêmement pénalisant sur le pas de temps des mois d'hiver (Palazot, 2011). En effet, dans le cadre de notre étude, nous avons pu constater que les mois d'étiage hivernaux sont les plus sensibles aux prélèvements et notamment lorsque ces prélèvements se font au sein d'une ressource unique. Ainsi, ce manque de données et de réglementations peut être particulièrement problématique pour les stations dont un même lac ou une même retenue collinaire alimentent en eau la production de neige et d'eau potable. En effet cette configuration est plus sensible au risque de conflits d'usage.

Figure. 148 Démission du président-directeur de la SAGETS aux Gets. (Le messager du Chablais 1^{er} février 2007).

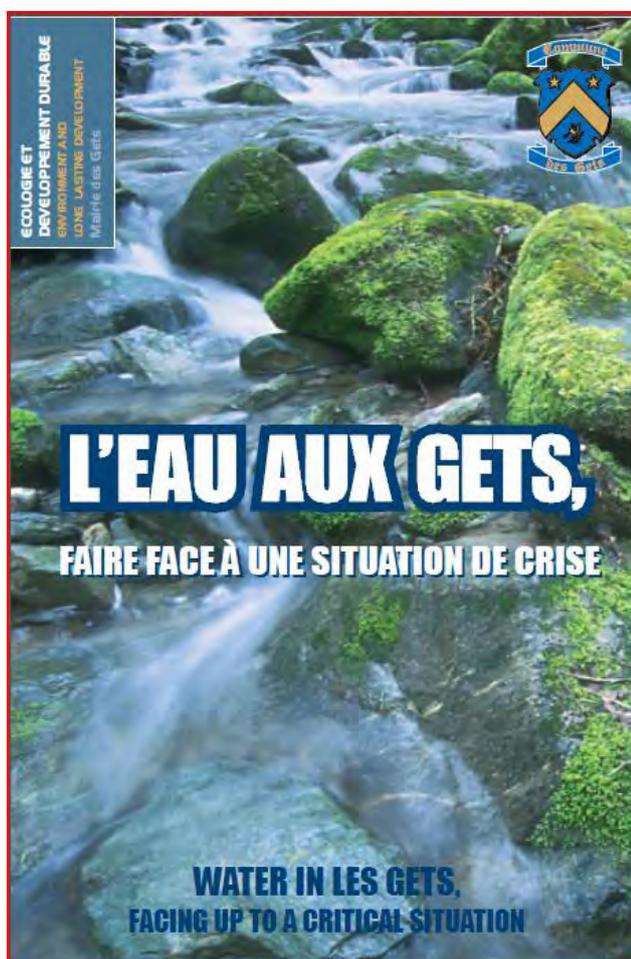


Ce fut le cas aux Gets, station voisine des Portes du Soleil. Au cours de l'année 2007, les conditions climatiques étaient peu favorables à la recharge des ressources. Durant l'hiver, les précipitations neigeuses bien insuffisantes ont entraîné une forte production de neige artificielle, fragilisant considérablement la ressource en eau. Le faible apport des précipitations en fin d'hiver n'a pas permis de recharger ces

réserve, et au cours de l'été la ressource était bien insuffisante pour alimenter en eau potable l'ensemble de la station, qui a dû recourir à quatre méthodes d'urgence. Dans un premier temps, durant quelques semaines, la commune des Gets fut approvisionnée par camion citerne. Dans un second temps, pour approvisionner la commune, une pompe de secours mise en place pour accéder à une source supplémentaire, une bêche d'eau potable étalée pour réceptionner l'eau de pluie et de fonte au pied d'un versant et une unité mobile d'ultrafiltration pour potabiliser l'eau ont été installées. C'est véritablement le seul cas connu de conflit entre la production de neige et l'approvisionnement en eau potable. Suite à cet événement, le directeur de la société des exploitants du domaine skiable démissionne (Fig. 148) et le maire de la commune des Gets stoppe les autorisations de permis de construire sur une période de 2001 à 2008 afin de ne pas augmenter la consommation d'eau potable pour laquelle la ressource est déjà insuffisante. Ces autorisations ont été de nouvelles délivrées par suite de la réélection du maire en 2008 (Fig. 149). Bérengère Charnay mentionne également des pénuries d'eau en période touristique à Taninges et Verchaix mais la production de neige n'en est pas forcément responsable comme il a été plus clairement démontré pour la station des Gets (Charnay, 2010).

Figure. 149 Brochure « l'eau aux Gets faire face à une situation de crise » distribuée par la mairie en 2007. (Mairie des Gets, 2007).

Dans cette brochure la mairie explique cette situation par le développement rapide de l'urbanisme, l'augmentation de l'activité touristique et l'enneigement artificiel. Cette brochure a pour objectif de rassurer la population en exposant les actions menées par la mairie pour limiter la durée de cette pénurie et les risques qu'elle se reproduise à l'avenir. Ces actions sont les suivantes : recherche de nouvelles sources gravitaires et de points d'eau souterrains, projets de retenues collinaires et projets d'exploitation des nappes souterraines. Cette brochure s'accompagne de recommandations pour les résidents afin de diminuer la consommation d'eau potable.



Les prélèvements d'eau pour la production de neige sont globalement compatibles avec les autres usages au pas de temps annuel et à l'échelle de grands bassins versants. Au pas de temps des mois d'hiver et à l'échelle de petits bassins versants de montagne, il faut être vigilant, car même si la situation ne semble pas problématique dans la station d'Avoriaz, l'étude de P. Paccard (2010) montre qu'à l'échelle temporelle d'un jour d'étiage et en prenant en compte l'hypothèse maximaliste d'un volume d'eau nécessaire à l'alimentation de l'ensemble des installations de neige, la production de neige représenterait une part importante des ressources sur le bassin versant du Doron de Bozel à sa confluence avec l'Isère.

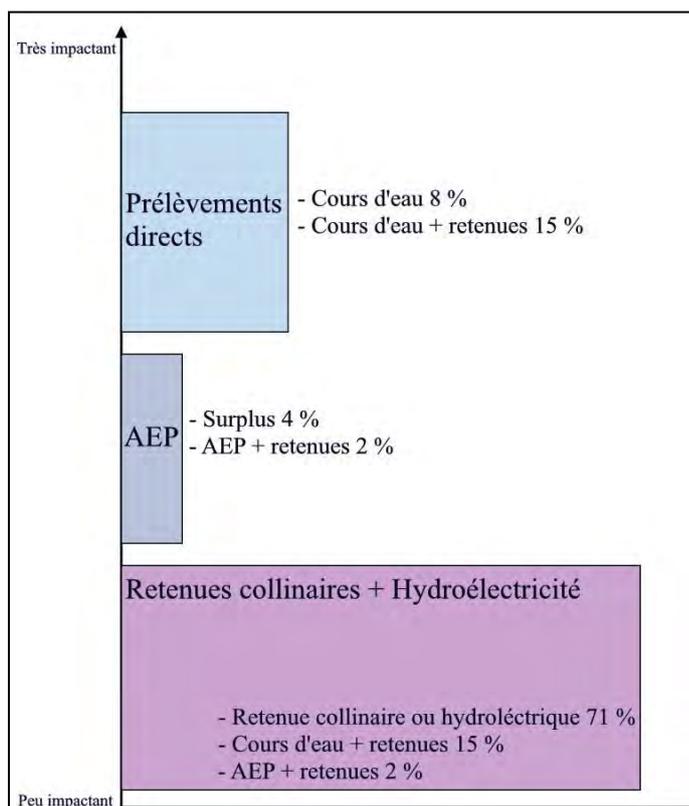
6.2.2 Le rôle des modes de prélèvements

Les lieux de prélèvements jouent aussi un rôle important sur les volumes prélevés. P. Paccard a réalisé un classement des modes d'alimentation allant du moins impactant au plus impactant (Fig. 150).

Ce classement est le suivant :

- Réseau hydroélectrique ou barrage
- Retenue d'altitude
- Réseau AEP
- Prélèvement direct dans les eaux de surface ou souterraine

Figure. 150 Les modes de prélèvements en France pour la production de neige.



Les valeurs en pourcentage correspondent au nombre d'installations de ce type en France, d'après les données d'Atout France (2009)

6.2.2.1 Les prélèvements AEP

Il existe deux sous catégories de prélèvements AEP. Le réseau de production de neige peut se brancher sur le trop-plein, ce qui limite le risque de conflit car le trop-plein n'est connecté au système de production de neige que lorsque le réseau d'eau potable est en surproduction. Il existe aussi des configurations où le branchement est directement effectué sur le réseau de distribution d'eau potable. L'opérateur du domaine skiable doit alors être abonné au service de distribution. C'est ce second système que l'on retrouve à Avoriaz. Les risques de conflits sont plus importants et « les modalités de prélèvements doivent être précisément définies entre le gestionnaire du service de distribution et le producteur de neige pour éviter tout risque de production de neige au détriment de l'approvisionnement en eau potable des populations » (P. Paccard, 2011). P. Paccard recommande d'ailleurs de séparer dès que possible les deux réseaux. En effet, l'exemple d'étude d'Avoriaz et le cas de la station des Gets nous montrent que l'utilisation d'une même ressource pour satisfaire les usages de la production de neige et d'eau potable peut conduire à des situations de pénuries. Cependant, il faut relativiser ce propos car à ce jour il n'existe qu'un seul cas de conflit avéré.

6.2.2.2 Les prélèvements directs dans les cours d'eau

Les pompages directs dans les écoulements de surface sont les plus impactants sur l'hydrosystème, d'autant que ces prélèvements s'effectuent au jour le jour. Ils sont encore très fortement utilisés, surtout en Suisse, notamment dans la station d'étude de Champéry. Des mesures permettraient de quantifier l'impact, notamment avec le milieu naturel, mais rares sont les stations à effectuer des relevés. C'est d'ailleurs pour cette raison qu'il nous a été impossible d'effectuer une étude détaillée sur la station de Champéry pour laquelle aucun relevé des pompages n'a été effectué. Pour limiter les impacts et mieux gérer la ressource, les retenues collinaires sont aujourd'hui privilégiées que ce soit en France ou bien encore en Suisse où de nombreuses stations, comme Champéry, doivent construire dans les années à venir les retenues collinaires qui permettront de stopper la totalité des prélèvements directs dans les écoulements de surface et les lacs.

6.2.2.3 Les retenues collinaires

L'utilisation de retenues d'altitude est le système le plus développé aujourd'hui en France avec près de 60 % des installations reliées à une retenue d'altitude ou un réseau hydroélectrique. En Suisse en revanche, les prélèvements dans les cours d'eau dominent.

Les retenues sont aujourd'hui privilégiées en France mais aussi en Suisse car elles permettent de pouvoir bénéficier d'un débit instantané important en période d'étiage

hivernal. Il existe aujourd'hui près de 73 ouvrages en Savoie et Haute-Savoie d'une capacité de 400 000 à 404 000 m³ et à une altitude moyenne de 1750 m (32 ouvrages en Savoie et 41 ouvrages en Haute-Savoie) (Direction départementale des territoires de la Savoie, 2011). En 2009, le stockage total dans ces retenues est de 3 667 764 m³ (2 086 564 m³ en Savoie et 1 581 200 m³ en Haute-Savoie) (DDEA 73 et DDEA 74, 2009). D'après la Direction Départementale de l'Équipement de la Haute-Savoie (DDE 74), les projets de constructions de retenues sont nombreux. Près de 18 projets de retenues collinaires ont été déposés en 2008 pour un stockage total de 760 000 m³ d'eau ; la plupart de ces projets sont en construction ou ont vu le jour ces dernières années. La retenue d'Avoriaz en fait d'ailleurs partie.

6.3 DES RISQUES FUTURS

Même si la situation actuelle ne peut être qualifiée de situation à risque, cette situation doit être surveillée. Comme le souligne Bérengère Charnay (2010), le système de gestion actuel ne semble pas être en mesure de répondre à une demande quantitative croissante.

Deux éléments mènent à s'interroger sur la durabilité du modèle touristique actuel. Le premier élément correspond à un développement important des stations de sports d'hiver, avec d'une part une augmentation croissante ces dernières années des surfaces équipées en neige et donc des volumes d'eau mobilisés et d'autre part une augmentation de la capacité en lits touristiques de la station et donc une augmentation de la consommation d'eau potable. Le graphique de l'évolution des volumes prélevés pour la production de neige à l'horizon 2025 a été réalisé sur la base de cette valeur de croissance des prélèvements et sur le principe que cette valeur moyenne restait inchangée chaque année. Nous n'avons donc pas tenu compte d'une possible accélération de la croissance de l'enneigement ou à l'inverse d'un ralentissement des investissements et de la production de neige. Cette augmentation des prélèvements a également été calculée pour la Haute-Savoie à partir du pourcentage de l'enneigement par massif fourni par Atout France. Ce pourcentage est de 19 % d'enneigement mécanique pour la Haute-Savoie. Sur la base d'une augmentation linéaire de cette valeur¹⁵, l'augmentation des volumes d'eau mobilisés à l'horizon 2025 serait particulièrement importante, pesant ainsi davantage sur la ressource disponible, que ce soit à l'échelle nationale ou à l'échelle de la Haute-Savoie (Fig. 151).

D'après une étude du ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, par le biais de questionnaires auprès des gestionnaires de stations, certaines stations françaises prévoient d'accroître l'enneigement mécanique et d'atteindre 30 à 40 % de la surface des pistes

¹⁵ Ce qui ne sera probablement pas le cas. Il faut donc prendre ces valeurs qualitativement.

enneigées artificiellement (MEEDDAT, 2009). Sur la base de cette même augmentation, la station de Champéry et plus généralement les Stations suisses devraient connaître cette même tendance à l'évolution (Fig. 152).

Figure. 151 Evolution des volumes prélevés pour la production de neige à l'horizon 2025 pour la France et la Haute-Savoie. (D'après les données d'Atout France, (modifié)). Sur la base de 19% de surfaces enneigées en Haute-Savoie et 35% en Savoie.

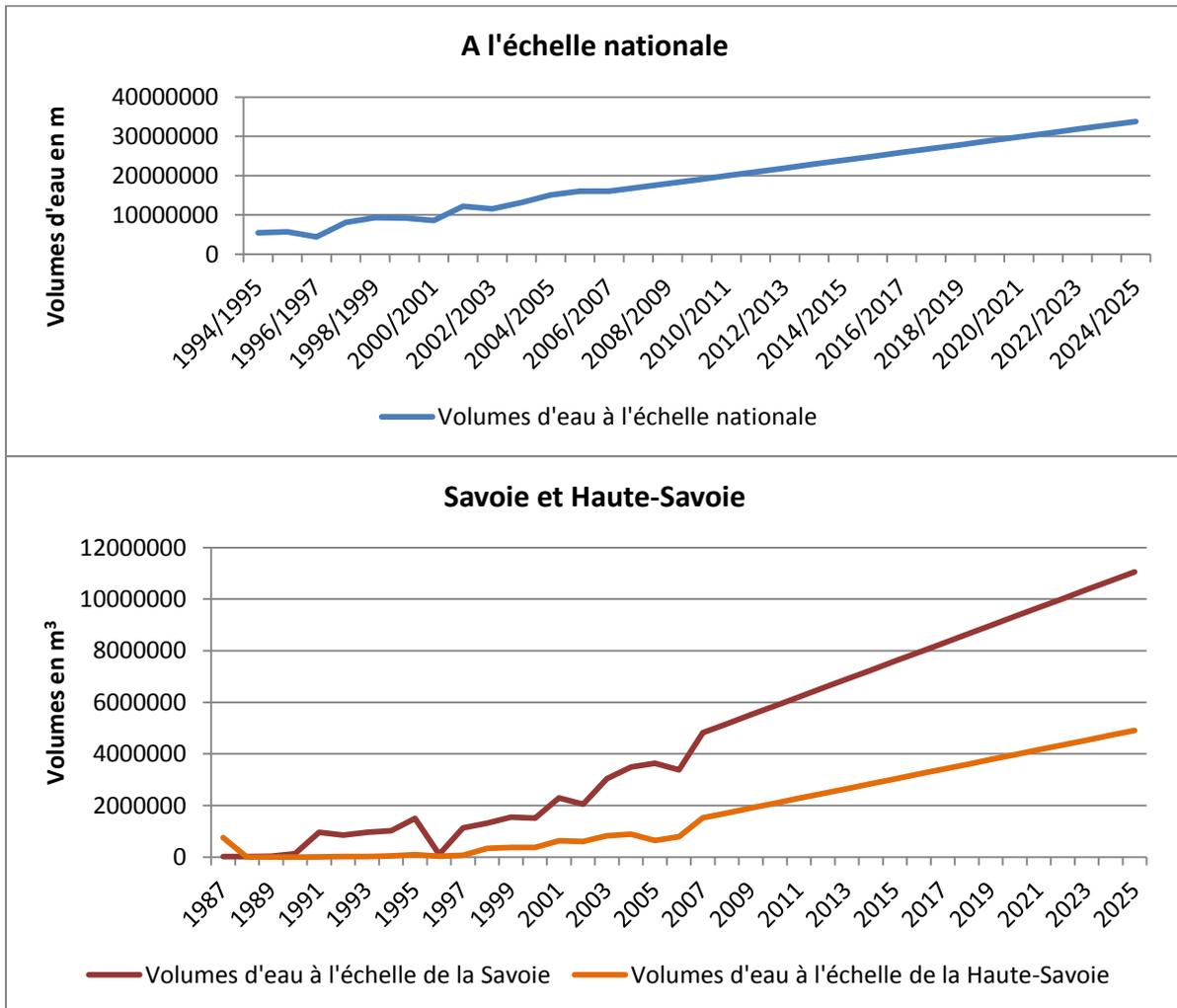
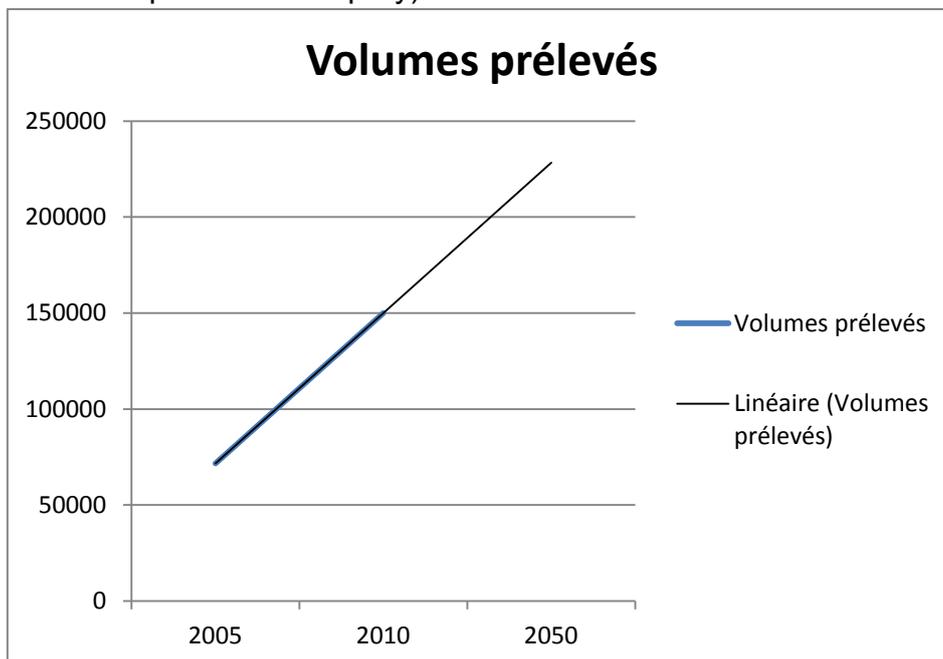


Figure. 152 Evolution des volumes prélevés pour la production de neige en Suisse pour la station de Champéry. (D'après les données de la Société des remontées mécaniques de Champéry).



6.4 QUELQUES RECOMMANDATIONS.

6.4.1 Quelques propositions pour une meilleure gestion des ressources

Les installations de production de neige ont désormais un intérêt particulier qu'il faut prendre en compte. A la fois nécessaire aux stations pour maintenir et valoriser l'activité économique liée au ski, et fortement controversée par les diverses organisations de protection de la nature et les médias, cette activité n'est à ce jour pas suffisamment encadrée juridiquement. Pourtant fortement consommatrice en eau, elle fait partie intégrante des activités d'une station de moyenne montagne. Toutes les utilisations de la ressource par ces diverses activités doivent s'accorder pour ne pas créer de situations de pénuries et de conflits d'usage. Même s'il n'existe pas à ce jour de situations connues de pénuries d'eau et de conflits autour de la ressource, la mobilisation d'un grand volume d'eau sur une période très courte rend la gestion difficile et peut engendrer des situations à risques. Ce risque est d'autant plus grand que les pompages s'effectuent dans les mêmes réserves que celles destinées à l'alimentation en eau potable de la station. Il apparaît donc essentiel de bien gérer la ressource en eau dans les années à venir, face à l'accroissement des espaces enneigés et de la station.

Dans ce sens quelques recommandations peuvent être faites :

- Mener une réflexion à différentes échelles.

Il s'agit de mener une réflexion sur les différents usages de l'eau à l'échelle du bassin versant ou de la station. En effet, pour mieux gérer la ressource, il paraît essentiel d'améliorer les connaissances en termes de potentiel hydrique en tête de bassin versant et de disponibilité de la ressource. Il faut également améliorer l'analyse des besoins pour chacun des usages et la variation des usages en fonction des périodes de l'année. Il s'agit d'évaluer la pression sur la ressource induite par ces prélèvements en tête de bassin versant afin d'obtenir une adéquation entre ressource disponible et besoin en eau. Pour ce faire, l'accès aux données, particulièrement difficile dans le cas de notre étude, devrait être facilité.

Un bilan à l'échelle de la station permettrait d'évaluer l'impact des prélèvements sur la production d'eau potable et sur le volume global de la ressource (à l'échelle de plusieurs sous-bassins) (Tab. 5). Cela fait d'ailleurs partie des recommandations élaborées dans le cahier des bonnes pratiques pour la culture de la neige édité dans le cadre du site pilote « l'eau en montagne » (société d'économie alpestre de Haute-Savoie, 2010) : « *Mettre en œuvre un schéma de gestion de l'eau à l'échelle du bassin versant* » (recommandation N°2).

Tab. 5 La ressource en eau sur Avoriaz. Connaissances et lacunes des volumes mis en jeux.

	Ressource disponible		Prélèvements		Sorties	
	Précipitations	Stockages anthropiques	Neige artificielle	Eau potable et loisirs	Écoulements aux Prodains	Stockages dans le sol et pertes par évaporation
A l'échelle du bassin versant de la Dranse de Sous-Saix	Sur le BV du lac 1730 : plus de 20 millions de m ³ .	Lac 1730 : 60 000 m ³ (3 remplissages possibles sur une saison)	Neige : entre 30 000 et 120 000 m ³ par saison	Eau potable : entre 40 000 et 80 000 m ³ par saison	Environ 6,5 millions de m ³	?
A l'échelle des sous-bassins versants et du domaine skiable	Sur l'ensemble des sous-bassins de la station : ?	Autres stockages (2 retenues collinaires sur le domaine) d'un total de 90 000 m ³	Neige : ?	Eau potable : environ 300 000 m ³ Golf : ?		?
	Plus quantification des pertes par évaporation et du temps et volumes stockés sous forme de neige					

- Une meilleure collaboration entre les différents organismes et la transmission des données

Recommandation n°1 du cahier de bonnes pratiques pour la culture de la neige (Société d'économie alpestre de Haute-Savoie, 2010) : « *Echanger et collaborer pour préserver la ressource* ».

Le manque de transparence et de transmission des données qui constitue un frein aux études a souvent été mis en avant par divers auteurs (Paccard, 2011 ; Charnay, 2010). Il faut dans un premier temps améliorer le suivi des volumes prélevés (Badré, Prime, Ribière, 2009). Pour ce faire, il faut impliquer les opérateurs de domaines skiables, les gestionnaires de l'alimentation en eau potable, les élus, l'Etat et le Conseil Général. Cela passe par « l'information et l'implication des gestionnaires ou concessionnaires pour connaître leurs besoins ou leurs difficultés » (DDE74, 2008). De ce point de vue, plusieurs recommandations ont déjà été faites en France par le Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire : « faire effectivement appliquer les arrêtés du 11 septembre 2003 qui imposent la mesure ou l'évaluation des volumes prélevés dans la ressource en eau et la transmission des résultats au préfet [...] et de mettre en place un dispositif de télé déclaration annuelle des volumes prélevés » (Badré et al, 2009). Dans un second temps des réglementations ou des accords écrits pourraient être rédigés pour le partage de la ressource et dans l'éventualité d'une pénurie d'eau. Ou bien encore, « mettre en place un protocole commun sur les procédures à suivre en cas d'un manque d'eau avéré ou attendu ». Cela correspond à la première recommandation du cahier de bonnes pratiques pour la culture de la neige (Société d'économie alpestre de Haute-Savoie, 2010). En Suisse, les stations du Valais se soumettent déjà à la fiche de coordination D10 qui régleme les installations de production de neige avec pour objectif de limiter la consommation d'eau. La mise en œuvre reste cependant très relative et reste peu contraignante concernant les installations de production de neige. Cette fiche pourrait être complétée par une obligation de transmettre les informations relatives aux prélèvements entre les différentes activités et notamment entre les gestionnaires de la production de neige et ceux de la production d'eau potable. Des échanges d'informations et une collaboration entre les différents acteurs à l'échelle locale mais aussi régionale voire nationale semblent indispensables dans les années à venir.

Dans un contexte de changement climatique ou de développement des stations, « le recours à la réglementation et aux techniques pour arbitrer les usages, accroître la disponibilité des ressources et réduire les pollutions peut faire perdurer le système à court et moyen terme » (B. Charnay, 2010).

- Sensibiliser les citoyens à une culture du partage de la ressource et au système de production de neige

Depuis quelques années, des initiatives ont été prises par les sociétés de remontées mécaniques et les stations de ski pour sensibiliser et informer le grand public sur la production de neige. Dans ce cadre, des visites des usines à neige sont proposées. Les visites étant souvent réalisées par les nivoculteurs, il est important de préciser que l'information donnée doit être la plus proche possible en termes d'utilisation de l'eau et d'impact.

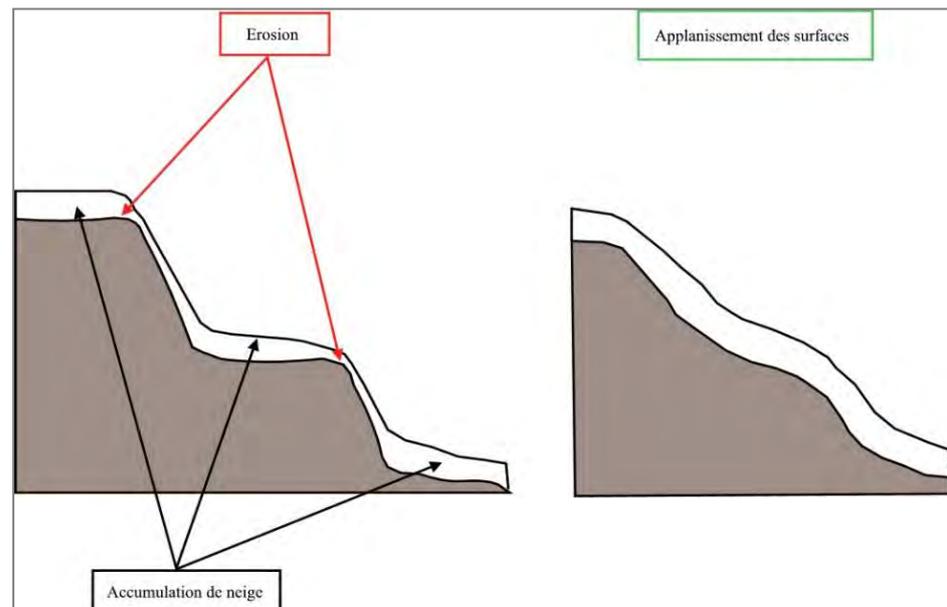
- Etre attentif aux débits réservés imposés par la loi sur l'eau et améliorer la réglementation existante

Ces débits réservés permettent de maintenir une continuité hydrologique dans les cours d'eau lors des étiages. Ce débit réservé n'est pas toujours respecté et les contrôles sont particulièrement difficiles du fait d'un accès contraignant des espaces de montagne en particulier en hiver. La réglementation existante pour l'enneigement artificiel pourrait être suffisante si elle était appliquée et contrôlée, ce qui n'est pas toujours le cas. Entre 2006-2009 en Haute-Savoie l'ONEMA a dressé six procès verbaux pour exploitation d'ouvrages sans autorisation, non respect des problèmes de remplissage et non respect des débits réservés. Dans les années à venir, il faudrait développer les contrôles en particulier ceux concernant les pompages dans la ressource et mieux réglementer les prélèvements dans le milieu. Les prélèvements directs dans les cours d'eau sont à surveiller plus particulièrement car selon une étude de Jean-Claude Domenego, du Club Alpin Français (2008), puiser dans les cours d'eau constitue un risque important dans un futur moyen de 10 ans. Il faut également surveiller les prélèvements dans une ressource partagée avec l'eau potable et réglementer le partage et les conditions d'arrêt des prélèvements.

- Améliorer le maintien de la neige au sol et limiter la production de neige de culture

En améliorant le maintien de la neige au sol, il est possible de réduire la quantité de production de neige de culture. Il s'agit principalement de mesures de correction du terrain. L'aplanissement des surfaces permettra en hiver lors du passage des dameuses d'étaler au mieux la couche de neige sur toute la surface du sol (Fig. 153).

Figure. 153
Schéma du rôle de l'aplanissement des surfaces.



Le stock de neige naturelle mais aussi artificielle est plus important dans les zones de replat, à l'inverse au niveau des ruptures de pente, le manteau neigeux est moins épais et est très sensible à l'usure liée au passage des skieurs. L'aplanissement a donc un double effet, celui de mieux préserver le manteau neigeux naturel et artificiel et donc de réduire la production de neige. De nombreuses pistes ont ainsi été aplanies sur la station d'Avoriaz depuis 2011 (Fig. 154).

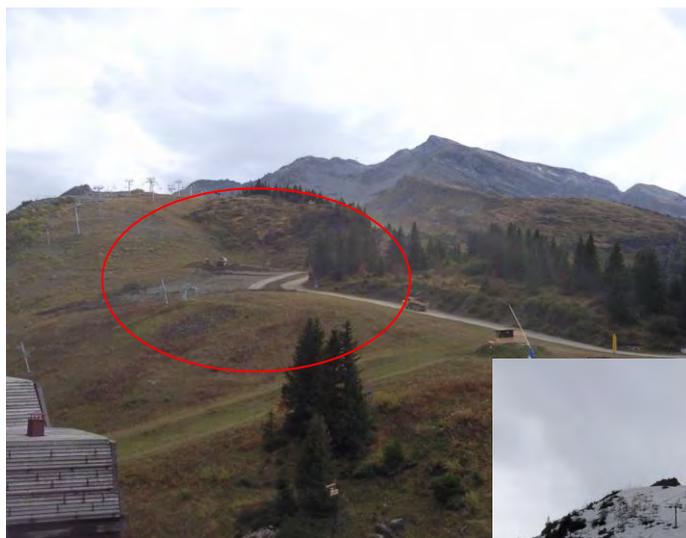


Figure. 154 Exemple d'aplanissement de pistes sur Avoriaz.

Pistes retour station, station d'Avoriaz. (Cliché : octobre 2010. E. Magnier,)

Photo prise en fin de saison suivant les travaux. On voit nettement que les travaux d'aplanissement ont permis un bon maintien de la couverture neigeuse. (Cliché : 24 avril 2011. E. Magnier).



Il peut s'agir également de mettre en place des barrières à neige qui permettent de limiter l'action érosive du vent et le déplacement de la neige hors des pistes. Certaines pistes très exposées aux vents sur la station d'Avoriaz en sont équipées (Fig. 155).

Figure. 155 Barrières à vent sur la piste d'Avoriaz.

*Piste de retour
à la station,
Avoriaz.*

Ces deux techniques, aplanissement des pistes et barrières à vent, permettent non seulement un meilleur maintien de la neige naturelle et limitent par conséquent la nécessité de produire en milieu de saison pour réapprovisionner le manteau neigeux. Mais il est très difficile de prévoir les conditions climatiques pour toute la saison et donc les besoins en production de neige. Souvent, une forte production est lancée en début de saison entraînant une perte par fusion alors que l'enneigement naturel aurait été amplement suffisant. Ce point a d'ailleurs été largement souligné lors du séminaire sur la neige artificielle organisé à Morzine en 2012 en collaboration avec l'université de Lausanne. Tous les responsables de domaines skiables se sont accordés à dire qu'il était très difficile de quantifier la « juste » production en début de saison.

Afin de limiter la production de neige en cours de saison, les stations s'équipent progressivement de nouvelles dameuses avec radar mesurant la hauteur de neige au sol. Cette technologie permet non seulement d'adapter le damage et de mieux répartir la neige sur toute la surface de la piste, mais elle permet également de limiter la production de neige au strict nécessaire. Verbier est une des premières stations à avoir équipé ses dameuses de géoradar dès 2006-2007. Cette nouvelle technologie a permis selon le directeur de la station E. Balet d'économiser 30 000 m³ d'eau pour une saison (soit environ 30 % du volume global nécessaire). Aujourd'hui, la station d'Avoriaz a investi dans ces dameuses. L'économie d'eau n'a pas été évaluée par la station car celle-ci s'est en parallèle équipée de nouveaux canons augmentant considérablement les prélèvements.

- Développer et favoriser les travaux de recherche dans ce domaine.

Recommandation N°10 du cahier de bonnes pratiques pour la culture de la neige (Société d'économie alpestre de Haute-Savoie, 2010). « *Initier des travaux de recherche autour de la culture de la neige* »

6.4.2 Le point sur les projets existants

Certains projets ont aujourd'hui vu le jour en France pour améliorer la gestion de la neige et certaines études ont conduit à des propositions de gestion très intéressantes. Une étude de Sébastien Palazot propose une réutilisation des eaux usées pour la production de neige (Fig. 156).

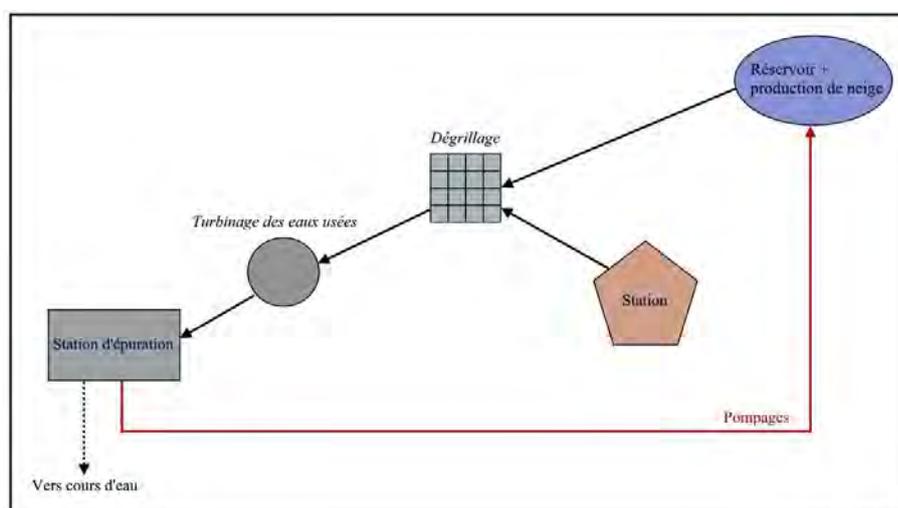


Figure. 156
Schéma de réutilisation des eaux usées pour la production de neige. (D'après Sébastien Palazon, 2011.(Simplifié)).

Il prend l'exemple de la station du Mont Buller en Australie dont le traitement des eaux usées permet de produire 70 000 m³ (S. Palozot, 2011). Les premières analyses sont plutôt concluantes. Mais en France aucune station de ski n'utilise ce procédé et des adaptations doivent être faites car les besoins en eau pour la production de neige sont importants. De plus, les STEP souvent situées à une altitude plus basse que les zones à enneiger posent le problème de l'approvisionnement des enneigeurs qui devrait alors se faire par pompage et acheminement de l'eau vers les hauteurs. Tout cela a un coût en termes d'installation et d'énergie. Il faut également tenir compte des dysfonctionnements possibles de la STEP qui entraîneraient alors une pollution de l'eau très problématique pour la production de neige. Pour pallier à ce problème la STEP ne doit pas être la seule source d'approvisionnement des canons à neige mais au contraire être perçue comme une ressource complémentaire. La technique sera mise en œuvre uniquement durant les mois d'hiver à forte fréquentation touristique car le débit d'eau traité dépend directement du débit d'eau arrivant à la STEP pour traitement, lui-même fonction du nombre de personnes en station. Mais ce procédé a fait ses preuves à l'étranger. Il a en effet permis de réduire voire même de remplacer entièrement les prélèvements dans le milieu pour la production de neige. Cela

permet de limiter les impacts de la production de neige sur la ressource en eau et les conflits d'usage. Les atouts sont bien réels en diminuant les prélèvements directs et répétés dans les eaux de surface ou les réserves d'eau potable durant la saison hivernale. Cependant une attention doit être portée sur les écoulements en sortie de STEP. Un débit minimum doit être préservé dans le cours d'eau afin de ne pas impacter trop fortement l'hydrosystème.

L'utilisation de l'eau des centrales hydroélectriques est également une bonne alternative. Ce procédé existe déjà en France dans les Alpes et les Pyrénées, mais également en Suisse et en Italie et tend à se développer. De nombreux projets d'accords sont aujourd'hui en cours. En effet, les prélèvements d'eau dans ces barrages hydroélectriques nécessitent un accord entre la société de remontée mécanique et EDF (Electricité de France) après négociation et bien souvent une indemnisation à verser au concessionnaire. Cet accord doit anticiper sur les besoins à venir pour organiser le partage de l'eau notamment dans le cas d'une pluri utilisation du barrage (neige, irrigation...). C'est ce qui s'est passé en 2003 lors du renouvellement de la concession du barrage de Bozel avec le domaine de Courchevel. Les destinations de l'eau de l'ouvrage ont été redéfinies, modifiant le cahier des charges de la concession (P. Paccard, 2011).

Sur un plan technique, la prise d'eau peut se faire en amont du réservoir du barrage, directement dans le barrage ou en aval de celui-ci. Il n'existe qu'un seul cas de pompage direct dans la retenue de barrage dans les Pyrénées (barrage hydroélectrique de Castillon alimentant la station de Mongie-Super-Barèges) (A. Marnezy, 2011). Ce système présente de nombreux avantages. Tout d'abord une disponibilité importante d'un grand volume d'eau en période d'étiage. Les retenues de barrages retiennent en effet des volumes conséquents sans comparaison avec les volumes nécessaires pour la production. Ainsi, au Mont Cenis en Haute Maurienne, le volume d'eau du barrage utilisé pour la production de neige correspond à 0.1 % du volume d'eau stocké dans la retenue (A. Marnezy, 2011).

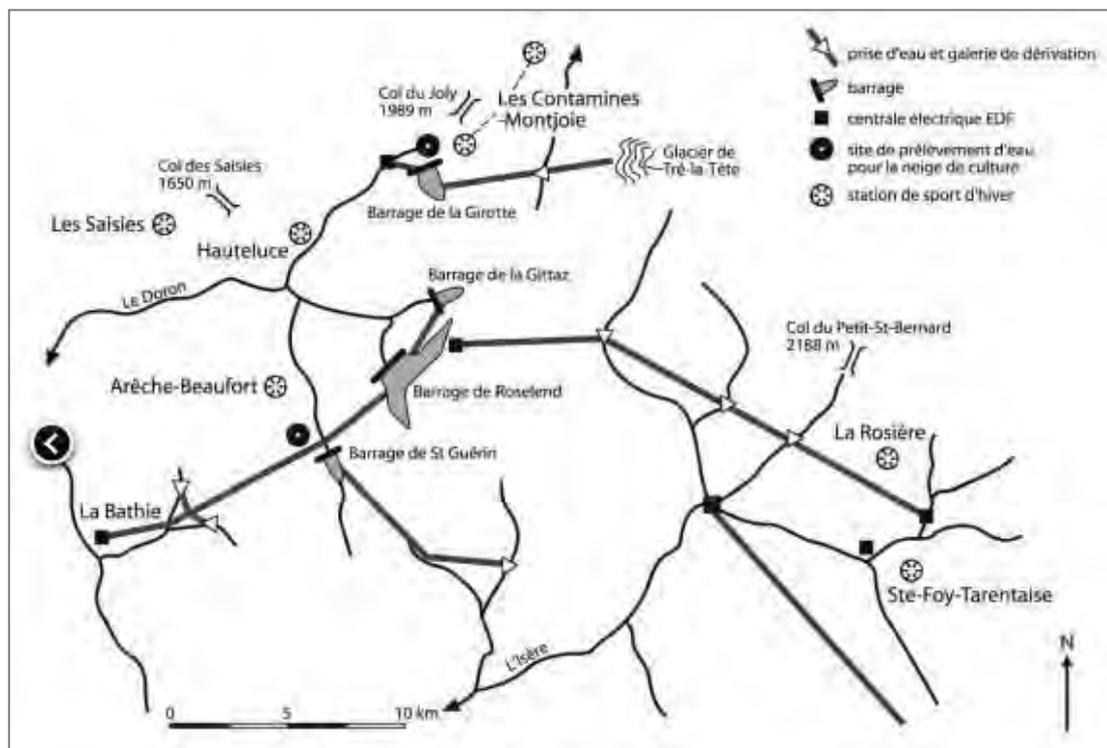
Cette eau possède toutes les caractéristiques nécessaires à la production de neige. Il s'agit d'une eau propre et dont la température est déjà basse (4 à 5°C). Ce procédé permet d'autre part un gain d'énergie non négligeable car il évite dans certaines stations les pompages. Dans le cas des barrages se localisant à des altitudes élevées, l'eau approvisionne les canons par gravité.

Des gains sont également réalisés en termes d'équipements (réseaux d'adduction d'eau, systèmes de captages...). En termes d'investissements, cette technique évite la multiplication de retenues d'altitude et les impacts environnementaux associés. Décrite par Alain Marnezy comme la solution la plus économique, elle n'est cependant pas adaptable à toutes les stations. Il faut en effet une coïncidence géographique entre la station de ski et l'équipement hydroélectrique. Le Beaufortin et la Maurienne ont un fort potentiel car la densité de stations et de barrages hydroélectriques est importante (Fig. 157). De nombreuses conventions sont actuellement en cours d'élaboration quand d'autres arrivent à échéance et devront

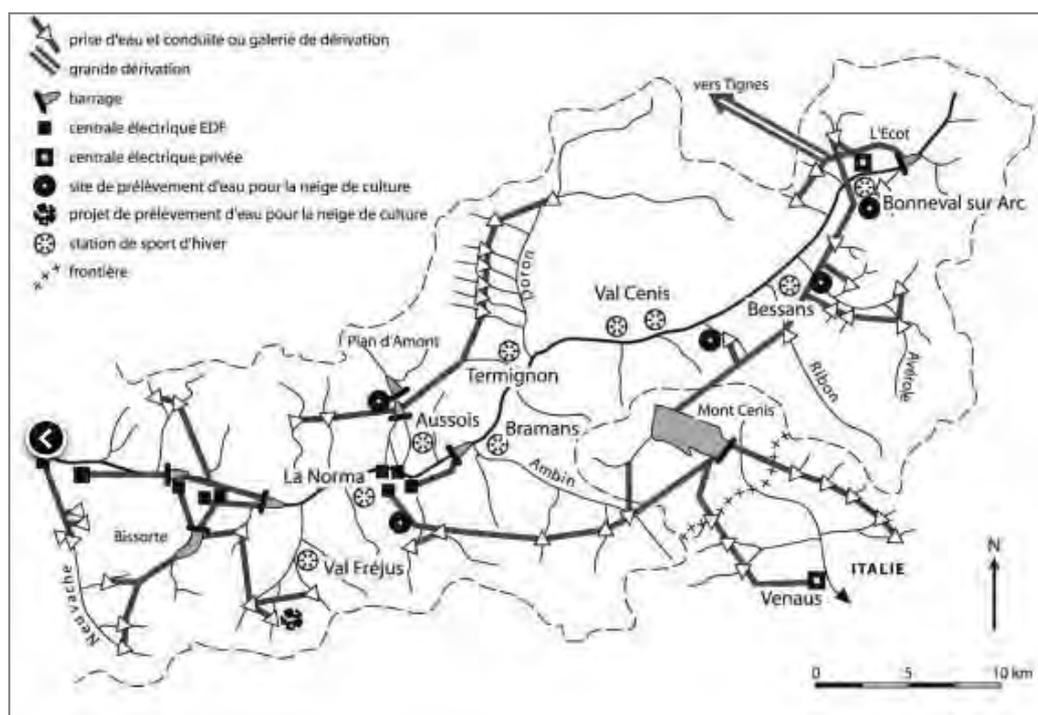
être renouvelées. Ces nouvelles conventions devront prendre davantage en compte cette nouvelle pratique en évaluant au mieux les besoins de production en neige de chaque station.

Figure. 157 Les équipements hydroélectriques et les stations de ski dans les massifs du Beaufortin et en Haute Maurienne. (D'après A. Marnezy, 2008).

Dans le Beaufortin



En Haute Maurienne

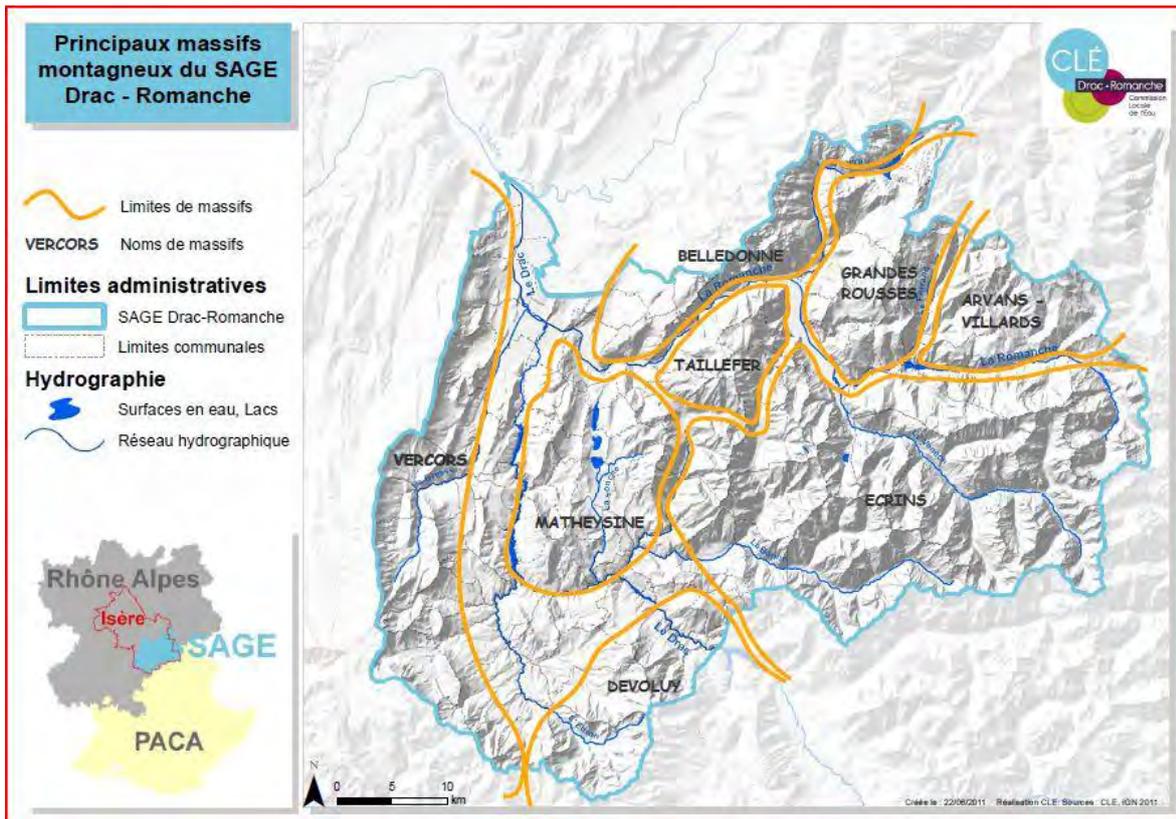


Nous détaillerons trois projets dont les résultats semblent être les plus pertinents à l'échelle du bassin versant.

6.4.2.1 SAGE Drac Romanche.

Le bassin versant du SAGE couvre une large partie du département de l'Isère et de grosses stations comme celles des 2 Alpes et de l'Alpes d'Huez... (Fig. 158). Voté par la Commission locale de l'eau du Drac et de la Romanche (CLE) le 27 mars 2007, le schéma d'aménagement et de gestion des eaux prévoit en matière d'enneigement artificiel une coordination des acteurs et la définition de règles encadrant la réalisation de retenues collinaires et leur gestion. Un schéma de conciliation de la production de neige de culture avec la ressource et les autres usages de l'eau a été intégré au SAGE. A l'échelle du massif alpin, ce schéma revêt un caractère pilote et est à notre connaissance le premier outil de planification de la gestion de l'eau.

Figure. 158 Carte du périmètre du SAGE Drac Romanche et des principaux massifs montagneux concernés. (D'après, Clé Drac Romanche, 2011).



Le principe de ce schéma est double, il s'agit d'éviter d'une part les risques de manque d'eau et d'autre part de protéger les milieux et les espèces. Le schéma doit permettre d'éviter les déséquilibres amont/aval entre les divers usages (production de neige ; eau potable ; industries ; hydroélectricité). Les enjeux pris en compte par les schémas sont les suivants :

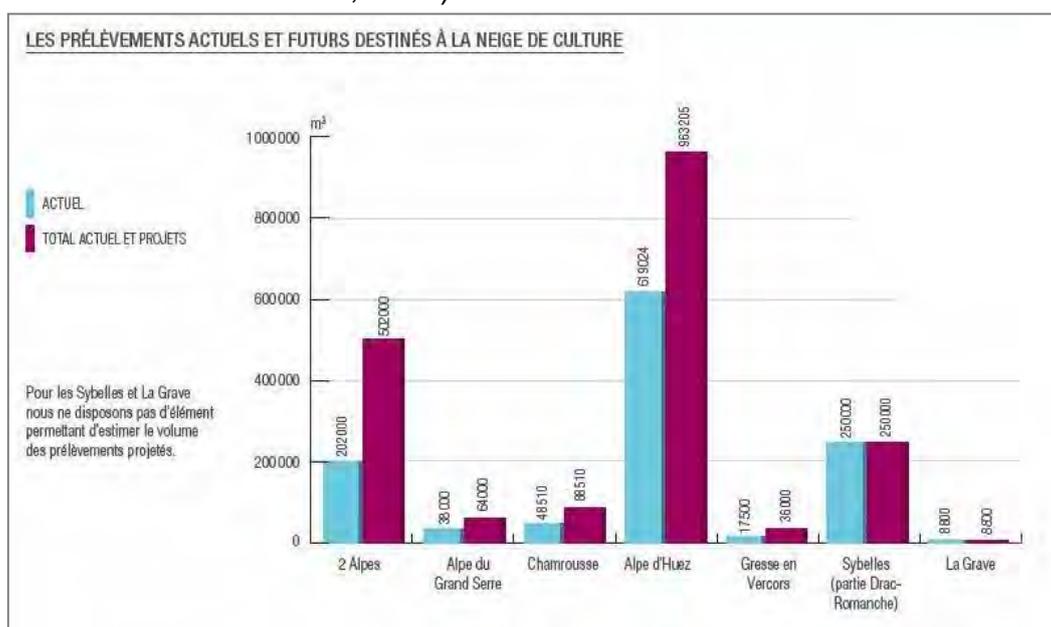
- La surveillance des effets de la retenue sur les milieux
- La surveillance des autres besoins en eau et assurer la primauté de l'usage alimentation en eau potable.
- Déterminer les modes de gestion des prélèvements pour garantir un bon état des milieux (en qualité et en quantité). Une carte pour l'amélioration du partage de l'eau en terme quantitatif a été élaborée
- La surveillance des ouvrages
- Des mesures de réduction des impacts
- Des mesures compensatoires telles que la restauration des zones humides

Chaque commune est libre de décider de la nécessité ou non de construire des retenues d'altitude. Mais tous les décideurs disposent d'informations précises et d'analyses effectuées pour chaque station afin d'éviter une multiplication non coordonnée des prélèvements d'eau, un manque d'eau potable à certaines périodes de l'année et la destruction de milieux ou d'espèces.

Chaque schéma se compose ainsi de trois éléments :

- Une étude des prélèvements actuels et futurs destinés à la neige de culture réalisée par les stations dans les massifs de l'Oisans, du Vercors, de Belledonne et de Chartreuse (Fig. 159).
- Une analyse des enjeux économiques autour de chaque domaine skiable : investissements, équipements du domaine en neige de culture, fréquentation, retombées économiques...
- Un guide précisant les projets de retenues d'altitude et accompagnant le dossier de demande d'autorisation ou de déclaration (imposé par l'article L214.2 du Code de l'Environnement).

Figure. 159 Les prélèvements actuels et futurs destinés à la neige de culture.
(D'après Clé Drac Romanche, 2012).

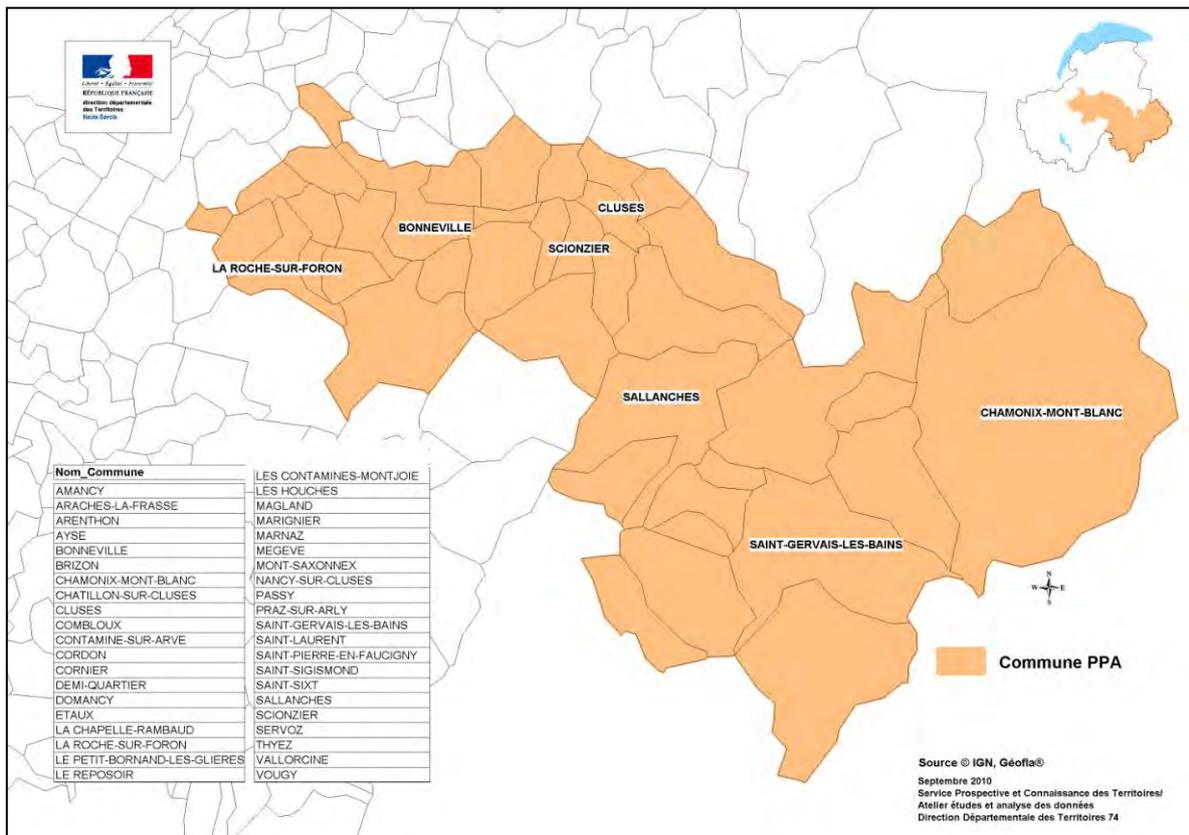


Ce schéma a été révisé en 2011. Les retombées positives de ce projet pilote devraient motiver d'autres territoires dont les enjeux sont semblables à élaborer ces mêmes schémas.

6.4.2.2 SAGE de l'Arve

Ce SAGE est en cours d'élaboration. Le périmètre a été établi en 2009, l'état initial et le diagnostic ont été validés en 2011. Sa superficie s'étend sur plus de 2164 km², soit plus de la moitié du département de la Haute-Savoie et comprend 34 domaines skiables sur plus de 2500 hectares (Fig. 160). Plus de 60 % de la superficie se localise à plus de 1000 m et 20 % à plus de 2000 m. De grandes stations figurent au sein du périmètre comme Chamonix, le Grand Bornant, Flaine et les Carroz. Les principaux cours d'eau concernés par ce Schéma sont l'Arve, le Giffre, le Borne, la Menoge et le Foron. La particularité de ce SAGE est qu'il est transfrontalier avec la Suisse. Des représentants de Suisse siègent donc à la CLE (canton de Genève, CIPEL et société d'électricité d'Emosson).

Figure. 160 Carte du périmètre du SAGE Arve. (D'après Clé Drac Romanche, 2012).



Les enjeux identifiés sont multiples. Le SAGE devra permettre d'apporter des réponses, de proposer des mesures réglementaires et des recommandations en

accord avec les acteurs de l'eau sur le territoire. Les enjeux qui concernent plus particulièrement l'enneigement artificiel sont les suivants :

- Mettre en œuvre une gestion globale à l'échelle du bassin versant. Cette étape passe par la sensibilisation, la pédagogie et la concertation entre les collectivités du territoire
- Anticiper l'avenir en intégrant des perspectives de développement touristique et les conséquences du changement climatique
- Garantir la satisfaction des usages et des milieux. La prise en compte de la ressource disponible est indispensable. Il faudra également restaurer les équilibres sur les secteurs déficitaires qui auront été identifiés.
- Améliorer la prise en compte de l'eau dans l'aménagement du territoire.

6.4.2.3 SRCAE. Schéma régional climat, air et énergie.

Ce schéma prend en compte le changement climatique et ses effets sur la neige de culture. Il s'agit d'un schéma très général dans lequel la neige de culture tient une forte place. Il est réalisé à l'échelle régionale. Plusieurs orientations sont définies par ce schéma :

- Préserver les ressources et les milieux naturels dans un contexte d'évolution climatique.
- Favoriser la recherche et l'innovation dans les domaines du climat, de l'air et de l'énergie.
- Animer, communiquer et informer pour une prise de conscience collective et partagée.

Pour ce faire, des prospectives sur l'enneigement et sur la disponibilité en eau seront réalisées à l'échelle des bassins d'offre touristique. Dans ce cadre, les déficits quantitatifs sur la ressource seront évalués. Enfin, une grande partie du schéma abordera le changement climatique et évaluera l'impact actuel et surtout futur de la production de neige sur le milieu à l'échelle des hauts bassins versants. Le schéma Rhône Alpes précise que l'adaptation des stations au changement climatique sera inévitable mais que l'enneigement artificiel ne doit pas être considéré comme une solution à long terme mais uniquement comme une aide à l'adaptation dans un court terme (SRCAE Rhône Alpes, 2011). Tous ces objectifs pour préserver le milieu devront être atteints d'ici 2020 et 2050 en fonction de la difficulté à mettre en place les objectifs.

6.4.2.4 A l'échelle locale

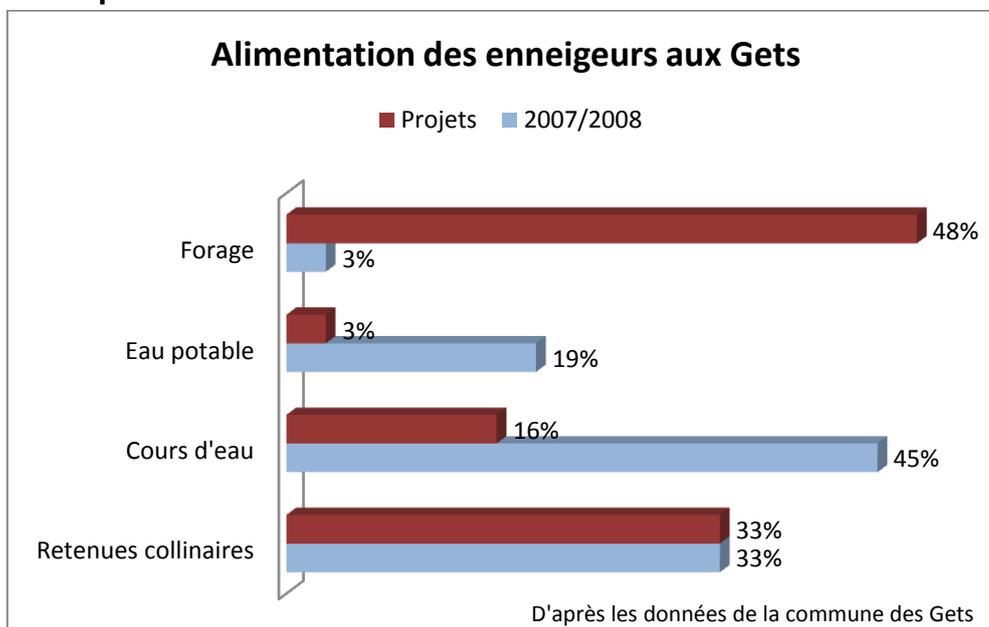
La station des Gets qui a déjà connu par le passé des situations de pénurie (hiver 2007) est très concernée par ces problèmes de gestion d'eau. Dans une brochure

publiée par la mairie en 2009, la commune s'interroge sur l'optimisation de la production de neige tout en tenant compte du milieu naturel.

« Les Gets doit aujourd'hui rechercher un compromis entre la nécessité de poursuivre l'exploitation et l'extension de ses installations de neige de culture, et son devoir à respecter le milieu naturel qui sert de support à ses activités. » (Mairie des Gets, 2009).

Pour optimiser la gestion de la ressource en eau, la commune des Gets a établi dans un premier temps un plan d'alimentation des enneigeurs. Ce projet vise à développer l'alimentation des enneigeurs par les forages et diminuer les prélèvements dans le réseau d'eau potable et les cours d'eau. Les prélèvements passeraient alors de 19 % dans le réseau AEP (saison 2007-2008) à 3 % (Fig. 161). Ce projet a vu le jour en 2008 et se met en place progressivement. Un appel d'offre a été lancé en juin 2012 pour l'agrandissement de la capacité de deux retenues collinaires existantes, celle du lac des Pêcheurs en vue d'atteindre une capacité de 100 000 m³ destinés en priorité à la neige de culture et celle du lac des Ecoles, à usage mixte, l'été pour la baignade et l'hiver pour la neige de culture. Sa capacité actuelle est de 20 000 m³, il s'agit d'augmenter sa capacité à 100 000 m³. La construction d'une nouvelle retenue est également en projet sur la commune de Verchaix, d'une capacité de 120 000 m³. L'appel d'offre a été lancé par la mairie des Gets car cette retenue alimentera en neige les pistes du domaine des Gets.

Figure. 161 Alimentation des enneigeurs en 2007/2008 et projets de modification par la commune des Gets.



Dans un second temps, la société des remontées mécaniques des Gets (la SAGETS) a établi un plan d'enneigement pour la saison 2007-2008 (Tab. 6). Les différentes pistes du domaine y sont répertoriées et classées selon la priorité d'enneigement. Ainsi, les pistes situées dans la partie aval du domaine (retour vers la station et pistes vertes (pour débutants)) appartiennent à la catégorie de priorité 1.

En cas de pénurie d'eau, l'arrêt de la production sera d'abord établi sur les autres secteurs. Les secteurs très fréquentés et les pistes de liaisons sont regroupés dans la catégorie 2. Enfin en catégorie 3 et 4, on retrouve les pistes localisées à des altitudes plus élevées, moins fréquentées et n'ayant pas d'intérêt stratégique.

Tab. 6 Les priorités d'enneigement pour la saison 2007-2008 sur le domaine des Gets. Exemple du secteur Chavannes. (D'après la Société de remontées mécaniques des Gets (SAGETS), 2009).

PLAN D'ENNEIGEMENT 2008 : priorités d'enneigement des zones actuellement équipées					
Massif des CHAVANNES					
Méthode de calcul :					
Le volume de neige est le volume de neige produit sur une période de froid moyenne : il correspond à 20 cm d'épaisseur de neige sur toute la surface enneigée.					
Le volume d'eau est le volume d'eau correspondant à la production de ces 20 cm de neige : il est égal à la moitié du volume de neige (avec 1 m ³ d'eau on produit environ 2 m ³ de neige).					
Pour calculer le volume d'eau nécessaire sur une saison on est parti du principe qu'il y a en moyenne 3 périodes de froid sur une saison pendant lesquelles on produit 20 cm de neige (soit 60cm sur une saison).					
PRIORITE 1	Zone enneigée	Surface projetée* (ha)	Volume de neige (m ³)	Volume d'eau (m ³)	Volume d'eau nécessaire sur une saison
	Carru	3,88	7768	3884	11652
	Vieux Chêne	4,15	8305	4153	12458
	Plateau de Gibannaz	5,33	10658	5329	15986
	Gentiane	6,54	13083	6542	19625
	Orchis Haut	0,83	1665	832	2497
	Plateau des Chavannes	4,53	9061	4530	13591
	Mélèzes Bas	3,77	7548	3774	11323
	Total priorité 1	29,04	58088	29044	87131
PRIORITE 2	Zone enneigée	Surface projetée* (ha)	Volume de neige (m ³)	Volume d'eau (m ³)	Volume d'eau nécessaire sur une saison
	Crocus + Bruyère (des Folliets à Gibannaz)	3,88	7766	3878	11633
	Plat de la Tête des Crêts	1,29	2583	1291	3874
	Violette (sauf bas)	2,63	5269	2635	7904
	Ambresalles Bas	2,52	5042	2521	7562
	Total priorité 2	10,32	20649	10325	30974
PRIORITE 3	Zone enneigée	Surface projetée* (ha)	Volume de neige (m ³)	Volume d'eau (m ³)	Volume d'eau nécessaire sur une saison
	Traversée gentiane Bruyère	0,83	1060	530	1589
	Ambresalles Haut	2,83	5652	2826	8477
	Violette Bas	1,29	2571	1286	3857
	Rhodos	0,95	1899	949	2848
	Bas du Ranfoilly	4,24	8482	4241	12723
	Total priorité 3	9,83	19663	9832	29495
PRIORITE 4	Zone enneigée	Surface projetée* (ha)	Volume de neige (m ³)	Volume d'eau (m ³)	Volume d'eau nécessaire sur une saison
	Rhodos Bas (partie)	0,87	1743	872	2615
	Total priorité 4	0,87	1743	872	2615
	Total	50,07	100143	50072	150215

Dans la station d'Avoriaz, un projet de schéma environnemental a vu le jour en juillet 2006. Ce projet doit permettre le développement de la station en termes d'infrastructure de ski, de logement touristique et d'activité dans un objectif de préservation du milieu naturel et des ressources. Les projets de développement des réseaux d'enneigement devront tenir compte de la préservation des ressources imposée par ce schéma. Ce projet comporte quatre volets : l'embellissement de la station, la réduction des sources de pollution, la prise en compte de l'environnement

dans les nouvelles constructions et la communication (Fig. 162). La mise en application a été faite dès 2010 et les nouveaux aménagements (Aquariaz) et nouvelles constructions en cours se sont conformés aux nouvelles règles.

Figure. 162 Projet de schéma environnemental d'Avoriaz. (D'après l'Office du tourisme d'Avoriaz, 2007).



6.4.3 Des adaptations à prévoir au changement climatique et ses conséquences sur l'activité ski.

Les études montrent que le changement climatique aura des effets sur les conditions de production de neige (augmentation des températures, diminution des précipitations neigeuses). La limite de fiabilité des domaines skiables devrait varier fortement, en particulier pour les stations de moyenne montagne. Ainsi d'après les études de l'OCDE (2007), la limite de fiabilité d'un domaine pourrait s'élever à 1350 m (pour 1°C supplémentaire), à 1500 m (pour 2°C supplémentaire) et à 1800 m (pour 3°C supplémentaire) d'ici 2050. Un rapport du Conseil général de l'environnement et du développement durable (Badré et al, 2009) stipule que les stations devraient déjà commencer à réfléchir à des solutions d'adaptation.

Plusieurs mesures d'adaptation ont d'ailleurs été proposées en conclusion d'études sur le changement climatique (Abegg, 2011, Agrawala, 2007 ; Dubois et al, 2006 ;

Mercalli, 2007 qui a proposé des solutions pour les Alpes). Ces mesures sont de deux ordres : les adaptations techniques et les adaptations de l'offre touristique.

Les mesures techniques proposées sont les suivantes :

- La gestion des pistes et de l'enneigement. L'objectif est de gérer le stock de neige qu'il soit naturel ou artificiel grâce à l'entretien des pistes (investissement dans des dameuses modernes équipées de gps), la plantation d'arbres pour maintenir des zones d'ombre sur les pistes, l'installation de barrières à neige...
- Préparation des pistes. L'objectif est de réduire la hauteur de neige minimum pour l'ouverture du domaine qui doit être de 30 cm. Lorsque les pistes sont couvertes de végétations hautes ou très escarpées, cette hauteur passe à 40 cm. Il s'agit donc d'aplanir les pistes, d'éliminer les obstacles sur les pistes (rochers ou végétation haute) et d'assécher les zones humides.
- Améliorer les choix lors de la création de nouvelles pistes. L'objectif est de concentrer les domaines skiables sur des zones privilégiées où la neige se maintient plus longtemps. Ainsi, les pistes doivent être prioritairement créées dans les zones exposées au nord, dans les parties des domaines situées en altitude et notamment sur les glaciers.

Les autres mesures proposées :

- Soutien financier. L'objectif est de soutenir l'exploitation des domaines skiables par des subventions, des crédits à des taux préférentiels et la participation à la construction de nouvelles installations (remontées mécaniques ou canons à neige) avec des fonds publics. Ces fonds permettraient également de couvrir les déficits éventuels, les réparations et le renouvellement du matériel.
- Diversification de l'offre touristique en hiver. L'objectif est de réduire la dépendance des stations à l'offre tout ski. Dans le cas d'un enneigement moins important, les activités telles que les randonnées en raquettes, la luge et la motoneige pourraient être proposées. Dans le cas d'une absence totale de neige, l'offre pourrait s'étendre au domaine de la santé (cures, spa...), au domaine culturel (visites historiques, musées..) ou encore aux congrès et séminaires.... Une diversification des activités sportives est également possible, comme proposer l'ouverture des pistes aux VTT en hiver, d'autant que les stations sont généralement déjà équipées pour l'été. Ainsi, durant l'hiver 2011 moins enneigé, la commune de Samoëns a ouvert une partie de son domaine aux VTT tout en conservant l'offre de ski sur les secteurs en altitude.

- Développement du tourisme sur les autres saisons. L'objectif est également de réduire la dépendance au tourisme d'hiver et plus particulièrement au tourisme du ski. Il s'agit de développer les activités et la diversité de l'offre durant les autres saisons. Ces activités pourraient être les mêmes que celles proposées plus haut pour la saison d'hiver.
- Vers un tourisme durable. L'objectif est d'informer sur le changement climatique et de proposer des actions pour limiter les pollutions. Les filières économiques régionales seraient renforcées (proposer des produits locaux) et les transports trop polluants seraient abandonnés.

Certaines études indiquent qu'un recours à l'enneigement artificiel peut compenser l'augmentation des températures (Scott et al, 2006, Teich et al., 2007). La production de neige sert aujourd'hui à pallier au manque de neige certaines années, principalement en début et en fin de saison. Elle s'avère être un outil efficace. Mais face au changement climatique, ces choix peuvent s'avérer risqués pour plusieurs raisons. Le premier risque est lié à la hausse des températures annoncée. Si les températures sont insuffisamment froides, la production ne peut se faire. Les installations en haute altitude semblent donc être les plus rentables sur le long terme. Le second risque est le manque d'eau nécessaire à la production. Ainsi la production de neige serait principalement impactée dans les stations de basse et moyenne montagne, en début et fin de saison. Mais de manière générale, pour l'ensemble des stations, le potentiel d'enneigement (le nombre d'heures par jour pendant lesquelles on peut produire de la neige) devrait se réduire. Il serait encore suffisant en terme de rentabilité jusqu'en 2030 ou 2050 selon les conditions climatiques locales et l'altitude (Abegg, 2011).

Il faut préférentiellement raisonner à des échelles de temps court (vingtaine d'années) qui correspondent au coût d'amortissement des installations. Les premières difficultés pour la production de neige étant annoncées pour 2030 selon certains auteurs, on peut se demander s'il est judicieux de lancer des projets d'extension des installations de production aujourd'hui. D'autant que pour compenser la diminution des périodes de production, il faudrait augmenter l'intensité de l'enneigement (produire plus de neige dans un temps réduit). Cela impliquerait une augmentation du nombre de canons donc de la consommation d'eau et d'électricité, ce qui aurait un coût non négligeable. Sans compter les volumes d'eau utilisés qui augmenteraient les risques liés à la ressource (pénurie, rivalités...).

Conclusion chapitre 6

Dans un premier temps, nous avons fait un point sur la situation actuelle de la production de neige et des prélèvements d'eau à l'échelle des deux pays étudiés, la France et la Suisse. Et nous avons défini les risques futurs liés à cet usage.

Toutes les études et les données obtenues pour les deux stations d'étude confirment la croissance de la production de neige et des prélèvements d'eau associés ces dernières années. Cette tendance devrait continuer dans les années à venir avec deux objectifs pour les stations, pallier aux variabilités climatiques et à l'usure du manteau neigeux qui devrait s'accroître du fait de l'augmentation de l'offre touristique. En effet, la station d'Avoriaz est un très bon exemple de la tendance actuelle des stations à se développer en termes d'offre d'activité et de capacité de logement touristique. La station d'Avoriaz va ainsi doubler le nombre de lits touristiques d'ici 2014. Elle propose aussi de nombreuses activités comme l'Aquariaz et des spas de luxe. La quantification des volumes d'eau nécessaire n'a pas été établie avant le début des travaux. Cette augmentation de l'offre touristique connue est de l'ordre de 8 % (offre d'hébergement) et la fréquentation touristique s'accompagne d'une croissance importante de la consommation d'eau à l'échelle de la station. Dans les années à venir, cela devrait peser sur la ressource globale en eau à l'échelle de petits bassins versants de montagne associés aux stations.

Cette augmentation des prélèvements pour la production de neige s'accompagne également d'un changement des modes de prélèvements. Si, il y a quelques années en France, les prélèvements s'effectuaient essentiellement dans les cours d'eau et les lacs, ce mode est aujourd'hui délaissé au profit de la construction de retenues collinaires. C'est en 2013 le principal mode d'approvisionnement des canons. En Suisse, l'approvisionnement est encore effectué par captage des cours d'eau et pompages dans les lacs. Mais les choses changent et des projets de construction de retenues collinaires sont en cours. En Savoie et Haute-Savoie, de nombreux accords sont établis entre les gestionnaires de centrales hydroélectriques et les sociétés de remontées mécaniques. Ces accords autorisent les prélèvements dans les retenues du barrage. Cette pratique est particulièrement bien encadrée. Enfin, le partage d'une ressource d'eau potable est moins répandu. Cette technique peut parfois être à l'origine de pénurie d'eau et de coupure d'alimentation en eau potable (Les Gets, 2007). De ce fait nous recommandons la séparation de ces deux usages dès que possible.

Dans un second temps, nous avons éprouvé les hypothèses de départ et proposé des solutions concrètes pour améliorer le système actuel et en particulier la gestion de la ressource en eau.

Les recherches menées sur les deux stations étudiées nous ont montré qu'un certain nombre de choses pouvaient être améliorées, d'un point de vue réglementaire, d'un point de vue de la production de neige et d'un point de vue de la gestion de l'eau. Ces propositions s'appuient sur des exemples concrets de Schémas directeurs

d'aménagement et de gestion des eaux et de Schémas régionaux climat air et énergie. Ces modèles portent sur trois axes majeurs :

- Renforcer le cadre de la pratique à l'échelle locale et régionale
- Améliorer la production de neige en limitant la surproduction
- Coordonner les besoins et les usages en améliorant la communication.

Certains de ces schémas ont déjà fait leurs preuves. Cette échelle du bassin semble être la plus adaptée à la gestion des ressources en eau.

A l'échelle locale des stations, des initiatives locales ont également vu le jour. Les communes et les sociétés de remontées mécaniques sont souvent à l'origine de ces initiatives, mais nous n'avons pas le recul et les données suffisantes pour en évaluer l'efficacité. A l'échelle locale, ces initiatives ont deux objectifs :

- Limiter la production de neige et la surconsommation d'eau en établissant des priorités
- Améliorer les modes de prélèvements en privilégiant les retenues collinaires.

Dans la continuité de ces initiatives, les propositions que nous avons faites ont pour objectif d'améliorer les systèmes de production de neige, de limiter la consommation d'eau et de mieux gérer le partage de la ressource. Il nous apparaît essentiel pour cela d'améliorer la communication entre les différents acteurs à l'échelle locale mais aussi le partage d'informations entre les différentes structures administratives à l'échelle régionale, voire nationale.

La production de neige est aujourd'hui devenue indispensable dans le cadre économique des stations. Il est donc important de sortir d'un débat pour ou contre la neige artificielle. Car la production de neige n'est pas un problème en soit mais l'utilisation qui en est faite peut devenir problématique dans certaines situations. Il est donc indispensable de mettre en place dès aujourd'hui des démarches constructives et réalistes qui tiennent compte des paramètres naturels du milieu, des données environnementales, des aspects économiques et des moyens techniques.

CONCLUSION PARTIE 2

L'analyse de ces deux domaines skiables nous montre plusieurs éléments importants dont on peut en retenir les enseignements et établir des propositions constructives.

Ces deux stations ont connu un développement important de leurs installations de neige ces dernières années. Apparue il y a 23 ans à Avoriaz et 25 ans à Champéry, la production devait servir à l'origine à réapprovisionner le manteau neigeux en début de saison ou en cours de saison lorsque la neige venait à manquer pour des raisons climatiques ou par usure du manteau liée au passage des skieurs. Elle se localisait alors sur les pistes de liaison et les pistes de retour vers la station les plus fréquentées. Mais depuis quelques années, les installations sont devenues une véritable image de marque garantissant un bon enneigement aux touristes. Les stations multiplient alors ces installations sur l'ensemble du domaine. En 2012, 20 % du domaine d'Avoriaz est enneigé mécaniquement soit (57.5 hectares de pistes), contre 30 % du domaine de Champéry (35,5 hectares). Ces deux stations présentent des similitudes dans leur pratique et les techniques employées. Ainsi la production s'étale de novembre à mars, utilisant des volumes d'eau importants.

Cependant les modes d'alimentation des canons diffèrent. A Champéry, l'approvisionnement se fait presque exclusivement par des pompages directs dans les cours d'eau et les lacs naturels, rendant difficile l'estimation des volumes pompés et l'étude de l'impact de ces prélèvements sur la ressource. Sur Avoriaz, un accord entre la Lyonnaise des eaux, gestionnaire de l'eau potable, et la Serma, société des remontées mécaniques d'Avoriaz qui produit la neige, autorise le partage du lac 1730. Ce système nécessite la connaissance de la ressource disponible du lac et des prélèvements réalisés par ces deux activités. La connaissance de ces informations facilite la gestion de la ressource sans pour autant exclure les risques de pénuries et de rivalités.

Ces deux stations ont encore des projets de développement de leurs installations et notamment la création de retenues collinaires. Une retenue est en cours de construction sur Avoriaz. Et plusieurs projets sont en cours à Champéry. Ces retenues permettent en théorie de s'affranchir des autres usages en constituant des stocks disponibles instantanément pour la production de neige. Mais les investissements sont lourds et coûteux pour les stations.

Notre étude à différentes échelles d'analyse s'est plus particulièrement intéressée à la problématique du partage d'une même ressource pour la production de neige et d'eau potable sur Avoriaz et a mis en évidence des impacts plutôt faibles. Nous avons résumé ces impacts en trois catégories : les impacts sur la ressource en eau, les impacts sur l'hydrosystème et les risques de conflits.

- Sur notre terrain d'étude, les impacts de la production de neige sur le bassin versant de Chavanette sont très faibles. La ressource en eau du lac 1730 diminue en fonction de l'importance des prélèvements. En valeur absolue, les

volumes prélevés sont importants, environ 120 000 m³ par année. En valeur relative, ils diffèrent selon l'échelle temporelle d'analyse. A l'échelle d'une journée, les prélèvements pour la production de neige peuvent être très importants, plus de 10 000 m³ en quelques heures. Cette intensité des usages conduit à une baisse significative du niveau du lac (de plusieurs mètres) en hiver lorsque la recharge est faible. En effet, certaines années (2011-2012), l'impact des prélèvements est moins important sur le niveau du lac, celui-ci se rechargeant en continu en saison d'hiver soit par l'apport de précipitations, soit par l'apport des eaux de fonte lorsque les températures augmentent, soit par l'action conjointe des deux.

- A l'échelle d'un petit bassin versant de montagne (environ 11 km²), la part des prélèvements pour la production de neige n'est pas significative sur le débit des cours d'eau à l'échelle annuelle (environ 2 %) et mensuelle (en moyenne 7 %). En revanche à l'échelle des prélèvements totaux (neige artificielle et eau potable), ceux-ci peuvent atteindre 20 % des prélèvements mensuels et ne sont donc pas négligeables. Le marnage du lac induit par les prélèvements en amont n'a de conséquence sur le débit en aval qu'en période d'étiage hivernal et en présence d'une faible recharge naturelle du lac. Cela signifie que les précipitations sont faibles sur cette période et que les températures négatives n'entraînent pas la fonte du manteau neigeux. En dehors de ces conditions, le débit du cours d'eau est peu influencé par ces prélèvements. Ainsi le régime hydrologique de la Dranse de Sous-Saix n'est que peu modifié et ressemble fortement au régime naturel nival. Les écoulements de la Dranse de Sous-Saix sont rythmés par une période de basses eaux (étiage hivernal) et deux périodes de hautes eaux à l'automne et au printemps.
- A l'échelle du bassin versant de Chavanette et de la station d'Avoriaz, nous n'avons pas relevé de conflits autour de la ressource au cours de la recherche. Les accords entre la Lyonnaise des Eaux et la SERMA stipulent (accord oral) que la priorité sera toujours donnée à l'approvisionnement en eau potable de la station. Nous avons pu le vérifier au cours de l'automne 2011. Le niveau du lac est alors très bas. La Lyonnaise des Eaux interdit les pompages pour la production de neige. Les précipitations importantes au cours de l'automne ont permis de recharger le lac et la production de neige a démarré le 6 décembre. La situation aurait pu être problématique si la production de neige n'avait pu être lancée à temps avant le démarrage de la saison de ski. Mais plutôt que de parler de conflits, le terme de rivalité semble plus approprié. Car la gestion de la ressource oppose les différents secteurs d'activité mais finalement la production d'eau potable sera toujours privilégiée. A l'échelle de grands bassins versants (plus de 30 km²), les impacts des prélèvements sur les diverses activités (production hydroélectrique, pêche, activités nautiques...) sont faibles mais non nuls comme sur l'activité des Ardoisières qui dépend directement des volumes d'eau écoulés.

Dans chacune des stations étudiées, les acteurs discutent ensemble pour gérer au mieux la ressource. Les opérateurs de domaines skiables peuvent également conclure ces accords de manière plus ou moins formelle avec les gestionnaires de l'eau potable (Avoriaz) ou ceux de la production hydroélectrique (Champéry). Cette gestion telle qu'elle existe actuellement a toujours permis de trouver des solutions techniques et pratiques pour résoudre les problèmes de baisse de la ressource. Mais la volonté de s'affranchir du partage d'une même ressource et de gérer le stock d'eau à usage unique pour la production de neige semble prévaloir dans les deux stations. En effet des projets de construction de retenues collinaires existent sur les deux domaines pour les années à venir. Mais la ressource étant finie, la question de la durabilité de ce modèle se pose.

Les études existantes sur le changement climatique confirment ce questionnement. De manière générale, toutes concluent à un réchauffement des températures hivernales, une diminution des cumuls de neige fraîche et par conséquent une augmentation des besoins en production de neige artificielle. D'après les projections proposées aujourd'hui en termes de fiabilité de l'enneigement pour l'exploitation d'un domaine skiable, les deux stations étudiées pourraient connaître des incertitudes d'enneigement à l'horizon 2020. Mais la question de la viabilité du modèle de production de neige de culture se pose notamment pour les stations de moyenne altitude comme Avoriaz. Les conditions climatiques de production ont toujours jusqu'à présent permis de mener à bien les campagnes d'enneigement. Des situations de production de neige difficile en début de saison se sont cependant déjà produites. Mais qu'en sera-t-il dans les années à venir ? Nous n'avons fait qu'approcher ces notions dans notre recherche. Mais, les premiers résultats nous ont montré que la limite de fiabilité de l'enneigement pourrait varier entre 1350 et 1800 m d'ici 2050. De ce fait les stations doivent dès à présent trouver des solutions d'adaptation, comme le stipule le rapport de Bardé et al (2009).

Ces travaux de recherche ont permis de répondre aux hypothèses posées au départ, et à la question ayant conduit notre travail : les impacts de la production de neige sur la ressource et l'hydrosystème sont faibles et limités à de petits bassins versants de montagne. Plusieurs propositions ont été formulées pour améliorer la gestion de la ressource dans les années à venir. Il s'agit d'un ensemble de démarches qui pourraient être appliquées dès demain. Certaines initiatives ont déjà vu le jour et ont été expérimentées à l'échelle de bassins versants. D'autres sont en projet. Mais toutes ont pour objectif d'améliorer les systèmes de production de neige et de concilier les différents usages de l'eau dans un territoire de montagne. Nous avons cité en exemple trois démarches pilotes en cours ou à venir parmi de nombreuses démarches à différentes échelles, locales à régionales, existantes à ce jour. Le SAGE du Drac et de la Romanche a pour objectif de concilier l'ensemble des usages de l'eau dont la production de neige sur l'ensemble des stations d'Isère. Cette première initiative s'est révélée, à notre sens, tout à fait concluante. Le SAGE de

l'Arve et le SCRAE sont en cours d'élaboration pour le premier et en cours d'application pour le second. Ces schémas pourraient apporter le regard nécessaire aux hydrosystèmes de montagne en incluant la logique amont-aval.

CONCLUSION GENERALE

« Les Alpes sont un véritable château d'eau, grâce à leur situation géographique et à leurs caractéristiques topographiques. Ainsi, les Alpes génèrent d'importantes ressources en eau permettant d'assurer les besoins vitaux des sociétés et du milieu naturel, dans les régions alpines et dans les espaces proches » (Relier, 2005).

Les régions de montagne, souvent considérées comme « le château d'eau des plaines environnantes », ont été oubliées dans les recherches sur les systèmes de gestion des ressources en eau pendant de nombreuses années. Certes, de prime abord, elles concentrent de nombreuses ressources en eau (lacs, cours d'eau, neige, glaciers, réserves souterraines...) mais elles sont aussi le siège de nombreuses activités utilisant cette ressource (eau potable, agriculture, tourisme, neige artificielle, hydroélectricité...). La majorité de ces activités se sont considérablement développées ces dernières années et les prélèvements associés à plusieurs d'entre elles se concentrent en période d'étiage (production de neige, production d'eau potable). De plus, on constate un compartimentage des acteurs et des décisions qui complique la gestion de la ressource.

Ce contexte est le cadre de notre recherche qui s'est focalisée sur la production de neige, usage relativement récent en station et qui est souvent au cœur de débats animés.

La production de neige, un outil indispensable.

Aujourd'hui, la plupart des stations sont équipées d'installations de production de neige artificielle, en France comme en Suisse, mais aussi dans de nombreux pays comme l'Italie, l'Autriche, les Etats-Unis... Le nombre de stations et d'hectares de pistes équipés n'a cessé de croître ces dernières années et la tendance semble se maintenir dans les années à venir. Bien que nous ne nous soyons pas attardés sur cette question, il est indéniable que les systèmes de production de neige sont différents entre les stations, dépendant des choix de chacune. La mise en place de la pratique et son développement répondent dans tous les cas aux exigences économiques et à la concurrence à laquelle se livrent les stations de montagne. Il s'agit entre autre de rentabiliser la station et les équipements, d'améliorer la qualité de l'offre et de répondre aux exigences touristiques. Nous l'avons vu, la configuration de certaines stations nécessite un bon enneigement. Avoriaz est une station de troisième génération, « skis aux pieds » qui se localise au cœur du domaine skiable, assurant la liaison à ski entre les différentes stations. La liaison entre Champéry (centre du village) et les pistes de ski se fait par le biais d'un téléphérique et d'une unique piste qui permet le retour skis aux pieds au village. Dans ces deux exemples, l'enneigement des pistes a pris une importance considérable ces dernières années. Dans le cadre d'un domaine transfrontalier comme celui des Portes du Soleil, les stratégies économiques sont définies par l'ensemble des stations (choix de développement ; périodes d'ouvertures...), les enjeux sont donc particulièrement importants.

En termes de choix, de grandes différences s'observent entre les stations, en particulier sur le système de production. Plusieurs types de canons existent et tous dépendent d'une source d'alimentation en eau. Ces sources sont de nature variée, prélèvements directs dans les cours d'eau, les lacs et les ressources souterraines ou pompages dans les retenues collinaires, les réservoirs d'eau potable, les barrages hydroélectriques. Ces choix ne sont pas sans conséquences sur la ressource en eau et les hydrosystèmes.

Des besoins en eau croissants dans un système de partage de la ressource.

Dans un contexte de croissance des équipements de neige et des volumes prélevés, nous avons analysé les impacts d'une telle activité sur une ressource en eau à l'échelle locale des stations de montagne.

Dans la station d'Avoriaz, nous avons choisi le secteur du lac 1730 qui est au cœur des enjeux du partage de la ressource. En effet, l'eau du lac est utilisée pour l'alimentation en eau potable de la station d'Avoriaz et pour la production de neige sur plus de la moitié du domaine skiable de la station. Dans ce premier cas d'étude, il n'y a pas eu jusqu'à ce jour de pénurie d'eau entre les usages. A l'automne 2011, la ressource du lac était globalement faible, entraînant une interdiction de production de neige et donc une situation de rivalité entre deux usages, la production de neige et la production d'eau potable. Mais cette situation n'a pas perduré dans le temps, la ressource s'étant reconstituée avant le démarrage de la saison d'hiver. Dans le cas du partage d'une ressource, les acteurs dialoguent entre eux afin de trouver des solutions pour satisfaire leurs besoins. Ainsi, il convient de tempérer les propos catastrophiques de conflits d'usages relayés par les médias, car dans les situations étudiées la priorité a toujours été donnée à la production d'eau potable.

Dans la station de Champéry, nous nous sommes intéressées à l'ensemble du domaine dont la production de neige dépend des prélèvements directs dans les cours d'eau de surface et les lacs naturels. Les volumes ainsi pompés ne sont pas répertoriés et dépendent des besoins au jour le jour. Là encore, nous n'avons pas identifié de pénuries d'eau et de situations de conflits.

Mais cela ne doit pas pour autant effacer les risques. Ces prélèvements d'eau pour la production de neige mais aussi ceux pour l'eau potable sont toujours croissants. Or, nous l'avons vu, c'est bien la superposition de ces deux usages qui entraîne une variation, certes faible, de la ressource en eau du lac 1730 à Avoriaz. Cette augmentation des usages conduit à s'interroger sur leur satisfaction, considérant la ressource finie à l'échelle de la journée ou du mois. Cette question se pose d'autant plus que les projets d'agrandissement ou de construction de réseaux d'enneigement sont nombreux. Il s'agit par exemple des projets de la station d'Avoriaz mais aussi de ceux de la commune de Champéry dans le cadre plus large de la planification globale à l'échelle de plusieurs stations du canton du Valais.

Des prélèvements croissants en période d'étiage.

Les prélèvements directs pour la production de neige se concentrent sur la saison d'hiver, en période d'étiage des cours d'eau. Durant cette même période, les prélèvements pour la production d'eau potable et les diverses activités touristiques (piscine, patinoire...) sont également importants. De forts prélèvements sur de courtes périodes peuvent avoir des impacts importants sur les régimes des cours d'eau et plus généralement sur le fonctionnement de l'hydrosystème. Les retenues collinaires ou bassins associés à la production de neige peuvent jouer un rôle de tampon, limitant les impacts immédiats des prélèvements sur les cours d'eau. Cela ne signifie pas pour autant qu'ils n'ont pas d'impacts sur le fonctionnement de l'hydrosystème. A l'échelle du bassin des Prodains, la retenue du lac 1730 modifie la répartition annuelle et le volume des écoulements à l'aval. Cependant, ces modifications sont particulièrement faibles car les conditions climatiques jouent un rôle majeur dans le fonctionnement de l'hydrosystème. Les régimes hydrologiques de ces cours d'eau de montagne sont finalement peu impactés et ce, même à l'échelle de petits bassins versants. Là encore, il est important de tempérer les propos qui accusent la production de neige de « bouleverser » le fonctionnement d'un bassin versant.

Tempérer les discours et améliorer la gestion de la ressource.

L'absence de données et de recherches en particulier sur les têtes de bassin versant et la production de neige a conduit à de nombreux propos parfois infondés. En réalité, deux thèses s'affrontent. Une première est défendue par les Communes et les gestionnaires de remontées mécaniques. Selon leur point de vue, toute l'eau utilisée pour la fabrication de neige est restituée au milieu lors de la fonte. Il n'y a donc pas d'impact sur la ressource en eau. Cette première thèse souligne la méconnaissance, voulue ou non, du fonctionnement complexe d'un bassin de montagne. Quand à la pérennité du système dans les années à venir, tous semblent peu inquiets et continuent les investissements dans ce domaine sous prétexte qu'il y a du temps. Pourtant, une note du Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, a été envoyée à tous les maires de stations de montagne et incite les Communes à prendre en considération dès aujourd'hui la question du changement climatique et à trouver des adaptations possibles en termes d'activités.

La seconde thèse est défendue par les associations de protection de l'environnement et relayée par les médias. La production de neige aurait des conséquences importantes sur la ressource en eau et l'hydrosystème, entraînant des pénuries, des conflits d'usage et un bouleversement du fonctionnement du bassin versant.

Ces propos sont souvent tranchés et fondés sur des logiques propres à chacun. Ces discours sont à tempérer au vu des résultats de nos recherches. Les impacts de la production sont bien réels sur le volume global de la ressource et le fonctionnement de l'hydrosystème. Cependant, ces impacts restent faibles à l'échelle temporelle de l'année et à celle spatiale du bassin versant. Ils sont surtout maîtrisables et ont été jusqu'à aujourd'hui toujours compatibles avec les besoins des autres usages.

Plusieurs points peuvent être améliorés pour réduire les risques à l'avenir. Car le changement climatique, même s'il existe une grande part d'incertitude sur les données actuelles, devrait augmenter plus ou moins la vulnérabilité des stations. De nombreux paramètres, comme la localisation des stations dans les massifs, sont à prendre en compte. La recherche doit être plus précise dans ce domaine, notamment à l'échelle locale.

Des actions techniques et institutionnelles existent déjà pour améliorer la gestion de la ressource. On peut citer l'exemple des Schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) à l'échelle du bassin versant. Plus localement, les stations s'adaptent techniquement pour limiter la production de neige et privilégient aujourd'hui la construction de retenues collinaires pour approvisionner les canons à neige. Cela permet d'améliorer la disponibilité immédiate en eau en saison d'hiver.

La gestion des ressources passe semble-il à l'avenir par une amélioration des dialogues entre les différents acteurs à l'échelle locale, et un meilleur échange des informations et des données entre les différentes instances administratives, de l'échelle locale à nationale. En effet, une bonne gestion ne peut se faire qu'à une échelle locale et la vision d'ensemble à plus grande échelle, celle du bassin versant par exemple, est indispensable. Au cours de nos recherches, nous avons pu organiser plusieurs séances de dialogues entre des acteurs donc les logiques sont plutôt contradictoires. Ces débats ont toujours mené à des propositions constructives. Ces acteurs semblent même tout à fait disposés à échanger pour améliorer les connaissances dans le domaine de la production de neige. Ces actions doivent donc être encouragées et développées.

Nous avons pu constater au cours de nos recherches que les réflexions sur la production de neige et la gestion de l'eau sont complexes et passent nécessairement par une étude et des réponses multifactorielles, multiacteurs et multiscales. La conciliation entre la production de neige et les autres usages de l'eau est indispensable pour les années à venir.

En effet, le changement climatique pose la question de la durabilité du modèle économique du tourisme de sports d'hiver. La production de neige occupe une place importante au sein des domaines skiables et des stations. Même si aujourd'hui, les impacts de la production de neige semblent relativement limités à l'échelle d'une station de montagne ou d'un bassin versant, la ressource en eau devrait être de plus en plus sollicitée et les choix de gestion pourraient dans certains cas amplifier la vulnérabilité des stations. Aujourd'hui, la tendance est à l'augmentation des surfaces équipées en enneigeurs. Mais qu'en sera-t-il demain ? Dans ce sens, notre thèse n'est pas une fin en soi et ouvre sur de nouvelles pistes de recherches, notamment sur l'adaptation des stations au changement climatique. L'enneigement n'est certainement pas une adaptation possible au changement climatique, notamment du fait de la diminution des possibilités de production (conditions climatiques) et de l'augmentation des besoins. Les stations se retrouvent aujourd'hui face à des choix

qu'elles devront faire et qu'elles n'avaient pas anticipés. Les différents acteurs à l'échelle locale devront réfléchir ensemble et trouver des solutions d'adaptation. Nous avons focalisé nos recherches sur la production de neige qui n'est bien évidemment pas le seul usage d'un territoire de montagne. Tous ces questionnements pourraient être repris en considérant le territoire de montagne dans un sens plus large, c'est-à-dire avec l'ensemble de ses activités.

Liste des abréviations

LISTE DES ABREVIATIONS

AAPPMA	Association Agréée pour la Pêche et la Protection des Milieux Aquatiques
AEP	Alimentation en Eau Potable
Agence de l'eau RMC	Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse
ANEM	Association Nationale des Elus de la Montagne
ANMSM	Association Nationale des Maires des Stations de Montagne
ANR	Agence Nationale de la Recherche
APS	Assemblée des Pays de Savoie
ASAE	Association Suisse pour l'Aménagement des Eaux
ASTEE	Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement
ASTERS	Conservatoire départemental des espaces naturels de Haute-Savoie
Atout France	Agence de développement Touristique de la France
BCS	Banque de Données Climatologiques Suisse, Institut Suisse de météorologie
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BV	Bassin versant
CEMAGREF	Centre d'Etudes du Machinisme Agricole et du Génie Rural des Eaux et Forêts
CG	Conseil Général
CIPEL	Commission Internationale pour la Protection des Eaux du Léman
CIPRA	Commission Internationale pour la Protection des Alpes
CLE	Commission Locale de l'Eau
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CODERST	Conseil Départemental de l'Environnement, des Risques Sanitaires et Technologiques
CR	Conseil Régional
DCE	Directive cadre sur l'eau
DDAF	Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt
DDASS	Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales
DDE	Direction Départementale de l'Equipement
DDEA	Direction Départementale de l'Equipement et de l'Agriculture
DDT	Direction Départementale des Territoires
DIREN	Direction Régionale de l'Environnement
DRAF	Direction Régionale de l'Agriculture et de la Forêt

DRASS	Direction Régionale des Affaires Sanitaires et Sociales
DRE	Direction Régionale de l'Équipement
DREAL	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
DRIRE	Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement
EDF	Electricité de France
EDYTEM	Environnement Dynamique et Territoire de Montagne
ENA	Institut Fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches
EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
FAO	Food and Agriculture Organization
FFCAM	Fédération des Clubs Alpins de Montagne
Fiche D10	Fiche de coordination D10
FNE	France Nature Environnement
FRAPNA	Fédération Rhône-Alpes de Protection de la Nature
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GIRE	Gestion Intégrée des Ressources en Eau
GWP	Global Water Partnership
HELP	Hydrology for the Environment, Life and Policy
HQE	Haute Qualité Environnementale
ICPE	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
IEA	Installation d'Enneigement Artificiel
IEM	Installation d'Enneigement Mécanique
IGUL	Institut de Géographie de l'Université de Lausanne
INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
IPCC	International Panel on Climate Change
ISM	Institut Suisse de Météorologie
LAgr	Loi Fédérale sur l'Agriculture
LAT	Loi fédérale sur l'Aménagement du Territoire
LEaux	Loi Fédérale sur la Protection des Eaux
LEMA	Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques
LIM	Loi Fédérale sur l'Aide en Matière d'Investissement des les Régions de Montagne
LPE	Loi Fédérale sur la Protection de l'Environnement
LVPN	Ligue Valaisanne pour la Protection de la Nature (également ProNature)
MEEDDAT	Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire
MISE	Mission Inter Services de l'Eau

OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Economique
ODIT	Observation, Développement et Ingénierie Touristique
OEIE	Ordonnance relative à l'Etude d'Impact sur l'Environnement
OFEFP	Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage
OIEau	Office International de l'Eau
ONEMA	Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques
ONF	Office National des Forêts
ONU	Organisation des Nations Unies
OT	Office du Tourisme
PDC	Plan Directeur Cantonal
PLU	Plan Local d'Urbanisme
PNR 31	Programme National de Recherches « Changement climatique et catastrophes naturelles »
Q	Débit
QMNA	Débit Mensuel Minimal par An
RIOB	Réseau International des Organismes de Bassin
SAGE	Schéma d'Aménagement et de gestion des Eaux
SAGETS	Société d'Aménagement des Gets
SAT	Service de l'Aménagement du Territoire du canton du Valais
SCOT	Schéma de Cohérence Territoriale
SDAGE	Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SEA 74	Société d'Economie Alpestre de la Haute-Savoie
SERMA	Société d'Exploitation des Remontées Mécaniques de Morzine Avoriaz
SIG	Système d'Information Géographique
SIVOM	Syndicat Intercommunal à Vocations Multiples
SLEE	Société Lyonnaise des Eaux et de l'Eclairage
SNTF	Syndicat National des Téléphériques de France
SPE	Service de la Protection de l'Environnement du canton du Valais
STEP	Station d'Épuration des Eaux Usées
UNESCO	United Nations Educational Scientific and Cultural Organization
UTN	Unité Touristique Nouvelle
UVT	Union Valaisanne du Tourisme
WWF	World Wildlife Fund
ZNIEFF	Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	18
PARTIE 1 LES RESSOURCES EN EAU ET L'ENNEIGEMENT ARTIFICIEL D'UN TERRITOIRE DE MONTAGNE : CADRE THEORIQUE.....	26
Introduction partie 1.....	28
CHAPITRE 1. L'APPROCHE CONCEPTUELLE ET METHODOLOGIQUE DE LA RECHERCHE.....	30
Introduction chapitre 1.....	32
1.1 LES ENJEUX ACTUELS DE L'ENNEIGEMENT ARTIFICIEL.....	33
1.1.1 Les « accusateurs » de la neige artificielle.....	33
1.1.2 Les « défenseurs » de la neige artificielle.....	35
1.1.3 Les études scientifiques.....	36
1.2 DEFINITION DES CONCEPTS ET DES HYPOTHESES DE TRAVAIL.....	40
1.2.1 Neige de culture, neige artificielle, enneigement mécanique.....	40
1.2.2 Les concepts de ressource en eau et de gestion d'usages.....	43
1.2.2.1 La ressource en eau.....	43
1.2.2.2 Les usages de l'eau.....	45
1.2.2.3 La gestion de la ressource.....	46
1.2.3 Le concept d'hydrosystème.....	50
1.2.4 Un territoire de montagne.....	54
1.3 LES HYPOTHESES DE DEPART.....	59
1.4 ORGANISATION DE LA RECHERCHE.....	65
1.4.1 Traitement des données et méthodologie.....	65
1.4.2 Méthodes.....	68
1.4.3 Biais des données et biais de la méthode.....	73
Conclusion chapitre 1.....	76
CHAPITRE 2. L'ENNEIGEMENT ARTIFICIEL.....	78
Introduction chapitre 2.....	80
2.1 LES MODALITES DE L'ENNEIGEMENT.....	81
2.1.1 Le fonctionnement d'un canon.....	81
2.1.2 Les conditions climatiques de production.....	87
2.1.3 Le fonctionnement d'un réseau d'enneigeurs.....	90
2.1.4 Les lieux de prélèvement.....	92
2.1.5 La production d'un canon et les volumes d'eau associés.....	99
2.2 L'EVOLUTION DE L'ENNEIGEMENT ARTIFICIEL AU COURS DU TEMPS.....	100
2.2.1 La naissance d'une pratique.....	100
2.2.1.1 En France.....	103
2.2.1.2 A l'échelle du massif alpin français et de la Haute-Savoie.....	109
2.2.1.3 En Suisse.....	111
2.2.1.3 Dans le Monde.....	112
2.2.2 La consommation d'eau.....	113
2.2.3 Tendances d'évolution.....	114
2.3 LES RAISONS D'ENNEIGER MECANIQUEMENT.....	116
2.3.1 Les raisons évoquées aujourd'hui.....	116
2.3.2 Les enjeux de demain.....	121
2.3.1.1 La fiabilité de la limite de l'enneigement développée par l'OCDE.....	122
2.3.1.2 Faire face aux fluctuations.....	127

2.4	LES SPECIFICITES HYDROLOGIQUES DES BASSINS VERSANTS DE MONTAGNE	128
2.4.1	Les paramètres climatiques et hydriques en montagne	128
2.4.2	Les paramètres anthropiques	131
2.5	ETAT DES LOIS ET REGLEMENTATIONS.....	132
2.5.1	Réglementations internationales.....	133
2.5.2	Réglementations françaises	133
2.5.2.1	Réglementations nationales	133
-	Réglementation nationale sur les prélèvements d'eau en France	133
-	Réglementation nationale sur les installations classées en France	135
-	Réglementation nationale sur les bâtiments en France	135
-	Réglementation nationale française sur les retenues collinaires	136
2.5.2.2	Réglementation régionale et locale française	137
2.5.3	Réglementations suisses	138
2.5.3.1	Réglementation nationale suisse.....	138
2.5.3.2	Réglementation suisse à l'échelle du canton	139
2.5.3.3	Réglementation suisse à l'échelle de la commune	140
	Conclusion chapitre 2	142
	CHAPITRE 3. LA ZONE D'ETUDE	144
	Introduction chapitre 3	146
3.1	LE DOMAINE TRANSFRONTALIER DES « PORTES DU SOLEIL »	147
3.1.1	Description du domaine.....	147
3.1.2	Les limites choisies	148
3.2	LES CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES REGIONALES	151
3.3	LES SPECIFICITES DU BASSIN VERSANT DE LA DRANSE DE SOUS-SAIX	157
3.3.1	Aspects morphostructuraux et hydrogéologiques des secteurs d'étude.	157
3.3.2	L'artificialisation du bassin versant de la Dranse de Sous-Saix	162
3.3.2.1	Le sous bassin versant de Chavanette	164
3.3.2.2	Le sous bassin des Fontaines froides	166
3.4	LES STATIONS D'AVORIAZ ET DE CHAMPERY	166
3.4.1	Avoriaz, station skis aux pieds.....	166
3.4.2	Champéry, station familiale	173
3.5	DESCRIPTION DES INSTALLATIONS D'ENNEIGEMENT MECANIQUE	178
3.5.1	Avoriaz	178
3.5.2	Champéry	181
	Conclusion chapitre 3	185
	CONCLUSION PARTIE 1	189
	PARTIE 2 L'ENNEIGEMENT ARTIFICIEL : ATOUS ECONOMIQUES ET IMPACTS	
	HYDROLOGIQUES.....	191
	INTRODUCTION PARTIE 2.....	193
	CHAPITRE 4. LES USAGES DE L'EAU ET L'ENNEIGEMENT ARTIFICIEL DANS UN	
	TERRITOIRE DE MOYENNE MONTAGNE	195
4.1	LE SYSTEME DE PRODUCTION DE NEIGE DANS LES STATIONS D'AVORIAZ ET DE CHAMPERY	197
4.1.1	La station d'Avoriaz : le cas du partage d'une même ressource	197
4.1.2	Champéry : une évolution rapide des systèmes de production	198
4.1.3	Les enjeux actuels de l'enneigement	200
4.2	LE PARTAGE DE LA RESSOURCE EAU POTABLE ET NEIGE DE CULTURE DANS LA STATION D'AVORIAZ	201
4.2.1	Les prélèvements saisonniers et mensuels dans le lac 1730	202

4.2.1.1 Les prélèvements annuels	203
4.2.1.2 A l'échelle mensuelle et journalière	205
4.1.2.3 La part des prélèvements à l'échelle de la ressource globale disponible dans le lac1730	206
4.2.3 La mobilisation de l'eau du lac 1730, vers un marnage du lac ?	207
4.2.3.1 Les variations saisonnières du niveau du lac	208
4.2.3.2 Les variations journalières du lac.....	211
4.2.3.3 Variations du niveau du lac.....	212
Conclusion chapitre 4	217
CHAPITRE 5. LES IMPACTS HYDROLOGIQUES LIES A L'UTILISATION DE L'ENNEIGEMENT ARTIFICIEL	219
Introduction Chapitre 5	221
5.1 ESTIMATION DES PRELEVEMENTS SUR LES ENTREES ET LES SORTIES DANS LE BASSIN VERSANT DES PRODAINS	223
5.1.1 Les volumes d'eau mis en jeu dans le sous bassin versant des Prodains.....	223
5.1.1.1 Entrée et sortie à l'échelle de l'année	225
5.1.1.2 Impacts sur les écoulements à l'échelle mensuelle et journalière	226
5.1.2 Le rôle du marnage du lac sur les écoulements	229
5.2 IMPACTS SUR LE REGIME HYDROLOGIQUE DE LA DRANSE DE SOUS-SAIX	231
5.2.1 Description du régime hydrologique	232
5.2.2 Analyse du débit pour 2010-2011	233
5.2.3 Analyse du débit de la Dranse en 2011-2012	237
5.2.4 QU'EN EST-IL DU DEBIT RESERVE IMPOSE PAR LA LOI ?	240
5.3 LES IMPACTS AMONT-AVAL	242
5.3.1 A l'échelle du bassin de la Dranse de Sous-Saix	242
5.3.2 A l'échelle du bassin de la Dranse de Morzine.....	244
5.3.3 A l'aval de Seytroux jusqu'au lac Léman	246
5.4 Une pluriactivité à l'échelle régionale du bassin de la Dranse de Morzine : des risques de conflits. ..	248
Conclusion chapitre 5	251
CHAPITRE 6. DISCUSSION DES RESULTATS	253
Introduction Chapitre 6	255
6.1 VERIFICATION DES HYPOTHESES DE DEPART	256
6.2 DISCUSSION DES RESULTATS	268
6.2.1 Des risques limités	268
6.2.2 Le rôle des modes de prélèvements	271
6.2.2.1 Les prélèvements AEP.....	272
6.2.2.2 Les prélèvements directs dans les cours d'eau	272
6.2.2.3 Les retenues collinaires	272
6.3 DES RISQUES FUTURS	273
6.4 QUELQUES RECOMMANDATIONS	275
6.4.1 Quelques propositions pour une meilleure gestion des ressources	275
6.4.2 Le point sur les projets existants.....	281
6.4.2.1 SAGE Drac Romanche.	284
6.4.2.2 SAGE de l'Arve	286
6.4.2.3 SRCAE. Schéma régional climat, air et énergie.	287
6.4.2.4 A l'échelle locale	287
6.4.3 Des adaptations à prévoir au changement climatique et ses conséquences sur l'activité ski.....	290
Conclusion chapitre 6	293
CONCLUSION PARTIE 2	295

CONCLUSION GENERALE	301
Liste des abréviations.....	311
Table des matières.....	317
Liste des figures	325
Bibliographie	333
Annexes.....	370

Liste des figures

Liste des tableaux

Tab.1 Les températures idéales pour la fabrication de neige.....	78
Tab.2 L'enneigement artificiel en Savoie et Haute-Savoie en 2008-2009.....	99
Tab.3 Part des pistes équipées d'installations d'enneigement dans les pays de l'arc alpin.....	101
Tab.4 Les volumes d'eau précipités en fonction des gradients altitudinaux.....	220
Tab.5 La ressource en eau sur Avoriaz. Connaissances et lacunes des volumes mis en jeux.....	272
Tab.6 Les priorités d'enneigement pour la saison 2007-2008 sur le domaine des Gets. Exemple du secteur Chavannes.....	285

Liste des figures

Figure.1 Représentation de l'organisation de la recherche et du plan de thèse	23
Figure.2 Résultats du ratio Prélèvements/Ressource sur le bassin Rhône Méditerranée et Corse pour la saison 2001-2002.....	37
Figure.3 Brochure publicitaire du SNTF.....	41
Figure.4 Information sur la neige de culture et quizz destinés au grand public, proposés par la station des Sybelles en Savoie.	42
Figure.5 Les fonctions et usages de l'eau dans une station de moyenne montagne	45
Figure.6 Structure simplifiée d'un système de gestion des ressources en eau.....	46
Figure.7 Double processus d'intégration verticale et horizontale de la gestion des ressources en eau.....	49
Figure.8 Les zones de montagne définies par ODIT France.....	55
Figure.9 Le pourcentage de superficie des zones de montagne et le pourcentage du nombre d'habitants des différentes zones de montagne française.....	56
Figure.10 La méthodologie de réponse aux hypothèses	64
Figure.11 Le système « ressource en eau » d'une station de moyenne montagne.	66
Figure.12 Le système « ressource en eau » à l'échelle des stations d'Avoriaz et de Champéry.	67
Figure.13 Le système « ressource en eau » à l'échelle du bassin versant et ses impacts sur le cycle hydrologique.....	68
Figure.14 Schéma du principe du jaugeage au sel.....	70
Figure.15 Sonde Imadd posée dans la Dranse de Sous-Saix en aval de la station d'Avoriaz. Installation en septembre 2008.	70
Figure.16 Courbe de tarage obtenue à partir des données de jaugeage et de la sonde Hymadd.....	71
Figure.17 Affiche du séminaire organisé à Morzine.....	72
Figure.18 Schéma des différentes phases de production de neige..	81
Figure.19 Canon monofluide monté sur bras amovible.....	82
Figure.20 Canon monofluide monté sur roues. Champéry printemps 2011.	82

Figure.21 Les enneigeurs monofluides multigicleurs (principe 1) et monobuses (principe 2).	83
Figure.22 Bifluides sur le domaine de Morzine Pleney.	84
Figure.23 Les canons bifluides à mélange interne.	85
Figure.24 Les canons bifluides à mélange externe.	85
Figure.25 Tente à neige au stade de France en 2007.	87
Figure.26 Vente de Snowmax en Espagne.	87
Figure.27 Les besoins en air pour la production de neige.	88
Figure.28 Schéma de l'installation du réseau d'enneigeurs.	90
Figure.29 L'usine à neige des Setives sur la station d'Aussois, 2010.	91
Figure.30 Station de mesure des paramètres climatiques sur un canon bifluide aux Gets, hiver 2007.	92
Figure.31 Poste de commande sur le secteur de la Setaz, station de Valloire.	92
Figure.32 Les différents modes d'alimentation des enneigeurs.	93
Figure.33 Pourcentage des prélèvements à partir de trois sources (retenues collinaires, cours d'eau, réseau d'alimentation en eau potable) sur les volumes globaux des prélèvements pour la production de neige.	94
Figure.34 Les modes de prélèvements pour la production de neige dans le réseau d'eau potable.	95
Figure.35 La retenue de l'Adret des Tuffes en travaux, Arc 2000.	97
Figure.36 La retenue du Maroly, Le Grand Bornand	97
Figure.37 Besoins en eau théoriques pour la production de neige par saison et volumes d'eau stockés dans les retenues collinaires.	97
Figure.38 Disponibilité en eau et utilisation pour la neige de culture et le remplissage des retenues collinaires.	99
Figure.39 Répartition des prélèvements d'eau dans les différents départements de montagne français.	100
Figure.40 « The first Artificial Snow Ever Made » titre le journal Yankee.	101
Figure.41 Les frères Tropéano et leur canon à neige à partir du système d'irrigation portable (1950).	102
Figure.42 Le système d'enneigeurs installé sur une jeep pour étendre les surfaces enneigeables	102
Figure.43 Steamboat Springs, Colorado. La petite ville est fière d'utiliser le nouveau procédé pour fabriquer de la neige.	102
Figure.44 Premier canon à neige, il pulvérise des cristaux de neige à une distance de plus de 18 m.	103
Figure.45 Les premiers « canons tour » sur la colline de Boston Hill.	103
Figure.46 Installation de canons sur la piste de Champ du Feu (Vosges, 1963).	105
Figure.47 L'installation de production de neige (Champ du Feu, Vosges, 1963).	105
Figure.48 La piste de Champ du Feu enneigée artificiellement (Vosges, 1963).	105
Figure.49 Premiers essais de « canons à neige » à Megève (Haute-Savoie). (Le Dauphiné Libéré du 14 janvier 1964).	106
Figure.50 Evolution de la surface enneigeable entre 1973 et 2009.	106
Figure.51 Evolution du nombre de stations équipées entre 1979 et 2009.	107
Figure.52 La une du journal La Croix du 18 décembre 2007.	107
Figure.53 Nombre de stations équipées en neige de culture en 2008-2009.	108

Figure.54 Répartition par massif des pistes équipées en neige de culture en 2008-2009 (en pourcentage de la surface totale des pistes).	109
Figure.55 Surface de pistes équipées en neige de culture en 2008-2009 (en hectare).	109
Figure.56 Evolution des surfaces équipées en neige de culture en Savoie et Haute-Savoie (en hectare) depuis 1994-1995.	110
Figure.57 Part de la surface des pistes équipées pour l'enneigement technique en Suisse.	111
Figure.58 Ski dôme de Landgraaf (Pays-Bas).	113
Figure.59 Consommation saisonnière des installations de production de neige entre 1999 et 2009.	114
Figure.60 Projection de l'évolution de la surface enneigeable.	115
Figure.61 Probabilité d'occurrence en pourcentage d'une hauteur de neige donnée sur une période de référence de 1965 à 2000.	116
Figure.62 Création d'une sous couche sur Thyon-Les-Collons (Valais Suisse).	118
Figure.63 Sous-couche à Vars (France).	118
Figure.64 Canon nouvelle technologie à Zermatt pour enneiger le retour du glacier de Théodule.	120
Figure.65 Publicité de la station de Zermatt qui met en avant la possibilité de skier 365 jours par an.	120
Figure.66 Canons à neige au Trockener Steg (Zermatt) le 3 novembre 2007.	120
Figure.67 Limite de fiabilité actuelle de l'enneigement naturel dans les zones alpines pour 100 jours de neige par an avec 30 cm de neige au sol.	123
Figure.68 Nombre de domaines fiables dans les conditions actuelles, pour un réchauffement de 1°C (2030), 2°C (2050) et 4°C (2100) dans les Alpes françaises.	123
Figure.69 Les stations de ski et la rentabilité des domaines aujourd'hui et en 2050.	124
Figure.70 Nombre de domaines fiables dans les conditions actuelles, pour un réchauffement de 1°C (2030), 2°C (2050) et 4°C (2100) dans les Alpes suisses.	125
Figure.71 Limite de fiabilité d'enneigement sur la station de Morzine-Avoriaz pour un réchauffement de 1, 2 et 4°C des températures.	126
Figure.72 La fréquentation touristique moyenne du domaine des Portes du Soleil par saison.	127
Figure.73 Schéma des interrelations du système hydrique en montagne.	130
Figure.74 Le cycle de l'eau anthropisé par la production de neige de culture.	132
Figure.75 Carte du domaine skiable des Portes du Soleil.	148
Figure.76 Le domaine skiable d'Avoriaz et le bassin versant de la Dranse de Sous-Saix support de l'étude	149
Figure.77 Le domaine skiable de Champéry.	150
Figure.78 Localisation des stations météorologiques.	152
Figure.79 Répartition mensuelle des températures et des précipitations de 1999 à 2008 pour les stations des Gets, Pleney, d'Aigle et des Diablerets.	153
Figure.80 Répartition journalière des températures et des précipitations de 2008 à 2012 aux Gets.	154
Figure.81 Moyenne mensuelle de l'enneigement de 1999 à 2008.	156
Figure.82 Probabilité moyenne d'enneigement (en pourcentage) pour les stations des Portes du Soleil.	157
Figure.83 Relief et hydrographie du secteur d'étude.	158

Figure.84 Contexte géologique du bassin de la Dranse de sous-Saix.	160
Figure.85 Profil géologique de la rive droite de la vallée de la Manche entre Morzine et le front de la nappe de Morcles (repéré sur la carte géologique figure 84).	160
Figure.86 Carte géologique simplifiée de Champéry.	161
Figure.87 Photographie de la résurgence du lac d'Avoriaz à l'aval de la « falaise d'Avoriaz ».	162
Figure.88 Artificialisation du bassin versant de la Dranse de Sous-Saix.	163
Figure.89 Le Lac 2000.	164
Figure.90 Photographie de l'usine de filtration pour la production d'eau potable.	164
Figure.91 Le Lac 1730.	165
Figure.92 Aménagement du lac 1730 avec la pose de bâches étanches sur le second bassin.	165
Figure.93 Parking et gare routière d'Avoriaz (accès par le haut de la station).	167
Figure.94 L'ancien téléphérique d'Avoriaz et le nouveau 3S (accès par le bas de la station).	168
Figure.95 Architecture de la station d'Avoriaz.	169
Figure.96 La gestion de la station d'Avoriaz.	170
Figure.97 Projet du nouveau tronçon 3S Morzine-Prodains.	171
Figure.98 Le nouvel espace aquatique « Aquariaz » d'Avoriaz.	172
Figure.99 Les constructions sur la station d'Avoriaz.	172
Figure.100 Les projets de construction à Avoriaz.	173
Figure.101 Téléphérique de Champéry.	174
Figure.102. Le palladium de Champéry.	175
Figure.103 Schéma des installations sur la commune de Champéry.	175
Figure.104 Les lieux de prélèvements pour la production de neige artificielle.	176
Figure.105 Schéma de l'installation skiable avant et après la planification globale en cours.	177
Figure.106 Nombre d'enneigeurs total par hectare sur la station d'Avoriaz entre 1995 et 2009.	178
Figure.107 Monofluide dans la station d'Avoriaz.	179
Figure.108 Un bifluide sur le retour Prodains, piste des Crots.	179
Figure.109 Schéma des réseaux « d'enneigement » sur le domaine d'Avoriaz à partir du lac 1730.	180
Figure.110 Schéma de l'installation de production de neige de Champéry.	183
Figure.111 Les pompages dans le lac 1730 sur la saison 2010-2011.	198
Figure.112 Tendances de l'évolution des prélèvements pour la production de neige à Champéry entre 2005 et 2010.	199
Figure.113 Les prélèvements selon les différents secteurs.	200
Figure.114 Les prélèvements d'eau pour la production de neige à Avoriaz entre 2004 et 2011.	201
Figure.115 Le secteur Chavanette et le bassin versant d'approvisionnement du lac 1730.	202
Figure.116 Les prélèvements pour la production d'eau potable de la station.	204
Figure.117 Les prélèvements dans le lac 1730.	204
Figure.118 Les prélèvements d'eau à l'échelle journalière dans le lac 1730 pour le mois de janvier.	205
Figure.119 Les prélèvements dans le lac 1730 en pourcentage du volume total du lac.	207

Figure.120 La variation du niveau du lac et les prélèvements associés pour la saison 2010-2011.....	209
Figure.121 La variation du niveau du lac et les prélèvements associés pour la saison 2011-2012.....	209
Figure.122 Les éléments climatiques (température, précipitations et hauteur de neige) pour la saison 2010-2011.....	209
Figure.123 Les éléments climatiques (température, précipitations et hauteur de neige) pour la saison 2011-2012.....	210
Figure.124 Les prélèvements et les variations journalières du niveau du lac pour les mois de janvier 2011 et 2012.	212
Figure.125 La variation du niveau du lac et des prélèvements de janvier à mars 2011	213
Figure.126 Le marnage du lac et les situations à risque.....	214
Figure.127 Sonde des Prodains à l'aval de la station d'Avoriaz.	221
Figure.128 Délimitation du sous bassin versant des Prodains.....	222
Figure.129 Volumes des prélèvements sur le volume global écoulé dans la Dranse de Sous-Saix à la sonde des Prodains en 2010-2011.	226
Figure.130 Part des prélèvements mensuels sur les écoulements de la Dranse de Sous-Saix à l'échelle de l'année 2010-2011.	227
Figure.131 Part des prélèvements mensuels sur les écoulements de la Dranse de Sous-Saix à l'échelle de l'année 2011-2012.	228
Figure.132 Le niveau du lac et le trop plein à 13,19 m pour les deux années d'étude.....	230
Figure.133 Le débit de la Dranse de Sous-Saix pour l'année 2010-2011.....	232
Figure.134. Le débit de la Dranse de Sous-Saix pour l'année 2011-2012.....	233
Figure.135 Données de températures, de précipitations et de hauteurs de neige pour l'année 2010-2011.....	234
Figure.136 Niveau du lac 1730 et débits de la Dranse de Sous-Saix pour l'année 2010-2011.	236
Figure.137 Lac vidangé pour réparation de la bache de fond.....	236
Figure.138 Données de températures, de précipitations et de débits pour l'année 2011-2012	238
Figure.139 Niveau du lac 1730 et débits de la Dranse de Sous-Saix pour l'année 2011-2012.	239
Figure.140 Le bassin versant des Dranses et ses 5 sous bassins versants.	240
Figure.141 Le débit mensuel moyen de la Dranse à la sonde des Prodains et à la station de Seytroux entre 2010 et 2012.	241
Figure.142 Les activités dans le bassin versant de la Dranse de Sous-Saix.	242
Figure.143 Carte de l'activité pêche sur le bassin des Dranses.	243
Figure.144 Les activités sur le bassin versant de la Dranse de Morzine.	245
Figure.145 Les Dranses Lémaniques et les aménagements hydroélectriques.....	247
Figure.146 Les zones à risques de conflits liés aux prélèvements en tête de bassin sur la station d'Avoriaz.....	249
Figure.147 Evolution des volumes d'eau utilisés pour la production de neige à l'échelle nationale de 1994 à 2007, et en Savoie et Haute-Savoie de 1988 à 2007 en milliers de mètres cube.....	258
Figure.148 Démission du président-directeur de la SAGETS aux Gets.	269

Figure.149 Brochure « l'eau aux Gets faire face à une situation de crise » distribuée par la mairie en 2007.	270
Figure.150 Les modes de prélèvements en France pour la production de neige.	271
Figure.151 Evolution des volumes prélevés pour la production de neige à l'horizon 2025 pour la France et la Haute-Savoie.	274
Figure.152 Evolution des volumes prélevés pour la production de neige en Suisse pour la station de Champéry.	275
Figure.153 Schéma du rôle de l'aplanissement des surfaces.	278
Figure.154 Exemple d'aplanissement de pistes sur Avoriaz.	279
Figure.155 Barrières à vent sur la piste d'Avoriaz.	280
Figure.156 Schéma de réutilisation des eaux usées pour la production de neige.	281
Figure.157 Les équipements hydroélectriques et les stations de ski dans les massifs du Beaufortin et en Haute Maurienne.	283
Figure.158 Carte du périmètre du SAGE Drac Romanche et des principaux massifs montagneux concernés.	284
Figure.159 Les prélèvements actuels et futurs destinés à la neige de culture.	285
Figure.160 Carte du périmètre du SAGE Arve.	286
Figure.161 Alimentation des enneigeurs en 2007/2008 et projets de modification par la commune des Gets.	288
Figure.162 Projet de schéma environnemental d'Avoriaz.	290

Bibliographie

Bibliographie

24 HEURES CH, 2007. *Les futurs canons à neige français font frémir le bassin de l'Orbe*. 23 mai 2007.

ABEGG, B., 1996. *Klimaänderung und Tourismus. Klimafolgenforschung am Beispiel des Wintertourismus in den Schweizer Alpen*. Schlussbericht NFP 31, Zürich, Vdf Hochschulverlag der ETH Zürich.

ABEGG, B., 2011. *Le tourisme face au changement climatique*. Schaan, CIPRA International.

ACADÉMIE DE L'EAU, 2003. *Guide pour la gestion intégrée de l'eau et des territoires ruraux*. Novembre 2003.

AGENCE FRANÇAISE DE SÉCURITÉ SANITAIRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DU TRAVAIL, 2008. *La neige de culture. Évaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation d'adjuvants pour la fabrication de la neige de culture*. Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail. Mai 2008.

AGENCE RHÔNE MÉDITERRANÉE ET CORSE, 1996. *Gestion des terrains en montagne*. Rapport technique, Maison-Alfort, n°16. pp.195-199

AGRAWALA, S., 2007. *Changements climatiques dans les alpes européennes – Adapter le tourisme d'hiver et la gestion des risques naturels*. Paris, OECD.

ALLAIN, S., 2001. Les schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) : une procédure innovante de planification participative de bassin / Participative planning applied to water basins and the management of water resources. In : *Géocarrefour*. 2001. Vol. 76, n° 3, pp. 199-209.

ALLAN, T., 2003. *IWRM/IWRAM : a new sanctioned discourse ?* Université de Londres. Londres, SOAS Water Issues Study Group.

ALPES MAGAZINE, 2010. L'invention des stations de ski (1900-1940). Les Arcs-Avoriaz, l'utopie créatrice (1968-1990). In : *Alpes magazine*. Hiver 2010, numéro spécial, pp. 10-30.

AMÉNAGEMENT ET MONTAGNE, 1995. L'impact de la neige de culture. In : *Aménagement et Montagne*. Septembre 1995. N° 131, pp. 34-42.

AMOUDRY, J-P., 2002. *L'avenir de la montagne : un développement équilibré dans un environnement préservé* [en ligne]. Mission commune sur la politique de la montagne. SENAT, Tome 1. [Consulté le 28 mai 2013]. Disponible à l'adresse : <http://89.202.136.71/rap/r02-015-1/r02-015-11.pdf>.

AMOUREUX, C., 2000. L'implantation du ski alpin dans les Alpes Françaises : la tradition étayage de la modernité. In : *Revue de Géographie Alpine*. 2000. N° 88-4, pp. 9-20.

ANEM, 2007. *Au-delà du changement climatique, les défis de l'avenir de la montagne* [en ligne]. Association Nationale des Elus de la Montagne. [Consulté le 21 mars 2010]. Disponible à l'adresse : http://www.anem.org/fr/anem/documents/Audeladuchangementclimatique_lesdefisdelavenirdelamontagne_25_10_07_secu_000.pdf.

Bibliographie

ANPNC, 2005. *Association Nationale des Professionnels de la neige de culture*. Journal officiel.

ASSEMBLÉE DU PAYS TARENTOISE-VANOISE, 2008. *Bilan quantitatif de la ressource en eau sur le bassin versant de l'Isère en amont d'Albertville*. Rapports/études, Sepia conseil.

ASSOCIATION DE SAUVEGARDE DU LÉMAN, 2005. Etats généraux de l'eau de la région lémanique. In : *Revue de l'Association de sauvegarde du Léman*. 27 octobre 2005. N° 58, pp. 35.

ASSOCIATION NATIONALE DES MAIRES DES STATIONS DE MONTAGNE, 2007. *Charte nationale en faveur du développement durable dans les stations de montagne*. Paris, ANMSM.

ASSOCIATION PRO NATURA – PRO SKI, 2004. L'audit environnemental des domaines skiables : manuel pour une revalorisation écologique. In : *Association Pro natura – Pro ski*. pp. 108.

ASTERS, 2009. *Réserve Naturelle Nationale du Delta de la Dranse Sites Natura 2000 FR 8201719 et FR 8210018*. Plan de gestion et Document d'objectifs 2010-2019, Pringy, ASTERS, Tome 1.

ATOUT FRANCE, 2009. *Données des prélèvements d'eau pour la neige*.

AVIGNON, C., 2007. La production de neige artificielle détériorerait les Alpes. In : *Journal de l'environnement*. Avril 2007.

AVORIAZ, 1962. *Convention d'aménagement d'Avoriaz*.

BADRÉ, M., PRIME, J-L. et RIBIERE, G., 2009. *Neige de culture : Etat des lieux et impacts environnementaux. Note socio-économique*. La Défense, Conseil général de l'environnement et du développement durable.

BAILLAT-BALLABRIGA, A., 2007. *Utilisation et Gestion des Ressources en Eau dans le Canton du Valais*. INTERREG III Le Haut Rhône et son Bassin Versant Montagneux : Pour une Gestion Intégrée de Territoires Transfrontaliers.

BAILLY, A., 2002. Pour un développement durable des stations de sports d'hiver. In : *Revue de géographie alpine*. Décembre 2002. Tome 90, n° 4, pp. 117-120.

BALLU, Y., 1993. *A la conquête du Mont-Blanc*. Trieste, Découvertes Gallimard.

BARCZAK, A., 2007. «Régime hydrologique», *Glossaire pluridisciplinaire : Les mots de l'eau*. Revues shs.

BARRAQUÉ, B., 1995. Les politiques de l'eau en Europe. In : *Revue française de sciences politique*. Vol. 3, pp. 420-453.

Bibliographie

- BASSIN RHÔNE MÉDITERRANÉE-CORSE, 2010. *Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux. Documents d'accompagnement. Vers le bon état des milieux aquatiques.* Lyon, Agence de l'eau Rhône Méditerranée, Corse.
- BATARD, M-F. et TICHET, M-P., 2010. Pourquoi la neige naturelle ne semble pas suffire. In : *Le Dauphiné Libéré.*
- BAUD, P., BOURGEAT, S. et BRAS, C., 2003. *Dictionnaire de géographie.* Paris, Initial, 3ème édition.
- BAUMGARTNER, A., REICHEL, E. et WEBER, G., 1983. *Der Wasserhaushalt der Alpen.* Munich, Oldenburg Verlag.
- BENISTON, M., 2006. Mountain weather and climate: a general overview and a focus on climatic change in the alps. In : *Hydrobiologia.* N° 562, pp. 3-16.
- BENNAÇAR, N., 2003. *L'eau et le droit international.* Thèse de doctorat d'université. Nice, Institut du droit de la paix et du développement,.
- BERLIOZ, F., 2007. *Neige de culture et évolution de l'offre et de la demande de ski.* Chambéry, CoDERST Savoie « neige de culture »..
- BERLIOZ, F. et DENARIE, M., 2004. La neige de culture en France : aspects économiques et environnementaux. In : *PCM le pont.* Vol. 102, n° 6-7, pp. 37.
- BERNOUX, P., 1985. *La sociologie des organisations.* Paris, Editions du Seuil.
- BESSOU, M-C., 2010. Les canons à neige sauvent la station de Laguiole. In : *La dépêche.* 5 janvier 2010.
- BEZINGE, A. et BONVIN, G., 1974. *Image du climat sur les Alpes.* Bulletin de la Murithienne. Volume 9, pp. 27-48.
- BG, 2012. *Mission d'études et d'aide à la décision dans le cadre du projet « Eco stations ».* BG 21.
- BIAIS, J-M., 2008. Interdire les canons à neige ? In : *L'Express.* Avril 2008. pp.3.
- BIANCHI, C., 2007. *Gestion de la ressource en eau sur la commune du Grand Bornand.* Travail d'étude et de recherche, master 1, Chambéry, Université de Savoie.
- BIAU, A., DUCROS, A. et PULOU, J., 2006. Neige artificielle : raisons et déraisons. In : *La lettre eau.* N° 37, pp. 14-15.
- BIAU, A., 2002. Neige artificielle. Raisons et déraisons. In : *France nature environnement.* N° 37, pp. 2.
- BIDALOT, Y., 2006. *Impacts du changement climatique sur les milieux montagnards.* Réseau action climat.

Bibliographie

BIGOT, S., LAURENT, J.P., ROME, S. et BIRON, P-E., 2006. Mise en place d'un observatoire pour le suivi éco-climatique des Hauts Plateaux du Vercors. In : *XIXe colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Epernay, pp. 125-130.

BIGOT, S. et ROME, S., 2010. Contraintes climatiques dans les Préalpes françaises : évolution récente et conséquences potentielles futures. In : *EchoGéo* [en ligne]. Décembre 2010, n° 14. [Consulté le 7 janvier 2011]. Disponible à l'adresse : <http://echogeo.revues.org/12160#quotation>.

BILLET, J., 1990. Hydrologie : la recherche, la gestion de l'eau et le développement. In : *Revue de Géographie Alpine*. Vol. 78, n° 4, pp. 14-21.

BOIS, A., 2004. *La réalisation de réserves d'eau en milieu montagnard*. Paris.

BONNET, E., 2006. *Evolution du climat en Haute Maurienne : plus de sécheresse ? Vers une gestion concertée de la ressource en eau*. Chambéry, Université de Savoie.

BONRIPOSI, M., 2013. *Analyse systémique et prospective des usages de l'eau dans la région de Crans-Montana-Sierre (Suisse)*. Thèse de doctorat. Lausanne, Université de Lausanne.

BORSODORF, A. et BRAUN, V., 2008. Panorama de la recherche sur la montagne en Europe et dans le monde. In : *Revue de Géographie Alpine*. Vol. 96, n° 4, pp. 101-116.

BOUËT, M., 1950. La pluie en Valais. In : *Bulletin de la Murithienne*. N°67, pp.1-22.

BOUËT, M., 1973. *Climat et météorologie de la Suisse romande*. Lausanne, Payot.

BOUËT, M., 1986. *Climat et météorologie de la Suisse romande*. Lausanne, Payot.

BOURDEAU, P., 2006. *La montagne, terrain de jeu et d'enjeux. Débats pour l'avenir de l'alpinisme et des sports de nature* [en ligne]. L'Argentière-la-Bessée, Editions du Fournel. [Consulté le 25 mars 2009]. Disponible à l'adresse : http://www.editions-fournel.fr/catalogue/pages/liste_livre.php?CID=102.

BOURDEAU, P., 2007. *Les sports d'hiver en mutation. Crise ou révolution géo-culturelle ?* Paris, Editions Hermès-Lavoisier.

BOURDEAU, P., 2006. Acht Fragen zur Zukunft des Alpentourismus. Huit questions à l'avenir du tourisme alpin. In : *Alpine space - Man & environment*. Vol. 1, pp. 69-82.

BOURDEAU, P., 2008. Les défis environnementaux et culturels des stations de montagne Une approche à partir du cas français. In : *Téoros*. pp. 22-31.

BOURREAU, P., 2004. *Avoriaz, l'aventure fantastique*. Saint-Just-la-Pendue, La Fontaine Siloé.

BOUTAN, M-A., 2005. *Gestion intégrée et patrimoniale des ressources en eau : le cas de Saint-Gervais-les-Bains (Haute-Savoie)*. Travail d'étude et de recherche de master 1 en géographie. Le Bourget du Lac, Université de Savoie.

BOUTAUD, A., 2004. *Le développement durable : penser le changement ou changer le pansement ?* Thèse de doctorat. EMSE. Saint-Etienne, Ecole nationale supérieure des mines.

Bibliographie

BRAVARD, J-P.. *Impacts of climate change on the management of upland waters: The Rhone river case* [en ligne]. Bron. [Consulté le 17 février 2012]. Disponible à l'adresse : http://rosenberg.ucanr.org/documents/Bravard_Rhonecanada.pdf.

BRETHAUT, C., 2012. *Analyse comparée de régimes institutionnels de gestion des réseaux urbains de l'eau en station touristique de montagne, les cas de Crans-Montana (Suisse) et de Morzine-Avoriaz (France)*. Thèse de doctorat. Sion, IUKB-Université de Lausanne.

BRETHAUT, C., 2012. *Comparative analysis of the institutional regimes of urban water networks in tourist resorts, the case-studies of Crans-Montana (Switzerland) and Morzine-Avoriaz (France)*. EAWAG social science seminar.

BRÉTHAUT, C., 2011. *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. Sion, Institut universitaire Kurt Bösch.

BRILLAUD, M-A., LUEZ, A., RODICQ, M. et BARD, D., 2005. *Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail*. Rennes, Ecole nationale de la santé publique.

BROC, N., 1991. *Les montagnes au siècle des Lumières. Perception et représentation*. Mémoires de la section de géographie physique et humaine. Paris, CTHS Comité des travaux historiques et scientifiques.

BRUNDTLAND, G-H., 1987. *Notre avenir à tous*. Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation des Nations Unies.

BRUNET, R., FERRAS, R. et THÉRY, H., 1992. *Les mots de la géographie, dictionnaire critique*. La documentation française. Paris, Reclus.

BUACHE, P., 1752. *Essai de géographie physique, où l'on propose des vues générales sur l'espèce de Charpente du Globe, composée des chaînes de montagnes qui traversent les mers comme les terres, avec quelques considérations particulières sur les différents bassins de la mer, et sur sa configuration intérieure*. Compte-Rendus et Mémoires de l'Académie Royale des Sciences.

BUNDI, U., 2003. *La richesse en eau des Alpes au centre de multiples enjeux* [en ligne]. EAWAG. La gestion de l'eau à l'épreuve des territoires. [Consulté le 7 février 2009]. Disponible à l'adresse : http://www.eawag.ch/publications/eawagnews/www_en55/en55f_printer/en55f.pdf.

BUREAU D'INGÉNIEURS ET GÉOLOGUES TISSIÈRES SA, 2009. *Télé Champéry – Crosets Portes du Soleil (TCCPS) SA Télémorgins SA*. Martigny, Télé Champéry Crosets.

CABRET, N., 2004. Les additifs ajoutés à l'eau des canons à neige artificielle favorisent la pollution des sols. In : *Le Monde*. Avril 2004. pp. 23.

CALBERAC, Y., 2011. Le terrain des géographes est-il un terrain géographique ? Le terrain d'un épistémologue. In : *Les carnets de géographes*. Mars 2011. N° 2, pp. 8.

Bibliographie

CALVO, J-P., DESANDRE, A., HERNANDEZ, G. et PONZO, L., 2005. *Changement climatique et tourisme de montagne* [en ligne]. Paris, Ecole nationale des Ponts et Chaussées. [Consulté le 5 février 2012]. Disponible à l'adresse : <http://onerc.developpement-durable.gouv.fr/en/biblio/410-changement-climatique-et-tourisme-de-montagne>.

CALVO- MENDIETA, I., 2005. *L'économie des ressources en eau : de l'internalisation des externalités à la gestion intégrée. L'exemple du bassin versant de l'Audomarois*. Thèse de doctorat d'université. Lille, Université des sciences et technologies de Lille. Faculté des Sciences Économiques et Sociales.

CAMBON, J-P., MATHYS, N., MEUNIER, M. et OLIVIER, J-E., 1990. Mesures des débits solides et liquides sur des bassins versants expérimentaux de montagne. In : *Hydrological Measurements; the Water*. N° 193, pp. 8.

CAMPION, T., 2002. *Impact de la neige de culture* [en ligne]. Agence de l'eau Rhône-Méditerranée & Corse. [Consulté le 2 janvier 2011]. Disponible à l'adresse : http://www.economie.eaufrance.fr/IMG/pdf/Neige_culture_AERMC.pdf.

CANARDEAU, P., 2010. *La fausse neige nous prend pour des flocons* [en ligne]. Collectif vieille montagne. [Consulté le 3 septembre 2013]. Disponible à l'adresse : http://collectifveillemontagnes2.files.wordpress.com/2012/05/canard-ench_neige.pdf.

CANTON DU VALAIS, 2007. *Qualité des cours d'eau en Valais*. Sion, Département des transports, de l'équipement et de l'environnement.

CARAVELLO, G., CRESCINI, E., TAROCCO, S. et PALMERI, F., 2006. Environmental modifications induced by the practice of « artificial snow-making » in the Obereggen/Val d'Ega Area (Italy). In : *Journal of Mediterranean Ecology*. Vol. 7, n° 1-2-3-4.

CARREL, F., 2004. La poudreuse artificielle pas vraiment blanche comme neige. In : *Libération*. Février 2004.

CASANOVA, J-F., 2007. Agriculture contre neige de culture. In : *Dauphiné Liberé*. 6 novembre 2007, pp. 4.

CASTELLANI, C., 1986. Régionalisation des précipitations annuelles par la méthode de la régression linéaire simple : l'exemple des Alpes du Nord. In : *Revue de géographie alpine*. Vol. 74, n° 74-4, pp. 393-403.

CAVIGLIA, J., GALINIER, S., LEGENDRE, A., PETRE, M. et THIELBAULT, H., 2004. La quête de l'or blanc. In : *Mountain wilderness*. N° 61, pp. 15-21.

CEMAGREF, 2004. Neige de culture et SNOMAXTM : quels impacts sur l'environnement ? In : *Notre-Planète.info* [en ligne]. Avril 2004. [Consulté le 20 janvier 2010]. Disponible à l'adresse : http://www.notre-planete.info/actualites/actu_342_snomax_impacts_environnement.php.

CHAIX, C., 2007. *Climatologie hivernale des versants alpins (Savoie) : types de temps, températures et vents. Analyse des données météorologiques des domaines skiables*. Thèse de doctorat d'université. Chambéry, Université de Savoie.

Bibliographie

CHARDON, M., 1984. Montagne et haute montagne alpine, critères et limites morphologiques remarquables en haute montagne. In : *Revue de géographie alpine*. Vol. 72, n° 2-4, pp. 213-224.

CHARETTON, P., 1994. *La pratique du sport en milieu naturel, quelle compatibilité avec la protection de l'environnement ?* Les cahiers de l'université sportive d'été. Union nationale des clubs universitaires (UNCU); Union syndicale des journalistes sportifs français (USJSF). Sports et environnement. La montagne, les hommes et leurs reliefs.

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 d'université. Chambéry, Université de Savoie.

CHAROLLAIS, J. et BADOUX, H., 1990. *Suisse Lémanique. Pays de Genève et Chablais*. Guides géologiques régionaux. Paris, Masson.

CHOISNEL, E., 1987. Aspect topoclimatique : une méthode d'étude en région de moyenne montagne. In : *Agrométéorologie des régions de moyenne montagne*. pp. 177-195.

CHRISTOL, A., 2011. *Les variations de niveau du lac de Van (Turquie) : Indicateurs morphosédimentaires, Implications paléoclimatiques et paléohydrologiques*. Thèse de doctorat d'université. Paris, Paris Diderot Paris 7.

CIPRA, 2004. *L'enneigement artificiel dans l'arc alpin. Rapport de synthèse* [en ligne]. [Consulté le 18 novembre 2010]. Disponible à l'adresse : http://www.cipra.org/pdfs/454_fr/at_download/file.

CLARIMONT, S., 2001. Le bassin-versant : un territoire pour l'action ? In : *Montagnes Méditerranéennes*. N° 14, pp. 37-41.

COMITÉ DE BASSIN RHONE MÉDITERRANÉE, 2008. *2010-2015. SDAGE et programme de mesures du bassin Rhône-Méditerranée. Tous engagés pour l'eau*. Lyon, Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse.

COMMISSION EUROPÉENNE, 2004. N° 2002. *Zones de montagne en Europe : analyse des régions de montagne dans les États membres actuels, les nouveaux États membres et d'autres pays européens*. Rapport final. CE.16.0.AT.136. Nordregio..

COMMISSION INTERNATIONALE POUR LA PROTECTION DES EAUX DU LÉMAN, 2000. *Plan d'action 2001-2010, en faveur du Léman, du Rhône et de leurs affluents*. Commission internationale pour la protection des eaux du Léman.

COMMISSION INTERNATIONALE POUR LA PROTECTION DES ALPES – CIPRA FRANCE, FÉDÉRATION FRANÇAISE DES CLUBS ALPINS ET DE MONTAGNE - FFCAM, FÉDÉRATION RHÔNE-ALPES DE PROTECTION DE LA NATURE – FRAPNA et MOUNTAIN WILDERNESS FRANCE, 2009. *Communiqué de presse Réponse des associations à la campagne d'information du Syndicat National des Téléphériques de France (SNTF) au sujet de la neige artificielle*.

Bibliographie

COMMISSION INTERNATIONALE POUR LA PROTECTION DES EAUX DU LÉMAN, 2011. *L'essentiel en bref. Bilan 2001-2010. Plan d'action 2011-2020. En faveur du Léman, du Rhône et de leurs affluents.*

COMMISSION LOCALE DE L'EAU, 2012a. *Observation de l'eau Drac-Romanche. Indicateurs de la gestion de l'eau.* Commission locale de l'eau Drac-Romanche.

COMMISSION LOCALE DE L'EAU, 2012b. *Observatoire de l'eau Drac et romanche Indicateurs de la gestion de l'eau 1er rendu.* Commission locale de l'eau Drac-Romanche.

COMMUNE DE MORZINE, 2005. *Bilan d'exploitation 2004-2005. Station d'Avoriaz.*

COMMUNES DE TROIS TORRENTS, VAL D'ILLIEZ, CHAMPÉRY ET MONTHEY, 2006. *Règlement du plan d'aménagement détaillé. Domaine skiable des Portes du Soleil.*

CONFÉDÉRATION SUISSE. *Pistes de ski et enneigement: principes.* Office Fédéral de l'Environnement (OFEV).

CONFÉDÉRATION SUISSE, 2009. *Annuaire hydrologique de la Suisse. 2008.* Berne, Office Fédéral de l'Environnement (OFEV).

CONFÉDÉRATION SUISSE, 2011. *Evaluation intermédiaire politique régionale Etat des lieux en œuvre. Département fédéral de l'économie DFE. Secrétariat d'Etat à l'économie SECO. Direction de la promotion économique. Politique régionale et d'organisation du territoire de la nouvelle (NPR) du SECO 2010 et conclusions.* Berne, Confédération Suisse.

CONSEIL COMMUNAUTAIRE, 1975. *Directive n° 75/268/CEE sur l'agriculture de montagne et certaines zones défavorisées.* Avril 1975.

CONVENTION ALPINE, 1991a. *Protocole d'application de la convention alpine de 1991 dans le domaine de la protection des sols.*

CONVENTION ALPINE, 1991b. *Protocole d'application de la convention alpine de 1991 dans le domaine du tourisme.*

CONVENTION ALPINE, 2009a. *L'eau et la gestion des ressources en eau dans les Alpes. Rapport sur l'état des Alpes.* Bolzano-Bozen.

CONVENTION ALPINE, 2009b. *L'eau et la gestion des ressources en eau. Rapport sur l'état des Alpes.* Bolzano-Bozen.

CONVENTION ALPINE, 2009c. *L'eau et la gestion des ressources en eau. Rapport sur l'état des Alpes. Edition spéciale 2.* Bolzano-Bozen.

CONVENTION ALPINE, 2009d. *Water and water management issues-Report on the State of the Alps.*

COOKE, R., 1993. *Etude post-impact de l'aménagement des pistes de ski alpin sur le Mont Giroux* [en ligne]. Ministère du loisir, de la Chasse et de la Pêche. Parc du Mont-Orford. [Consulté le 20 novembre 2010]. Disponible à l'adresse : <http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/mont-orford/documents/DC21.pdf>.

Bibliographie

CORDONIER, A., STRAUB, F., BERNARD, R. et BERNARD, M., 2003. Bilan de la qualité de l'eau des rivières valaisannes à l'aide des diatomées. In : *Bulletin des sciences naturelles du Valais, la Murithienne*. Tome 12, n° 121, pp. 73-82.

COSANDEY, C., 2007. *Les eaux courantes*. Géographie et environnement. Paris, Belin Sup.

COSANDEY, C. et ROBINSON, M., 2000. *Hydrologie continentale*. Paris, Armand Colin.

COTTET, L., FAVARGER, S., FERREIRA, I. et VIVIANA, J-Y., 2006. *Les bases légales réglementant la distribution d'eau*. Genève, Haute Ecole de Gestion de Genève.

COURRIER DE LA NATURE, 2008. En Ariège, menacé par une station de ski.... In : *Courrier de la nature*. Mai-juin 2008, n° 239, pp. 8.

CPIE HAUTE-DURANCE, 2005. *La neige de culture*. Des glaciers à la Méditerranée. Briançon, CPIE Haute-Durance.

D'URSO, J., 2006. *La gestion publique de l'eau en Suisse*. Carouge. Haute Ecole de Gestion de Genève. Cahier de recherche de la Haute Ecole de Gestion de Genève.

DABURON, A., 1989. *La Réhabilitation des surfaces dégradées des domaines skiables : une nouvelle conception de l'aménagement des stations : cas de l'Isère et de la Savoie*. Thèse de doctorat d'université. Grenoble, Université de Grenoble 1.

DALY, H-E. et FARLEY, V., 2011. *Ecological Economics: Principles and Applications*. In : *Island Press*.

DE JONG, C., 2007. Artificial snow drains mountain resources. In : *EnvironmentalResearchWeb* [en ligne]. Août 2007. [Consulté le 1 septembre 2012]. Disponible à l'adresse : <http://environmentalresearchweb.org/cws/article/opinion/30703>.

DE JONG, C., 2008. Resource conflicts in mountain: source and solutions. In : *Mountain Forum Bulletin*. Vol. 8, pp. 5-7.

DE JONG, C., 2009. Ecological environmental change and winter sports: lessons learned from the Alps, prospective for China. In : *Winter Universiade Sport Science Conference*. Chine, Harbin Engineering University. pp. 19-32.

DE JONG, C. et BARTH, T., 2008a. Challenges in Hydrology of Mountain Ski Resorts under Changing Climatic and Human Pressures. In : *Surface Water Storage and Runoff: Modeling, In-Situ data and Remote Sensing*. Genève, ESA Proceedings.

DE JONG, C., MASURE, P. et BARTH, T., 2008b. Challenges of alpine catchment management under changing climatic and anthropogenic pressures. In : *International Environmental Modelling and Software Society*. Barcelone, pp. 694-702.

DE ROSNAY, J., 1975. *Le microscope. Vers une vision globale*. Paris, Editions du Seuil.

DEBARDIEUX, B., 1992. La montagne au XVIIIe siècle. In : *Espace géographique*. Tome 21, n° 2, pp. 186-187.

Bibliographie

DELTA ASSOCIATED GROUP, 1984. *Environmental impact information for snowmaking system installation at Mont Orford ski area* [en ligne]. Delta associated group. [Consulté le 10 décembre 2010]. Disponible à l'adresse : <http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/mont-orford/documents/DB74.pdf>.

DEMERS, A-S., 2006. *Les impacts engendrés par la modification du régime hydrique, découlant de l'enneigement artificiel*. [en ligne]. Sherbrooke, Université de Sherbrooke. [Consulté le 4 janvier 2011]. Disponible à l'adresse : http://www.usherbrooke.ca/environnement/publications/ouvrages/essais_memoires/ASDemers.pdf.

DENARIE, M., 2005. *Coûts de fonctionnement des installations de neige de culture en France : saison 2004/2005*. Chambéry, ODIT France/SEATM.

DÉPARTEMENT DE HAUTE-SAVOIE, 2012. *Retenue collinaire Mont d'Arbois. Commune de Megève*.

DÉPARTEMENT FÉDÉRAL DE L'INTÉRIEUR, 1991. *Modification du paysage en faveur de la pratique du ski*. Directives pour la protection de la nature et du paysage. Berne, Département fédéral de l'intérieur. Tome 2.

DÉPARTEMENT FÉDÉRAL DE L'INTÉRIEUR, 1999. *Le débit d'étiage Q347. Etat de la question*. Berne, Service hydrologique et géologique national.

DÉRIOZ, P. et BACHIMON, P., 2009. Le tourisme montagnard au crible de la durabilité. In : *Revue de géographie alpine*. [en ligne]. Vol. 97, n° 3. [Consulté le 20 septembre 2012]. Disponible à l'adresse : <http://rga.revues.org/963>.

DESCAMPS, P., 2008. La montagne victime des sports d'hiver. In : *Monde diplomatique*. Février 2008. pp. 20-21.

DESCROIX, L. et LASSERRE, F., 2003. *La gestion intégrée des ressources en eau par bassin : au delà de la rhétorique*. Paris, L'Harmattan.

DEVARENNES, G., 1993. Composition physico-chimique de la neige artificielle et les impacts des eaux de fonte sur deux espèces végétales des écosystèmes montagneux au Québec. In : *Western snow conference*. pp. 8. [en ligne]. [Consulté le 5 janvier 2011]. Disponible à l'adresse : http://www.westernsnowconference.org/proceedings/pdf_Proceedings/1993%20WEB/Devarennes,StudentPaperAward.pdf.

DI MÉO, G., 1998. De l'espace aux territoires : éléments pour une archéologie des concepts fondamentaux de la géographie. In : *L'information géographique*. Vol. 62, n° 3, pp. 99-110.

DIETZ, S. et NEUMAYER, E., 2007. Weak and strong sustainability in the SEEA: concepts and measurement. In : *Ecological Economics*. Vol. 61, n° 4, pp. 617-626.

DINGER, F., 1991. Enneigement artificiel entre développement touristique et milieu naturel. In : *Alpes Dauphine-Savoie*. N° 68, pp. 14-17.

Bibliographie

DINGER, F., 1996. Les techniques de réhabilitation des domaines skiables. In : *Neige et avalanches*. Septembre 1996. N° 75, pp. 6-12.

DINGER, F., 2006. Snowmax, neige de culture et environnement. In : *Revue générale du froid*. Janvier 2006, pp. 30-37.

DINGER, F., 2004. Neige de culture et snomax : quels impacts sur l'environnement ? In : *Info Médias*. Avril 2004, n° 62, pp. 2.

DINGER, F. et DUBOST, S., 1995. *L'impact des installations de neige de culture sur l'environnement*. CEMAGREF.

DIRECTION DÉPARTEMENTALE DE L'ÉQUIPEMENT 74, 2008. *Un exemple d'utilisation de la base de données Domaines skiables 74 : l'analyse du risque d'impossibilité de pratique du ski dans les conditions climatiques actuelles et sous un scénario de réchauffement*. Annecy.

DIRECTION DÉPARTEMENTALE DE L'ÉQUIPEMENT ET DE L'AGRICULTURE DE SAVOIE, 2009. *Gestion durable des territoires de montagne. La neige de culture en Savoie et Haute-Savoie*. Chambéry, Université de Savoie.

DIRECTION DÉPARTEMENTALE DES TERRITOIRES DE LA SAVOIE, 2011. *Eau et neige de culture en Savoie Observatoire 2010-2011*.

DIRECTION RÉGIONALE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'AMÉNAGEMENT ET DU LOGEMENT, 2011. *Projet intitulé « Retenue d'altitude du Fornet-programme de travaux d'enneigement-Station d'Avoriaz »*. Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement.

DOMAINES SKIABLES DE FRANCE, 2010. *Analyse de l'activité des domaines skiables de la Haute-Savoie. Saison 2009/2010*.

DOMAINES SKIABLES DE FRANCE, 2011a. La neige de culture. Aménagement durable et économie des stations. In : *Info presse*. pp. 2.

DOMAINES SKIABLES DE FRANCE, 2011b. *Recueil d'indicateurs et analyses 2011*.

DOMAINES SKIABLES DE FRANCE, 2012a. *Indicateurs et analyses 2012*.

DOMAINES SKIABLES DE FRANCE, 2012b. Pour un aménagement durable des domaines skiables. In : *Info presse*. pp. 4.

DOMENEGO, J-C., 2008. La lettre du milieu montagnard. In : *La lettre du milieu montagnard*. Club alpin français, n° 17, pp. 2.

DOUELLE, I., 2002. Enneigement et variations du climat. In : *Météo France*. Paris, janvier 2002, pp. 4.

DOUILLET, B. et MONNET, J., 2009. *SAGETS. Remontées mécaniques-Les Gets*. Lyon, Ecole supérieure de commerce.

Bibliographie

DUBOIS, G. et CERON, J-P., 2006a. *Adaptation au changement climatique et développement durable du tourisme. Etude exploratoire en vue d'un programme de Recherche*. Marseille, TEC.

DUBOIS, G. et CERON, J-P., 2006b. *Changement climatique et tourisme. Une question de temps*. Novembre 2006, n° 242, pp. 46-53.

DUGAS, S. et GAUTHIER-DÉSORMEAUX, J., 2006. *Neige de culture et snomax : quels impacts sur l'environnement ?* Montréal, Université de Montréal.

DUGLEUX, E., 2002. *Impact de la production de neige de culture sur la ressource en eau* [en ligne]. Agence de l'eau Rhône-Méditerranée & Corse. [Consulté le 2 mars 2012]. Disponible à l'adresse : http://www.inbo-news.org/divers/megeve/eau_montagne_2002/Pdf/dugleux.pdf.

DUPONT, C. et PIGEON, P., 2008. *Le Haut-Rhône et son bassin versant montagneux : pour une gestion intégrée de territoires transfrontaliers. Rapport de synthèse*. Le Bourget-du-lac, Institut de la montagne. Programme INTERREG IIIA France-Suisse.

DURAND, M-G., 1997. Un « système montagne » réinventé : le développement durable dans les Alpes françaises ou la nouvelle gestion globale des territoires. In : *Revue de géographie alpine*. Vol. 85, n° 2, pp. 157-172.

DURAND, Y., LATERNSER, M., GIRAUD, G., ETCHEVERS, P., LESAFFRE, B. et MERINDOL, L., 2009. Reanalysis of 44 years of climate in the French Alps (1958–2002): methodology, model validation, climatology and trends for air temperature and precipitation. In : *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. N° 48, pp. 429-449.

ETCHEVERS, P., GOLAZ, C. et HABETS, F., 2001. Simulation of the water budget and the river flows of the Rhône basin from 1981 to 1994. In : *journal of hydrology*. N° 244, pp. 60-85.

ETCHEVERS, P. et MARTIN, E., 2002. Impact d'un changement climatique sur le manteau neigeux et l'hydrologie des bassins versants de montagne. In : *L'eau en montagne*. Septembre 2002, pp. 8.

EURORIOB, 2006. *Les zones de montagne sont les châteaux d'eau de la planète*. L'eau en montagne. Megève, OIEau / RIOB.

EVETTE, A., PEYRAS, L., FRANÇOIS, H. et GAUCHERAND, S., 2011. Risques et impacts environnementaux des retenues d'altitude pour la production de neige de culture dans un contexte de changement climatique. In : *Revue de géographie alpine*. Vol. 99, n° 3, pp. 13.

FALKEHED, M., 2005. Attention à nos montagnes. In : *Géo*. Mars 2005, n° 313, pp. 34-40.

FELLOUS, J-L. et GAUTIER, C., 2007. *Comprendre le changement climatique*. Courtry, Odile Jacob sciences.

FIERZ, S., 2008. Trois parcours de l'eau. In : *Résonances*.

Bibliographie

- FINGAL, V., 2007. Les canons à neige dessèchent-ils les Alpes ? In : *Le Matin*. Avril 2007.
- FONDATION POUR L'ACTION CULTURELLE INTERNATIONALE EN MONTAGNE (FACIM), 2009. *Cimes 2007 La montagne, univers de tous les possibles ?* Fondation pour l'action culturelle internationale en montagne (FACIM).
- FOUCAULT, A. et RAOULT, J-F., 2003. *Dictionnaire de géologie*. Liège, Dunod. 5ème édition.
- FRANCE INFO, 2010. Jeux d'hiver : Vancouver sous la neige... artificielle. In : *France info*. Février 2010.
- FRANCE NATURE ENVIRONNEMENT, 2004. La lettre eau. In : *revue de France Nature Environnement*. Décembre 2004, n° 29, pp. 12.
- FRANCHETEAU, S., 2007. *L'eau aux Gets. Faire face à une situation de crise*. Les Gets.
- FRANÇOIS, H., 2008. Durabilité des ressources territoriales et tourisme durable : vers quelle convergence ? In : *Géographie Économie Société*. Vol. 10, n° 1, pp. 133-152.
- FRAPNA ISÈRE, 2008. *Guide des bonnes pratiques sportives ou comment prendre en compte l'environnement dans les sports de nature ?* [en ligne]. FRAPNA Isère. [Consulté le 2 avril 2009]. Disponible à l'adresse : <http://www.frapna.org/~documents/gbps.pdf>.
- FURGER, P., 2008. *La planification globale des Portes du soleil*.
- GANNAZ, L., 2005. Canons à neige et canons de l'environnement : un accord discordant. In : *Drédent'pentu*. N° 1, pp. 12-19.
- GARNIER, J., BILLEN, G. et LEVASSOR, A., 1998. Fonctionnement et impacts écologiques des réservoirs de Champagne. In: *La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*, Meybeck M., De Marsily G & Fustec F. (Eds). Paris, Elsevier.
- GAUCHON, C., 2009. Les hivers sans neige et l'économie des sports d'hiver Un phénomène récurrent, une problématique toujours renouvelée. In : *Collection EDYTEM*. N° 8, pp. 193-204.
- GAUVIN, A., HURAND, A., ROUSSEL, C., DOUTRIAUX, H. et AVANZINI, S., 2008. *Le futur des stations de ski en 2040*. Observatoire du management alternatif. Paris, HEC. pp. 263-300.
- GETCHES, D., 1999. La gouvernance de bassin versant : des limites naturelles pour des décisions relatives aux ressources naturelles. In : *Espaces et sociétés*. N° 97-98, pp. 111-132.
- GHIOTTI, S., 2006. Les Territoires de l'eau et la décentralisation. La gouvernance de bassin versant ou les limites d'une évidence. In : *Développement durable et territoires*. Dossier 6. [en ligne]. [Consulté le 5 avril 2011]. Disponible à l'adresse : <http://developpementdurable.revues.org/1742>.
- GLEIZES, C., 1977. Les ressources en eau. Revue de l'aménagement et de l'équipement du milieu rural. In : *Revue de l'aménagement et de l'équipement du milieu rural*. pp. 24-34.

Bibliographie

GODARD, A. et TABEAUD, M., 2002. *Les climats. Mécanismes et répartition*. Coursus. Paris, Armand Colin.

GOUANELLE, C., 2009. La neige artificielle en question. In : *Sud-ouest nature*. Janvier 2009, n° 143, pp. 16-17.

GRAEFE, O., 2011. River Basins as new Environmental Regions? The depolitization of water management. In : *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. N° 14, pp. 24-27.

GRAEFE, O., 2013. The river basin as a territorial water management unit. Towards post-political water management. In : *“European Continental Hydrosystems under Changing Water Policy”*, Arnaud-Fassetta G., Masson E., Reynard E. (Eds). München, Friedrich Pfeil Verlag, pp. 11-16.

GRAINDORGE, J., 2008. *La loi sur l'eau et les milieux aquatiques décryptée et appliquée*. Dossier d'experts. Voiron, La lettre du cadre territorial.

GRISELIN, M. et MARLIN, C., 1999. Approche quantitative et géochimique du gradient altitudinal des précipitations sur un bassin versant partiellement englacé sur la côte occidentale du Spitsberg. In : *La Houille Blanche*. Août 1999, n° 5, pp. 34-39.

GRUJARD, E., 2003. La gestion de l'eau à l'épreuve des territoires. In : *Hérodote*. N° 110, pp. 47-69.

GUILLEBON, E. et BONTEMPS, P., 2002. *Développement économique et protection de l'environnement : propositions pour la montagne*. IUCN Comité Français : Groupe Montagne.

HAMEL, J., 2008. Qu'est-ce que l'objectivation participante? Pierre Bourdieu et les problèmes méthodologiques de l'objectivation en sociologie. In : *Socio-logos. Revue de l'association française de sociologie*. N° 3. [en ligne]. [Consulté le 7 septembre 2012]. Disponible à l'adresse : <http://socio-logos.revues.org/1482>.

HAMILTON, L-S. et KING, P-N., 1984. Watersheds and rural development planning. In : *The Environmentalist*. Vol. 4, n° 7, pp. 80-86.

HARNEIS, R., 2011. La neige de culture qui fait vivre les stations. In : *Ski Info* [en ligne]. 31 octobre 2011. [Consulté le 3 septembre 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.skiinfo.fr/actualites/a/93327/la-neige-de-culture-qui-fait-vivre-les-stations>.

HASSID, M-J., 2003. Gestion de la ressource en eau et contrainte touristique en montagne : alimenter et entretenir le manteau neigeux. In : *Géocofluences*. N° 4. [en ligne]. [Consulté le 5 juillet 2009]. Disponible à l'adresse : <http://geoconfluences.ens-lsh.fr/doc/brevets/2003/03-4.htm>.

HASSID, M-J., 2007. L'agriculture et l'aménagement des domaines skiables dans les Alpes : des enjeux environnementaux en montagne. In : *Géocofluences* [en ligne]. [Consulté le 17 mars 2009]. Disponible à l'adresse : <http://geoconfluences.ens-lsh.fr/doc/transv/DevDur/DevdurScient5.htm>.

Bibliographie

HASSID, M-J., ARNOULD, P. et WICHREK, S., 2006. Evaluation du transfert des éléments traces métalliques vers les eaux superficielles - : Application au terrassement et à la végétalisation des pistes de ski. In : *Ingénieries*. N° 48, pp.13-28.

HINGRAY, B., PICOUET, C. et MUSY, A., 2009. *Hydrologie. Une science pour l'ingénieur*. Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes.

HUOVINEN, C., 2004. Kunstschnee – was steckt dahinter? In : *Newsletter Naturgafahren*. pp. 2.

INSTITUT DE LA MONTAGNE, 2011. *Atelier Impact des évolutions climatiques en montagne*. Chambéry, Institut de la montagne.

INTER-ENVIRONNEMENT WALLONIE, 2006. *Recours d'Inter-Environnement Wallonie contre le permis unique pour l'implantation et l'exploitation d'une piste pour la pratique du ski alpin et de loisirs d'été, ses équipements techniques et d'accueil rue Aisomont* [en ligne]. Inter-Environnement Wallonie. [Consulté le 5 mars 2011]. Disponible à l'adresse : <http://www.iewonline.be/IMG/pdf/590recours-ski-3ponts-061026.pdf>.

INTERNATIONAL SKI FEDERATION, 2012. *Règlement de la coupe du monde FIS de ski alpin*.

JONHSON CONTROLS, 2010. Introduction à l'enneigement. Comment cela fonctionne? In : *Neige de culture*. Chambéry. Avril 2010, pp. 32.

JUNOD, T. et SUEUR, R., 2005. *Analyse de la conception des installations sportives d'importance nationale (CISIN). Le cas du centre national de glace de Champéry*. Travail du cours Analyse des politiques publiques du prof. Chavannes-Lausanne, Peter Knoepfel IDHEAP.

KELLER, T., 2004. Impact of artificial snow and ski-slope grooming on snowpack properties and soil thermal regime in a sub-alpine ski area. In : *Annals of Glaciology*. N° 38, pp. 314-318.

KNAFOU, R., 1978. Les stations intégrées de sports d'hiver dans les Alpes Françaises. In : *Revue de géographie alpine*. Vol. 66, n° 66-4, pp. 485-487.

KNAFOU, R., 2004. *Les Alpes. Une montagne au cœur de l'Europe*. pp. 63.

KNOEPFEL, P., KISSLING-NÄF, I. et VARONE, F., 2003. *Régimes institutionnels des ressources naturelles : analyse comparée du sol, de l'eau et de la forêt*. Basel, Helbing & Lichtenhahn.

KOENIG, U. et ABEGG, B., 1997. Impacts of Climate Change on Winter Tourism in the Swiss Alps. In : *Journal of sustainable tourism*. Janvier 1997. Vol. 5, n° 1, pp. 46-58.

KOSCIELNY, M., 2008. Impacts des aménagements en montagne sur les processus hydrologiques et l'évolution géodynamique des versants (Les Arcs, Savoie, France). In : *Bull Eng Geol Environ*. Juin 2008, pp. 585-595.

Bibliographie

KUCHLER, M., 2004. *Vergleich der Vegetation auf Künstlich beschneiten und unbeschneiten Skipisten, sowie auf Grasland ohne Skibetrieb*. Davos Dorf, Institut fédéral de recherche WSL.

L'HOMME, D., DZIKOWSKI, M., NICOUD, G. et NAFFRECHOUX, E., 1995. Réponses d'un aquifère fissuré de haute montagne à la fusion nivale Morzine-Avoriaz, Haute-Savoie. In : *La Houille Blanche*. Vol. 7, pp. 83-87.

L'OFFICE INTERNATIONALE DE L'EAU, 2001. *Guide de recommandations pour une meilleure gestion de l'eau entre les régions de têtes de bassin et d'aval*. Limoges, Office internationale de l'eau.

LA CROIX, 2007. Certaines stations de moyenne altitude vivent au jour le jour. Décembre 2007.

LA LIBERTÉ, 2007. Les canons à neige menaceraient les Alpes. In : *La Liberté*. avril 2007.

LABONNE, S., 2007. *Restauration de la végétation sur les pistes de ski* [en ligne]. Coll. Fiches de synthèse Alpes. Grenoble, CEMAGREF. [Consulté le 5 mars 2011]. Disponible à l'adresse : http://www.echoalp.com/alpes/download/Vegetation_pistes_ski.pdf.

LACHENAL, P., 2010. *Cahier de bonnes pratiques pour la "culture de la neige" Membres du Site Pilote "Eau en Montagne"*. Novembre 2010 Propositions d'action. Site pilote l'eau en montagne.

LACROIX, P., 2009. *Relation entre prélèvements et disponibilités des ressources en eau dans les Alpes. 3 cas de stations en Savoie et Haute Savoie : l'impact du tourisme de masse*. ENTPE.

LAGARDE, L., 1998. *Philippe Buache (1700-1773), Cartographe ou géographe ?* », in : *Terre à découvrir, terres à parcourir. Exploration et connaissance du monde XII – XIX siècle*. Lecoq D., Chambard A. (Dir.). Paris, L'Harmattan. pp. 147-166.

LANG, T., 2009. *Energetische bedeutung der Technischen pistenbeschneigung und Potentiale für energieoptimierungen*. Confédération suisse.

LARDREAU, F., 2003. Neige éternelle ? La neige artificielle en question. In : *La montagne et alpinisme*. N° 211-1, pp. 32-41.

LARGEY, T., 2004. Portes du Soleil : bientôt une planification du domaine skiable ? In : *Pro natura magazine*. Janvier 2004, n° 1, pp. 25.

LARGEY, T., 2008. Tête de Balme : non à un nouveau domaine skiable ! In : *Pro natura magazine*. N° 5, pp. 35.

LASSERRE, F. et BRUN, A., 2007. La gestion intégrée par bassin versant : un outil de résolution des conflits ? In : *Lex Electronica*. Vol. 12, n° 2, pp. 19.

LE CONSEIL D'ETAT DU CANTON DU VALAIS, 2009. *Décision concernant la protection des bas-marais d'importance cantonale Culet, Madzé, commune de Trois torrents; Délifrête, Sur Crête, Lac Vert, commune de Val-d'Illiez; Planachaux, Le Pisa-Ripaille, commune de Champéry*. Sion, Le Conseil d'Etat du canton du Valais.

Bibliographie

LE DAUPHINÉ LIBÉRÉ, 1964. De la neige artificielle pour les stations de sports d'hiver. 14 janvier 1964.

LE HIR, P., 2008. La neige de culture pèse sur l'eau et la biodiversité. In : *Le Monde*. Décembre 2008.

LE MATIN, 2008. *Un canon israélien crache de la neige à Zermatt*. 20 novembre 2008.

LE MESSAGER DU CHABLAIS, 2011. *La vérité sur la neige artificielle*. 3 mars 2011, pp. 3.

LE MESSAGER DU CHABLAIS, 2007. *Rotations d'hélicoptères à Saint-Jean d'Aulps*. 4 janvier 2007.

LE MESSAGER DU CHABLAIS, 2007. Démission du président-directeur de la Sagets. 1er février 2007.

LEBLANC, J-M., 2011. *Dynamique de la couverture neigeuse dans les Andes Tropicales Vallée du Rio Zongo, Bolivie*. Thèse de doctorat d'université. Montpellier, Institut de recherche pour le développement Great Ice / Maison des Sciences de l'Eau – Montpellier Département Milieux et Environnement de l'IRD.

LELEU, J., 2009. Neige de culture, l'enquête qui dérange. In : *Le Dauphiné Libéré*. 26 octobre 2009.

LENFANT, A., 2010. Retenues d'eau en altitude pour la production de neige Réalisation Prise en compte des risques. Chambéry, avril 2010.

LERENDU, S. et DESAUBES, B., 2011. *Avoriaz 188. Dossier de presse hiver 2011*. Avoriaz, France.

LEROY, M., 2000. *Estimation de l'incertitude de mesure des précipitations*. Météo France. Note interne de la DSO.

LIBÉRATION, 2004. La poudreuse artificielle pas vraiment blanche comme neige. In : *Libération*. Février 2004, pp. 25

LICHTENEGGER, E., 1990. 110 : *Enneigement et végétation*. Fédération Internationale de Ski.

LIN, W. et BUEH, C., 2006. The cloud processes of a simulated moderate snowfall event in North China. In : *Advances in atmospheric sciences*. Vol. 23, n° 2, pp. 235-242.

LINER, M., 2008. Une piste de neige artificielle de Lausanne à Bruxelles. In : *Pro natura magazine*. N° 1, pp. 24-25.

Loi fédérale sur la protection de la nature et du paysage LPN, 1966. 1^{er} juillet 1966. RS n°451.

Loi cantonale d'introduction de la LIM, 1975. 6 mai 1975.

Loi fédérale sur l'aménagement du territoire LAT, 1979. 22 juin 1979. RS n° 700.

Bibliographie

Loi fédérale sur l'aménagement du territoire, 1987. 23 janvier 1987. RS VS N° 701.1.

Loi fédérale sur la protection des eaux, 1991. 24 janvier 1991. RS n°814.20.

LOUBIER, J-C., 2004. *Perception et simulation des effets du changement climatique sur l'économie du ski et la biodiversité (Savoie et Haute-Savoie)* [en ligne]. Grenoble, Université Joseph Fourier-Grenoble I. [Consulté le 5 janvier 2010]. Disponible à l'adresse : <http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/04/71/31/PDF/tel-00006990.pdf>.

LOUBIER, J-C., 2007. Changement climatique et domaines skiabiles : simulation en Savoie et Haute-Savoie à l'horizon 2015. In : *Mappemonde*. Janvier 2007, n° 85, pp. 9.

LUSSAULT, M. et LÉVY, J., 2003. *Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés*. Paris, Belin.

MAGNIER, E., 2013. Artificial snow and water uses in mountain tourist resorts. The Dranse de Sous Saix catchment area (Haute-Savoie, France). In : *European continental hydrosystems under changing water policy*. Arnaud-Fassetta G., Masson E., Reynard E. (Eds). Munich, Verlag Dr.Friedrich Pfeil. pp. 193-205.

MAILLET, M., 2008b. *A propos de la neige artificielle / Note pour la Mission d'Inspection du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du développement Durable et de l'Aménagement du Territoire* [en ligne]. Mission Montagne de France Nature Environnement. [Consulté le 5 mars 2012]. Disponible à l'adresse : <http://fne.asso.fr/fr/themes/question.html?View=file&CategoryID=149&EntryID=115>.

MAILLET, M., 2008b. Porta –Porte des neiges UTN. Projet de station de ski. In : *Avis de FRENE-66* [en ligne]. [Consulté le 5 novembre 2010]. Disponible à l'adresse : http://montagne-protection.org/ariege-pyrenees_0000f2.html.

MAINGUY, J., 1990. Climatologie : Potentialités thermiques de l'enneigement artificiel. In : *Revue de Géographie Alpine*. Vol. 78, n° 4, pp. 22-29.

MAIRIE DES GETS, 2010. *La vie Getoise. Bulletin municipal*.

MANIGUET, F., 1997. *Tests de descripteurs de régimes hydrologiques (aspects quantitatifs)*. Note de travail du Conseil Scientifique du Bassin RMC. Lyon, Cemagref.

MARCELPOIL, E. et BOUDIÈRES, V., 2006. Gouvernance touristique des grandes stations et durabilité. Une lecture en termes de proximité. In : *Développement durable et territoires*. n° 7. [en ligne]. [Consulté le 7 janvier 2009]. Disponible à l'adresse : <http://developpementdurable.revues.org/document2648.html>.

MARCELPOIL, E. et GERBAUX, F., 2006. Gouvernance et stations de sports d'hiver. In : *Revue de Géographie Alpine*. Mars 2006, Tome 94, n° 1, pp. 112.

MARCELPOIL, E. et LANGLOIS, L., 2006. Protection de l'environnement et développement touristique en station : du conflit à l'organisation des proximités. In : *Développement durable et territoires*. N° 7. [en ligne]. [Consulté le 20 janvier 2009]. Disponible à l'adresse : <http://developpementdurable.revues.org/document2660.html>.

Bibliographie

- MARNEZY, A., 2003. Ressource hydraulique et diversification des usages. Le cas de la haute vallée de l'Arc. In : *Colloque Barrages et développement durable en France*. Paris, 18 novembre 2003, pp. 89-98.
- MARNEZY, A., 2008. Les barrages alpins De l'énergie hydraulique à la neige de culture. In : *Revue de Géographie Alpine*. Vol. 96, n° 1, pp. 13.
- MARNEZY, A. et PACCARD, P., 2007. *Thème 3 : Utilisation et gestion des ressources en eau. Rapport de synthèse Bassin hydrographique français du Haut Rhône*. « Le Haut-Rhône et son bassin versant montagneux : pour une gestion intégrée de territoires transfrontaliers » des sources du Rhône à la sortie du Jura. INTERREG IIIA France-Suisse.
- MARNEZY, A. et RAMPNOUX, J-P., 2006. Retenues d'altitudes et neige de culture dans les Alpes françaises du Nord : caractéristiques, répartition, alimentation en eau, impacts sur les milieux. In : *Colloque L'eau en montagne : gestion intégrée des hauts bassins versants*. Megève, 20 septembre 2006, pp. 66.
- MARTIN, E., 1939. Climat de la Savoie. In : *Persée*. Vol. 15, n° 1, pp. 43-68.
- MARTIN, E., BRUN, E. et DURAND, Y., 1994. Sensitivity of the French Alps snow cover to the variation of climatic variables. In : *Annales Geophysicae*. N° 12, pp. 469-477.
- MATHER, A-S. et CHAPMAN, K., 1995. *Environmental resources*. Harlow, Longman.
- MAVILLA-WOEFFRAY, M., 2008. Pourquoi une planification globale des Portes du Soleil ? In : *Le régional*. 22 octobre 2008, n° 441, pp. 22.
- MEISSNER, S. et RELIER, A., 2005. Pour une gestion durable des ressources en eau dans les Alpes. In : *Revue de Géographie Alpine*. Vol. 93, n° 3, pp. 5-29.
- MERCALLI, L., MORRA DI CELLA, U., CREMONESE, E., AGNESOD, G., MÉRIAUX, P., 2008. *Surveillance, exploitation et entretien des retenues d'altitude pour l'alimentation des installations de neige de culture*. La Motte d'Aveillans, avril 2008, pp. 32.
- MERIAUX, P., DEGOUTTE, G., GIRARD, H. et PEYRAS, L., 2006. Sécurité et pathologie des barrages pour la production de neige de culture : premiers retours d'expérience. In : *Ingénieries*. pp. 69-76.
- MERMET, L., 1992. *Stratégies pour la gestion de l'environnement. La nature comme jeu de société ?* Paris, Harmattan.
- MERMET, L. et TREYER, S., 2001. Quelle unité territoriale pour la gestion durable de la ressource en eau ? In : *Annales des Mines*. Avril 2001, pp. 80.
- MESSERLI, B. et IVES, J-D., 1997. *Mountains of the World. A global priority*. New-York, Parthenon Publishing.
- MESSERLI, B. et IVES, J-D., 1999. *Les montagnes dans le monde. Une priorité pour le développement durable*. Grenoble, Glénat.

Bibliographie

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE ET LE SECÉRÉTARIAT DE LA CONVENTION ALPINE, 2008. Appel à présentation de réalisations touristiques durables et innovantes dans les Alpes. In : *communiqué de presse du Ministère de l'Écologie et le Secrétariat de la Convention Alpine*. Décembre 2008, pp. 4.

MIQUEL, G., 2003b. *RAPPORT sur «la qualité de l'eau et de l'assainissement en France»*. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. Tome II.

MOINE, A., 2006. Le territoire comme un système complexe : un concept opératoire pour l'aménagement et la géographie. In : *L'espace géographique*. Vol. 35, n° 2, pp. 115-132.

MOLLE, F., 2006. *Planning and managing water resources at the river-basin level: Emergence and evolution of a concept*. Colombo, International Water Management Institute.

MONTAGNE LEADERS, 2007a. Ischgl, "l'Ibiza des Alpes". In : *Montagne Leaders*. Novembre 2007, n° 204, pp. 62.

MONTAGNE LEADERS, 2007b. Montagne expansion. In : *Montagne Leaders*. Octobre 2007, n° 203.

MONTI, P., FERNANDO, H.J.S. et PRINCEVAC, M., 2002. Observations of flow and turbulence in the nocturnal boundary layer over a slope. In : *Journal of Atmospheric Sciences*. Vol. 59, n° 17, pp. 2513-2534.

MORIN, E., 1990. *La méthode*. Paris, Le Seuil.

MORIN, E. et LE MOIGNE, J-L., 1999. *L'intelligence de la complexité*. Paris, L'Harmattan.

MOSIMANN, T., 1998. *Beschneigungsanlagen in der Schweiz. Weitere Entwicklung - Umwelt-verträglichkeit und Folgerungen für die Prüfung und Bewilligung von Beschneigungsanlagen*. Hanovre, Schweizerisches Verband der Seilbahnunternehmungen.

MOUGIN, P., 2001. *Les torrents de la Savoie. Savoie et Haute-Savoie. Inondations et catastrophes*. Saint-Etienne, La fontaine de Siloé.

MOUNET, J-P., 2004. Sports de nature et environnement : élaboration d'un instrument d'évaluation environnementale pour le Plan départemental des Espaces, sites et itinéraires relatifs aux sports de nature de l'Ardèche. In : *Université Joseph Fourier : laboratoire SENS ; Association Cohérence pour un développement durable*. FRAPNA Ardèche. pp. 78.

MOUNTAIN RIDERS, 2006. *Le guide vert des stations de montagne : le développement durable en montagne* [en ligne]. [Consulté le 5 janvier 2012]. Disponible à l'adresse : <http://www.mountain-riders.org/presse/guidevert.pdf>.

MOUNTAIN RIDERS, 2008. *L'éco-guide des stations de montagne 2008-2009* [en ligne]. [Consulté le 24 janvier 2010]. Disponible à l'adresse : http://www.mountain-riders.org/_EcoGuideStations/docs/ecoguide-08.pdf.

MOUNTAIN WILDERNESS, 2005. Enneigement artificiel, Eau secours! In : *Mountain wilderness*. Décembre 2005, pp. 6.

Bibliographie

MOUNTAIN WILDERNESS, 2006. L'enneigement artificiel en question. In : *circulaire commune CIPRA*. Fédération française des Clubs alpins et de montagne, Mountain Wilderness, FRAPNA. Décembre 2006, pp. 2.

MOUNTAIN WILDERNESS, 2008. Le ski, une industrie en question. In : *Mountain wilderness*. N° 77, pp. 7-15.

MOUNTAIN WILDERNESS, 2010. *Enneigement artificiel. Les canons à l'assaut des cimes*. Grenoble, Mountain Wilderness.

MOUNTAIN WILDERNESS, 2004. *La quête de l'or blanc*. Automne 2004, n° 61, pp. 28.

MOUNTAIN WILDERNESS, 2005. *Enneigement artificiel : Eau secours !* Décembre 2005, pp. 6.

MÜLLER, H., WEBER, F. et THALMANN, E., 2007. *Les changements climatiques et la Suisse en 2050 Impacts attendus sur l'environnement, la société et l'économie*. Berne.

MUSY, A., HIGY, C. et REYNARD, E., 2013. *Hydrologie. Une science de la nature, une gestion sociétale*. Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes (sous presse).

NAKAYA, U., 1938. Artificial snow. In : *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Vol. 64, n° 277, pp. 619-624.

NATIONAL SKI AREAS ASSOCIATION (NSAA), 2005. *Sustainable slopes : the environmental charter for ski areas* [en ligne]. National Ski Areas Association (NSAA). [Consulté le 5 janvier 2012]. Disponible à l'adresse : http://www.nsaa.org/nsaa/environment/sustainable_slopes/Charter.pdf.

NEIRINCK, V., 2004. Canon à neige, au secours ! In : *Bulletin Mountain Wilderness*. Trimestre 4, n° 54. [en ligne]. [Consulté le 20 janvier 2010]. Disponible à l'adresse : http://www.mountainwilderness.fr/index.php?option=com_content&task=view&id=605&Itemid=730.

OBSERVATOIRE DU TOURISME VALAISAN, 2012. *Enneigement artificiel. Audit du canton de Vaud*.

OBSERVATOIRE SAVOIE MONT-BLANC TOURISME, 2008a. *Chiffres-clés Haute-Savoie*. Savoie Mont-Blanc tourisme.

OBSERVATOIRE SAVOIE MONT-BLANC TOURISME, 2008b. *Chiffres-clés Haute-Savoie. 2008*. Savoie Mont-Blanc tourisme.

OBSERVATOIRE SAVOIE MONT-BLANC TOURISME, 2009a. *La fréquentation touristique en Haute-Savoie*. Savoie Mont-Blanc tourisme.

OBSERVATOIRE SAVOIE MONT-BLANC TOURISME, 2009b. *La fréquentation touristique en Haute-Savoie. Hiver 2008/2009*. Savoie Mont-Blanc tourisme.

OBSERVATOIRE VALAISAN DU TOURISME, 2012. *Remontées mécaniques 2012. Focus* [en ligne]. [Consulté le 2 avril 2011]. Disponible à l'adresse : http://www.tourobs.ch/media/101615/focus_remonte_esme_ca_fr_lowrez.pdf.

Bibliographie

- OCDE, 2002. *Examens territoriaux de l'OCDE. Suisse*. Paris, Les éditions de l'OCDE.
- OCDE, 2011. *Examens territoriaux de l'OCDE : Suisse*. Paris, Les éditions de l'OCDE.
- OCDE (OECD), 2007. *Changements climatiques dans les alpes européennes : Adapter le tourisme d'hiver et la gestion des risques naturels*. Paris, Les éditions de l'OCDE.
- ODIT FRANCE, 2006. *Les chiffres clés du tourisme de montagne en France*. Paris, Odit France. 5ème édition.
- ODIT FRANCE, 2007. *Valorisation touristique du patrimoine et du paysage dans les territoires de montagne*. Paris, Odit France.
- ODIT FRANCE, 2008a. *Bilan de fonctionnement des installations de neige de culture. Saison 2007-2008*. Paris, Odit France.
- ODIT FRANCE, 2008b. *Domaines skiables face aux aléas d'enneigement et le développement de la neige de culture* [en ligne]. [Consulté le 15 janvier 2009]. Disponible à l'adresse : <http://www.odit-france.fr/publication/domaines-skiables-face-aux-aleas-d%E2%80%99enneigement-et-le-developpement-de-la-neige-de-cultur>.
- ODIT FRANCE, 2008c. *L'expertise technique et économique des domaines skiables alpins*. Paris, Odit France.
- ODIT FRANCE, 2008d. *Les domaines skiables face aux aléas d'enneigement et le développement de la neige de culture*. Paris, Odit France.
- ODIT FRANCE, 2009. *Les chiffres clés du tourisme de montagne en France*. Paris, Odit France. 7ème édition.
- OFFICE DU TOURISME DES GETS, 2010. Nouveautés hiver 2009-2010. Les Gets, pp. 14.
- OFFICE FÉDÉRAL DE L'ENVIRONNEMENT (OFEV), 2007a. *Utilisation de durcisseurs de neige*. Office Fédéral de l'Environnement (OFEV). L'environnement pratique.
- OFFICE FÉDÉRAL DE L'ENVIRONNEMENT (OFEV), 2007b. *Utilisation de durcisseurs de neige : Notice destinée aux exploitants de pistes de ski de compétition et aux organisateurs de compétitions de sports de neige*. [en ligne]. Office Fédéral de l'Environnement (OFEV). [Consulté le 2 avril 2012]. Disponible à l'adresse : <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00068/index.html?lang=fr&downloadshop=NHzLpZig7t,lnp6I0NTU042l2Z6ln1ae2lZn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCDdHt,hGym162dpYbUzd,Gpd6emK2Oz9aGodetmqaN19XI2IdvoaCVZ,s-.pdf>.
- ON THE SNOW, 2008. *Zermatt fabriquera de la neige à « n'importe quelle température »*. Octobre 2008.
- ONERC, 2008. 1 : *Changement climatique dans les Alpes : Impacts et risques naturels*. ClimChAlp. Interreg IIIB alpine space.
- ORBELIN, G. et HUBERT, P., 1999. *Refondation du concept de régime hydrologique*. Rapport quadriennal 1995-1998 du CNFGG, pp. 269-277.

Bibliographie

Ordonnance sur le cadastre de la production agricole et la délimitation de zones, 1998. 7 décembre 1998, 912.1.

Ordonnance sur les produits chimiques, 2005. 18 mai 2005.

PACCARD, P., 2008. *Gestion des impacts des installations « neige de culture » sur l'environnement des milieux de montagne*. Chambéry, EDYTEM Université de Savoie.

PACCARD, P., 2009. Réchauffement climatique et ressource neige en domaines skiables. In : *Neige et glace de montagne : Reconstitution, dynamique, pratiques*. Collection EDYTEM - Cahiers de Géographie. N° 8, pp. 181-192.

PACCARD, P., 2009. Un exemple d'exploitation des ressources en eau du karst : la production de neige à Villard-de-Lans – Corrençon-en-Vercors. In : *Karstologia*. N° 53, pp. 7-16.

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 d'université. Chambéry, Université de Savoie.

PACCARD, P. et MARNEZY, A., 2009. La neige de culture: une nouvelle fonction pour les barrages de montagne. In : *Au fil de l'eau*. Colloque 11-14 mars 2009. Maison des sciences de l'Homme de Clermont-Ferrand.

PAJEOT, E., 2007. L'avenir des stations est-il assuré par les enneigeurs ? Quels problèmes pose leur utilisation ? In : *Nature et patrimoine en pays de Savoie*. N° 21, pp. 12-15.

PALAZOT, S., 2011. *Réutilisation des eaux usées des stations d'épuration de montagne pour la production de neige de culture*. Paris, ENGREF-AgroParisTech.

PARDÉ, M., 1933. *Fleuves et rivières*. Paris, Armand Colin.

PATTHEY, P., WIRTHNER, S., SIGNORELL, N. et ARLETTAZ, R., 2008. Impact of outdoor winter sports on the abundance of a key indicator species of alpine ecosystems. In : *Journal of Applied Ecology*. Décembre 2008, Vol. 45, n° 6, pp. 1704-1711.

PIÉGAY, H., DUPONT, P. et FABY, J-A., 2002. Questions of water resources management. Feedback on the implementation of the French SAGE and SDAGE plans (1992–2001). In : *Water policy*. Vol. 4, n° 3, pp. 239-262.

PIELMEIER, C., 2003. *Textural and mechanical variability of mountain snowpacks*. Bern, Université de Bern.

PILLET, G., 1993. *Economie écologique. Introduction à l'économie de l'environnement et des ressources naturelles*. Genève, Georg.

PILLET, G. et BARANZINI, A., 1993. Entre écologie et économie : le dilemme de l'eau. In : *Bulletin de l'ARPEA*. N° 176, pp. 9-21.

PLANCHEREL, R., 1998. *Carte géologique de la France 1:50 000; Samoëns-Pas-de-Morgins*. Orléans, BRGM.

Bibliographie

PLU MORZINE. *PLU Morzine-Avoriaz*. Architecte Urbaniste Bernard Lemaire.

PONS, N., 2008. *Les stations de ski du Pays des Ecrins dans une perspective de développement durable. Réalisation d'un diagnostic environnemental expérimental dans les stations de Pelvoux - Vallouise et Puy - Saint - Vincent* / *Projet 2007-2008* [en ligne]. Alliance dans les Alpes. [Consulté le 2 janvier 2011]. Disponible à l'adresse : <http://www.alpenallianz.org/fr/projets/dynalp2/projets-dans-les-communes/417>.

PONTOIRE, F., 2008. Second forum international d'Avoriaz « Les stations de montagne s'engagent pour la planète ». Avoriaz, 12 mars 2008, p p. 15.

POURRIOT, P. et MEYBECK, M., 1995. *Limnologie générale*. Paris, Masson.

PROBST, A., 2006. *Compétitivité des domaines skiables en Valais, Suisse et pays environnants. Benchmark des installations d'enneigement mécanique et autres atouts compétitifs*. Sierre, Haute école Valaisanne.

PRÖBSTL, U., 2006. *Kunstschnee un Umwelt. Entwicklung und Auswirkungen der technischen Beschneigung*. Bern Stuttgart Wien, Eds. Haupt Verlag.

RAFFESTIN, C., 1986. Ecogénèse territoriale et territorialité ». In : *Espaces, jeux et enjeux*, Auriac F., Brunet R. (Eds). Paris, Fayard. pp.175-185.

RAFFESTIN, C., 1992. Propriété, espace et territoire. In : *La négociation. Son rôle, sa place dans l'aménagement du territoire et la protection de l'environnement*. Ruegg J. Mettan N., Vodoz L. (Eds). Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes. pp. 155-163.

RAMPNOUX, J-P., 1993. *Rapport géologique sur les périmètres de protection des captages de la station d'Avoriaz. Commune de Morzine (Haute-Savoie)*. Chambéry.

RÉDACTION DU DAUPHINÉ, 2010. Neige artificielle : ce que pensent les associations de protection de la nature. In : *Le Dauphiné Libéré*. 22 janvier 2010.

RÉGION PROVENCE-ALPES-CÔTE D'AZUR, RÉGION RHÔNE-ALPES, L'ETAT, AGENCE DE L'EAU RHÔNE-MÉDITERRANÉE-CORDE et AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE, 2007. *Convention interrégionale Pour le massif des alpes 2007 – 2013*.

RÉGION RHÔNE ALPES, 2009. *Charte nationale en faveur du Développement durable dans les Stations de Montagne. Dossier sommaire de candidature*.

REMONTÉES MÉCANIQUES SUISSES, 2010. *L'enneigement, facteur de succès. Faits et chiffres*.

REY, Y., 2009. L'eau source de vie... In : *L'encoche*. Décembre 2009, n° 13, pp. 13.

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 d'université. Lausanne, Université de Lausanne.

Bibliographie

REYNARD, E., 2000b. Cadre institutionnel et gestion des ressources en eau dans les Alpes: deux études de cas dans des stations touristiques valaisannes. In : *Swiss Political Science Review*. Vol. 6, n° 1, pp. 33.

REYNARD, E., 2001. Aménagement du territoire et gestion de l'eau dans les stations touristiques alpines. Le cas de Crans-Montana-Aminona (Valais, Suisse). In : *Revue de Géographie Alpine*. Vol. 89, n° 3, pp. 7-19.

REYNARD, E., 2005. Les conditions naturelles et la construction des bisses du Valais. In : *Institut de géographie*. Mars 2005, pp. 10.

REYNARD, E., 2008. Transporter l'eau : regards croisés sur les réseaux urbains et ruraux de l'eau en Suisse. In : *Flux*. Vol. 2-3, n° 72, pp. 27-38.

REYNARD, E. et BAUD, M., 2001a. 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*. Aubriot O., Jolly G. (Eds). Provence, Alpes, Pyrénées, 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: *The impact of urbanisation, industrial, agricultural and forest technologies on the natural environment*. Neményi, M., Balint, H (Eds). Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron. pp.281-301.

REYNARD, E., MAUCH, C. et THORENS, A., 2001. Développement historique des régimes institutionnels de l'eau en Suisse entre 1870 et 2000. In : *Institutionnelle Regime für natürliche Ressourcen: Boden, Wasser und Wald im Vergleich*. Knoepfel, P., Kissling-Näf, I. et Varone, F (Eds). Francfort, Helbing & Lichtenhahn. pp.101-139.

REYNARD, E., MAUCH, C. et THORENS, A., 2000. *Screening historique des régimes institutionnels de la ressource eau en Suisse entre 1870 et 2000*. Lausanne, Working paper de l'IDHEAP.

REYNAUD, L., 2008. *Les talents insoupçonnés de la neige de culture*. Syndicat national des téléphériques de France.

RIOB, 2002a. Colloque international « l'eau en montagne, gestion intégrée des hauts bassins versants ». In : *L'eau en montagne*. Septembre 2002, pp. 40.

RIOB, 2002b. L'eau en montagne : gestion intégrée des hauts bassins versants. In : *L'eau en Montagne* [en ligne]. Megève, France. 5 septembre 2002. [Consulté le 7 octobre 2011]. Disponible à l'adresse : http://www.sedhs.com/h2o/site/DOSSIERS_doc/conclusions%20megeve.pdf.

RIOB, 2006. Les zones de montagne sont les châteaux d'eau de la planète. In : *L'eau du monde descend des montagnes*. Megève, septembre 2006, pp. 13.

Bibliographie

RIXEN, C., STROECKLI, V. et AMMANN, W., 2003. Does artificial snow production affect soil and vegetation of ski pistes? In : *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*. Vol. 5, n° 4, pp. 219-230.

RIXEN, C., 2002. *Artificial snow and snow additives on ski pistes : interactions between snow cover, soil and vegetation*. Thèse de doctorat d'université. Zürich, Université de Zürich.

RIXEN, C., CASTELLER, A. et SCHWEINGRUBER, F-H., 2004a. Age analysis helps to estimate plant performance on ski pistes. In : *Botanica Helvetica*. Vol. 114, n° 2, pp. 127-138.

RIXEN, C., STROECKLI, V. et HAEBER, W., 2004b. Ground Temperatures under Ski Pistes with Artificial and Natural Snow. In : *Journal Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. Vol. 36, n° 4, pp. 419-427.

RIXEN, C., STROECKLI, V. et WIPF, S., 2002. *Kuntschnee un Schneesätze : Eigenschaften und Wirkungen auf Vegetation und Boden in alpinen Skigebieten*. Davos, SLF Davos, pp. 11.

ROBERT, P., 1973. *Le Robert En 7 Volumes : Dictionnaire Alphabétique et Analogique De La Langue Française, Les Mots et Les Associations D'idées*. Paris, Société Du Nouveau Littré.

ROCHE, D., 2013. *Les canons à neige d'Isola 2000*. [en ligne]. [Consulté le 3 septembre 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.mairieisola.com/index.php?page=la-neige-de-culture>.

ROMAGNY, B. et CUDENNEC, C., 2006. Gestion de l'eau en milieu aride : considérations physiques et sociales pour l'identification des territoires pertinents dans le Sud-Est tunisien. In : *Développement durable et territoires* [en ligne]. [Consulté le 3 septembre 2013]. Disponible à l'adresse : <http://developpementdurable.revues.org/1805>.

ROUXEL, E., 2012. Les conséquences financières et écologiques de la fabrication de neige artificielle. In : *Le messenger du Chablais*. 12 janvier 2012.

RUGI, T., 2011. *Bilan quantitatif de la ressource en eau Sur le bassin versant de l'Isère En amont d'Albertville*. Mémoire de master. Champs sur Marne, Ecole nationale des sciences géographiques.

RUMPALA, Y., 1999. *Questions écologiques, réponses économiques. Les changements dans la régulation publique des problèmes d'environnement au tournant des années 1980 et 1990. Une analyse intersectorielle*. Thèse de doctorat d'université. Paris, Institut d'Etudes Politiques de Paris.

SCHÉMA DIRECTEUR CLIMAT AIR ENERGIE, 2011. *Projet de SCRAE Rhône-Alpes. Décembre 2011 Partie IV : Document d'orientations*.

SCHOENEICH, P., 1995. *Détermination de paramètres climatiques caractéristiques de la région Vallée des Ormonts - Vallées de l'Etivaz*. Lausanne, Institut de géographie.

SCOTT, D., 2006. *Global environmental change and mountain tourism*. Londres.

Bibliographie

SCOTT, D., MCBOYLE, G., MILLS, B. et MINOGUE, A., 2006. Climate change and sustainability of ski-based tourism in eastern North America : a reassessment. In : *Journal of sustainable tourism*. Vol. 14, n° 4, pp. 376-398.

SEATM, 2002. *Bilan des investissements dans les domaines skiables français en 2002 – les remontées mécaniques, la neige de culture*. SEATM.

SEMADENI, Silva, 1997. *Neige artificielle contenant des additifs biochimiques*. Conseil national. Interpellation 97.3589.

SEPIA CONSEIL, 2009. *Etude et rapport*. SEPIA Conseil.

SEPIA CONSEIL, 2010. *Schéma d'aménagement et de gestion des eaux du bassin versant de l'Arve. Etat initial. Version définitive*.

SÉPIA CONSEIL, 2007. *Le Schéma de conciliation des usages de l'eau pour la CLE Drac-Romanche*.

SERVICE DE L'EAU ET DE L'ASSAINISSEMENT D'AVORIAZ, 2009. *Compte-rendu d'activité-Exercice 2009. Eau potable et assainissement*. Rapport annuel de délégataire. Suez environnement. Lyonnaise des Eaux.

SEVRUK, B., 1997. «Regional dependency of precipitation-altitude relationship in the Swiss Alps. In : *Climatic Change*. N° 36, pp. 355-369.

SIAC CHABLAIS, 2003. *Statuts du syndicat intercommunal d'aménagement du chablais*.

SIAC CHABLAIS, 2011. *Etude quantitative de la ressource en eau-bassin versant des Dranses et de l'Est lémanique. Cahier des clauses techniques particulières*, Thonon les bains, Siac.

SITE PILOTE, 2009a. *Concilier la « culture de la neige » avec les milieux et les autres usages de l'eau en montagne*. Chambéry, Université de Savoie.

SITE PILOTE, 2009b. *Note sur les durcisseurs de neige et évaluation de l'usage sur le bassin versant de l'Arly*. Annecy, Site pilote Eau en montagne « Pays de Savoie, Annecy, Mont-Blanc, Léman ».

SITE PILOTE EAU EN MONTAGNE, 2009. *Descriptif de la base de données « culture de la neige »*. Bassin versant de l'Arly. Annecy, Société d'Economie Alpestre de la Haute-Savoie.

SITE PILOTE EAU EN MONTAGNE, 2009. *Note de synthèse concernant l'état des pratiques de « culture de la neige » sur le bassin versant de l'Arly*. Annecy, Société d'Economie Alpestre de la Haute-Savoie.

SIVOM VALLÉE D'AULPS, 2011. *SIVOM de la Vallée d'Aulps. Modification des statuts*.

SKI FRANCE. Neige de culture Comment l'eau devient cristal le temps d'un hiver? In : *La montagne en mouvement*. Association Nationale des Maires des Stations de Montagne.

SKI FRANCE ASSOCIATION NATIONALE DES MAIRES DES STATIONS DE MONTAGNE, 2007. *Charte nationale en faveur du Développement durable dans les Stations de Montagne*. Nanterre, Ski France. Pp. 32.

SLF, 2012. *La neige de culture* [en ligne]. [Consulté le 2 mars 2012]. Disponible à l'adresse : http://www.slf.ch/forschung_entwicklung/schnee/kunstschnee/index_FR.

SOCIÉTÉS DE REMONTÉES MÉCANIQUES TÉLÉMORGINS SA, POINTE DE L'AU SA et COMMUNE DE VAL D'ILLIEZ, 2006. *Convention entre les sociétés de remontées mécaniques Télémorgins SA / pointe de l'Au SA et la commune de Val d'Illiez*.

SOUHAITE, P., 1993. 7 : *Recueil de fiches d'aide à la prévision montagne en Savoie pour les situations d'hiver*. Monographie n°7. Météo-France.

STEIGER, R., 2004. *Vulnerability and adaptation of winter tourism in Tyroland Bavaria Kühtai*. Innsbruck, Institut de géographie.

STEIGER, R., 2007. *Snowmaking – a suitable adaptation strategy? Examples from Tyrol / Austria*. Innsbruck, Developments in Tourism Climatology.

SWISSINFO, 2007. *Le réchauffement limite les possibilités d'enneigement artificiel*.

SWYNGEDOUW, E, 2009. The antinomies of the post-political city: In search of a democratic politics of environmental production. In : *Journal of Urban and Regional Research*. Vol. 23, n° 3, pp. 601-620.

SYNDICAT MIXTE DE L'AMÉNAGEMENT DE L'ARVE ET DE SES ABORDS, 2012. *Le SAGE du bassin de l'Arve*. Bonneville.

SYNDICAT NATIONAL DES TÉLÉPHÉRIQUES DE FRANCE, 2008a. *Communiqué de presse : les talents insoupçonnés de la neige de culture*. Meylan, Eds. Syndicat national des téléphériques de France.

SYNDICAT NATIONAL DES TÉLÉPHÉRIQUES DE FRANCE, 2008b. *Dossier de presse : les talents insoupçonnés de la neige de culture*. Meylan, Eds. Syndicat national des téléphériques de France.

SYNDICAT NATIONAL DES TÉLÉPHÉRIQUES DE FRANCE, 2008c. *La neige de culture c'est de l'eau de l'air et puis c'est tout*. Meylan, Eds. Syndicat national des téléphériques de France.

SYNDICAT NATIONAL DES TÉLÉPHÉRIQUES DE FRANCE, 2002. *Neige de culture : le savoir et la production*. Meylan, Eds. Syndicat national des téléphériques de France.

SYNDICAT NATIONAL DES TÉLÉPHÉRIQUES DE FRANCE, 2006. *Comment l'eau devient cristal le temps d'un hiver ?* Meylan, Eds. Syndicat national des téléphériques de France.

SYNDICAT NATIONAL DES TÉLÉPHÉRIQUES DE FRANCE, 2009. *Comment l'eau devient cristal le temps d'un hiver ?* Meylan, Eds. Syndicat national des téléphériques de France.

Bibliographie

SYNDICAT NATIONAL DES TÉLÉPHÉRIQUES DE FRANCE, 2010. Domaines skiables de France. In : *Magazine d'information du Syndicat National des Téléphériques de France*. février 2010. Vol. 28, n° 23.

TABEAUD, M. et DELAPORTE, B., 2005. Manteau et tourisme hivernal dans les Alpes : Les savoyards et l'or blanc. In : *Perceptionclimat.net* [en ligne]. [Consulté le 2 janvier 2010]. Disponible à l'adresse : <http://www.perceptionclimat.net/info.php?id=3>.

TARENTEISE VANOISE ASSEMBLÉE DU PAYS, 2008. *Bilan quantitatif de la ressource en eau sur le bassin versant de l'Isère en amont d'Albertville*. Cahier des Clauses Techniques Particulières. Moutiers, Tarentaise Vanoise Assemblée du pays.

TAUXE, D., 2006. *Villages de montagne et réchauffement climatique : quel avenir touristique ?* Sierre, Ecole Suisse de tourisme.

TAVERNIER, N., 2008. L'additif SNOMAX améliore le rendement des canons à neige mais à quel prix ? In : *Notre-Planète.info* [en ligne]. 30 janvier 2008. [Consulté le 20 janvier 2010]. Disponible à l'adresse : http://www.notre-planete.info/actualites/actu_1497.php.

TECHNO ALPIN SNOW EXPERTS, 2003. *The international snow magazine. Snow experts*.

TECHNO ALPIN SNOW EXPERTS, 2010. *1990-2010. 20 years*. Bolzano-Bozen, Techno Alpin.

TEICH, M., LARDELLI, C., BEBI, P., GALLATI, D., KYTZIA, S., POHL, M., PÜTZ, M. et RIXEN, C., 2007. *Klimawandel und Wintertourismus : Ökonomische und ökologische Auswirkungen von technischer Beschneigung (Les retombées économiques et écologiques de l'enneigement artificiel)* [en ligne]. [Consulté le 5 mars 2012]. Disponible à l'adresse : http://www.wsl.ch/forschung/forschungsprojekte/klimawandel_wintertourismus/Schlussbericht_Klimawandel_und_Wintertourismus_.

TÉLÉ CHAMPÉRY-CROSETS PORTES DU SOLEIL, 2006. *Planification globale 2005-2020. Analyse des besoins en eau pour l'alimentation des installations d'enneigement*. Martigny, Bureau d'ingénieurs et géologues Tissières SA.

THILLET, J-J., 2002. *La météo de montagne*. Tours, Seuil.

TINTENBERG, T., 1992. *Environmental and natural resource economics*. New-York, Harper Colins. 3ème édition.

TOUCHART, L., 2000. *Les lacs origine et morphologie*. Paris, Harmattan.

TOUCHART, L., 2002. *Limnologie physique et dynamique : une géographie des lacs et des étangs*. Paris, Harmattan.

UNESCO, 1978. Ressources en eau terrestres/Water resources of the earth. [en ligne]. [Consulté le 27 mai 2011]. Disponible à l'adresse : hydrologie.org/glu/FRDIC/DICRESSO.HTM.

UNESCO, 2009. 83 : *The International Classification for Seasonal Snow on the Ground*. Paris, IHP-VII Technical Documents in Hydrology.

Bibliographie

- URCPIE PROVENCE-CÔTE D'AZUR, 2005. *Neige de culture / fiche d'information* [en ligne]. URCPIE Provence-Côte d'Azur. [Consulté le 24 novembre 2011]. Disponible à l'adresse : <http://cpie.hautedurance.free.fr/Telechargements/NeigedeCulture.pdf>.
- UTTINGER, H., 1966. *Niederschlag*. Schweizer. Zurich, Meteorolog Zentralanstalt.
- VAN LIERDE, N., 2007. *Sports de nature : outils pratiques pour leur gestion*. Collection cahiers techniques. Montpellier, Eds. ATEN. pp. 72.
- VANIER, M., 1997. J'existe donc je découpe. In : *Les découpages du territoire*. INSEE Methodes. Lyon, pp. 17-20.
- VEYRET, Y., BART, F., CASSÉ-CASTELLS, M-C. et DEBARDIEUX, B., 2002. *Les montagnes. Discours et enjeux géographiques*. Liège, Sedes.
- VEYRET, Y., 2002. *Géographie physique et environnement*. Paris, Armand Colin.
- VIDAL, S., 2002. La production de neige de culture pour pistes : Applications industrielles du froid. In : *Revue générale du froid*. Vol. 92, pp. 31-35.
- VILLENEUVE, A., TALLA, P. et MEKOUAR, M., 2002. Le cadre juridique de l'aménagement durable de la montagne: un aperçu des instruments propres à la montagne. In : *Unasylva*. N° 208. [en ligne]. [Consulté le 14 février 2011]. Disponible à l'adresse : <ftp://ftp.fao.org/docrep.../FAO/004/y3549f/y3549f05.pdf>.
- VITALI, D., 2003. Le bassin versant comme territoire des possibles. In : *Revue Méditerranée*. Vol. 100, n° 1-2, pp. 29-34.
- VIVIROLI, D., DÜRN, H H., MESSERLI, B., MEYBECK, M. et WEINGARTNER, R., 2007. Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. In : *Water resources research*. Juillet 2007, Vol. 43, n° 7, pp. 8-9.
- VIVIROLI, D. et WEINGARTNER, R., 2004. The hydrological significance of mountains: from regional to global scale. In : *Hydrology and earth system sciences*. N° 8, pp. 1017-1030
- VIVIROLI, D. et WEINGARTNER, R., 2008. « Water Towers »—A Global View of the Hydrological Importance of Mountains. In : *Advances in Global Change Research*. Vol. 31, pp. 15-20.
- WALTER, C., 1980. *The first artificial snow ever made*. *Yankee*. Janvier 1980, Vol. 44, n° 1, pp. 4.
- WASSON, J-G., 1996. Les SDAGE : une approche écosystémique. In : *La Houille Blanche*. Avril 1996, n° 3, pp. 23-26.
- WHETTON, P-H., HAYLOCK, M-R. et GALOLOWAY, R. *Climate change and snow cover duration in the Australian Alps*. N° 1, pp. 447-479.
- WHITEMAN, CD., 1982. Breakup of temperature inversions in deep mountain valleys : observations. In : *Journal of Applied Meteorology*. Vol. 21, pp. 270-288.

Bibliographie

WHITEMAN, CD., 2000. *Mountain Meteorology, fundamentals and applications*. New-York, OUP USA.

WHITEMAN, CD., 2003. The slope wind system. In : *Summer School of Mountain Meteorology* [en ligne]. Trento, 22 aout 2003. [Consulté le 7 avril 2010]. Disponible à l'adresse : www.unitn.it/convegni/ssmm_lecture.htm.

WIEGANDT, E., 2008. Framing the Study of Mountain Water Resources: An Introduction. In : *Advances in global change research : mountains : sources of water, sources of knowledge*. Wiegandt, E. Dordrecht (Eds). Dordrecht, Springer, pp. 3-13.

WIPF, S., RIXEN, C., FISCHER, M., SCHIMD, B. et STOECKLI, V., 2005. Effects of ski pist preparation on alpine vegetation. In : *Journal of Applied Ecology*. N° 42, pp. 306-316.

WWAP, 2009. *IWRM Guidelines at river basin level*.

WWF, 2008. *Alpi e turismo trovare il punto di equilibrio*. Collana Ecoregione Alpi. Milan, WWF.

Annexes

Annexe 1. Liste des entretiens

- Maire de Morzine. Mr Berger. Septembre 2010
- Maire de Tence. Mr Digonnet. Mars 2012
- DDT 74. Mr Vincent, Service Prospective et Connaissance des Territoires / Cellule SIG
- DDT 74. Mr Delille, Ingénieur de l'Agriculture et de l'Environnement
- Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du Territoire. Mr Ribière, chargé d'inspection générale et membre permanent du Conseil général de l'environnement et du développement durable. Mars 2010.

- SERMA Avoriaz. M. Morand, adjoint au directeur des pistes et de l'enneigement mécanique et adjoint au directeur des pistes. Septembre 2010.
- SERMA Avoriaz. Directeurs et techniciens des pistes. Septembre 2010.
- TéléChampéry- Les-Crosets. Mr R. Monay, directeur. Champéry.
- TéléChampéry- Les-Crosets. Mr J. Nantermod, directeur. Les Crosets.

- Lyonnaise des Eaux. Mr Mouillon, chef du secteur Avoriaz ; Mr Rodrigues, technicien. Mr Christophe Rodrigues de La Lyonnaise des Eaux Avoriaz, Mr Dominique Claudel chef d'agence Haute-Savoie. Septembre 2010, septembre 2011 et juin 2013.

- Services techniques de Morzine. Mr Marullaz. Septembre 2011
- STEP de la Vallée d'Aulps. Mr Rosset et Mme Racadot Marilynne, de la STEP du SIVOM de la vallée d'Aulps. Novembre 2011.

- Direction Régionale de l'Environnement de la région Rhône-Alpes. Mme Ratouis. Septembre 2010 et novembre 2012.
- Savoie Mont-Blanc Tourisme. Mr Lepage.
- Arnaud Brun (Tenevia)

- Jacques Proton, résident de la commune d'Avoriaz et membre de l'Association Avoriaz demain.

Annexe 2. Les paramètres climatiques mensuels dans les stations de mesure MétéoFrance et Office fédérale MétéoSuisse

Station du Pleney (France). D'octobre 1999 à mars 2008

	Cumul des hauteurs de précipitations en mm	Moyenne des températures minimales en °C	Moyenne des températures maximales en °C				
oct-99	131,2	4,8	11,2	janv-03	202,6	-6,6	-1,4
nov-99	117	-2,8	2,6	févr-03	81,4	-7,4	-0,6
déc-99	327,8	-4,5	1,2	mars-03	54,6	0,1	6,9
janv-00	70,4	-4,9	0,5	avr-03	124,2	1	7,9
févr-00	237,6	-3,2	2,6	mai-03	85,2	6,1	13,6
mars-00	131,2	-2,6	4,3	juin-03	117,2	13,8	22,3
avr-00	150,6	1,1	7,9	juil-03	115,2	11,9	19,7
mai-00	154,2	6,4	14,1	août-03	133,6	15,2	22,4
juin-00	117,6	9,5	17,5	sept-03	105,2	7,6	14,1
juil-00	254,6	7,9	15,2	oct-03	296,4	1,3	7,6
août-00	115,2	11,8	18,9	nov-03	73,6	2	7,4
sept-00	95,6	8,1	15,6	déc-03	103,2	-2,8	3,2
oct-00	189,4	3,6	9,4	janv-04	411,8	-5,4	-0,5
nov-00	224,6	-1	3,9	févr-04	45,8	-3,7	2,7
déc-00	99,8	-0,5	4,5	mars-04	97,6	-2,8	2,9
janv-01	212,2	-3,7	1,9	avr-04	95,6	0,5	6,4
févr-01	85,8	-3,8	2,6	mai-04	136,2	3,7	10,2
mars-01	484,8	-0,2	5,3	juin-04	124,8	8,4	15,9
avr-01	266,8	-1,6	4,2	juil-04	152	9,9	18
mai-01	121,2	7	13,6	août-04	267	10,6	18
juin-01	252,4	7,3	14,7	sept-04	76,4	8,3	14,8
juil-01	139,8	10,5	17,9	févr-06	139,7		
août-01	170,6	12	19,1	mars-06	356,1		
sept-01	180	3,8	9,8	avr-06	160,2		
oct-01	90,4	8	14,8	mai-06	228,4		
nov-01	104,6	-2,8	3,3	juin-06	117,1		
déc-01	130,8	-6,7	-0,4	juil-06	137,7		
janv-02	60,6	-2,6	3,3	août-06	261,3		
févr-02	198,6	-2	2,7	sept-06	107,5		
mars-02	121,4	-0,4	5,6	oct-06	121,8		
avr-02	57,8	1	6,1	nov-06	103,3		
mai-02	191,6	4	10,7	déc-06	124,7		
juin-02	136,8	11	18,8	janv-07	166,3		
juil-02	164,4	9,5	17,2	févr-07	186,7		
août-02	168,8	9,5	16,3	mars-07	164,8		
sept-02	95	6,2	12,5	avr-07	33,5		
oct-02	289,2	4	10,4	mai-07	284,6		
nov-02	297,2	0,2	5,3	juin-07	242,7		
déc-02	180,2	-1,2	3	juil-07	377,1		
				août-07	279		
				sept-07	110,5		
				oct-07	24,2		
				nov-07	61,3		
				déc-07	196,9		
				janv-08	121,3		
				févr-08	72		
				mars-08	170,2		

Station de Châtel (France). De novembre 1999 à septembre 2008

	Moyenne mensuelle de l'enneigement en cm	Cumul mensuel de neige fraîche quotidienn e en cm				
	101,5	2		janv-04	35	142
nov-99	12	95		févr-04	41	35
déc-99	35	186		mars-04	23	50
janv-00	51	52		avr-04	1	25
févr-00	54	71		mai-04	1	16
mars-00	32	60		juin-04		
avr-00	1	20		juil-04		
mai-00	0	0		août-04		
juin-00				sept-04		
juil-00				oct-04	0	7
août-00				nov-04	0	9
sept-00				déc-04	14	69
oct-00	0	0		janv-05	45	82
nov-00	6	64		févr-05	73	83
déc-00	6	33		mars-05	51	20
janv-01	34	72		avr-05	3	66
févr-01	39	39		mai-05	0	0
mars-01	25	41		juin-05	0	0
avr-01	6	94		juil-05	0	0
mai-01	0	0		août-05	0	0
juin-01				sept-05	0	0
juil-01				oct-05	0	0
août-01				nov-05	4	42
sept-01				déc-05	46	113
oct-01	0	0		janv-06	82	76
nov-01	3	27		févr-06	82	91
déc-01	7	59		mars-06	93	118
janv-02	21	9		avr-06	13	25
févr-02	18	66		mai-06	1	16
mars-02	12	22		juin-06	0	2
avr-02	0	5		juil-06	0	0
mai-02	1	16		août-06	0	0
juin-02				sept-06	0	0
juil-02				oct-06	0	0
août-02				nov-06	1	9
sept-02				déc-06	6	27
oct-02	0	6		janv-07	9	58
nov-02	3	48		févr-07	15	72
déc-02	4	18		mars-07	7	54
janv-03	26	136		avr-07	0	0
févr-03	71	68		mai-07	0	6
mars-03	23	6		juin-07	0	0
avr-03	2	38		juil-07	0	0
mai-03	0	0		août-07	0	0
juin-03				sept-07	0	0
juil-03				oct-07	0	0
août-03				nov-07	7	40
sept-03				déc-07	32	106
oct-03	2	33		janv-08	38	41
nov-03	4	45		févr-08	48	33
déc-03	10	58		mars-08	7	79
				avr-08	2	39
				mai-08	0	0
				juin-08	0	0
				juil-08	0	0
				août-08	0	0
				sept-08	0	0

Station des Gets (France). D'octobre 1999 à septembre 2008

Dates	Cumul des hauteurs de précipitations en mm	Moyenne mensuelle de l'enneigement en cm	Cumul mensuel de neige fraîche quotidienne en cm	Moyenne des températures minimales en °C	Moyenne des températures maximales en °C
oct-99	106,3	0	3	4,6	12,6
nov-99	113,7	14	88	-3,4	3
déc-99	292,6	33	194	-3,8	2,6
janv-00	70,8	61	49	-5,3	1
févr-00	200,3	51	88	-3,2	3,8
mars-00	113	30	90	-1,2	6,9
avr-00	122,3	1	17	1,6	11
mai-00	158,7	0	0	6,5	17,2
juin-00	109,9			9,5	20,4
juil-00	242,3			9	18,3
août-00	134,8			10,7	21,4
sept-00	99,4			7	17,3
oct-00	192,6	0	0	3,7	11,1
nov-00	219,4	4	67	-1,3	4,7
déc-00	94,4	4	37	-1,2	5
janv-01	193	22	81	-3,9	1,4
févr-01	90,7	20	58	-3,4	3,8
mars-01	465,7	6	46	1,3	7,2
avr-01	255	10	132	0,3	7,4
mai-01	105,1	0	0	7,1	16,2
juin-01	243,9			7,1	18
juil-01	166,6			10,4	20,1
août-01	180			11,3	21,7
sept-01	169			5,8	13,4
oct-01	101,6	0	0	6,4	17,4
nov-01	109,8	2	32	-2,7	3,6
déc-01	159,1	8	81	-7,3	-0,8
janv-02	58,9	38	15	-5,4	4
févr-02	213,7	26	131	-1,5	5
mars-02	148,6	13	6	-0,9	8,8
avr-02	64,4	0	6	0,6	11,6
mai-02	191,6	1	49	4,2	13,5
juin-02	115,4			9,8	21,6
juil-02	163,7			10	20
août-02	163,2			9,7	18,9
sept-02	81,1			6,5	15
oct-02	332,3	0	9	3,4	12,5
nov-02	314,8	2	45	-0,1	6,9
déc-02	199,5	4	26	-1,5	3,9
janv-03	226	40	208	-6,2	0
févr-03	76	77	139	-9,1	1,9
mars-03	39,4	20	8	-1,6	10
avr-03	114,8	3	43	0,5	11,4
mai-03	81,1	0	0	5,8	17,1
juin-03	103,6	0	0	12,4	25,2
juil-03	92,3	0	0	10,8	23,1
août-03	129,7	0	0	12,7	26,1
sept-03	83,8	0	0	6,7	17,3
oct-03	272,7	1	28	0,7	8,9
nov-03	85,7	5	54	0	9,3
déc-03	96,1	8	58	-4	3,7

Dates	Cumul des hauteurs de précipitations en mm	Moyenne mensuelle de l'enneigement en cm	Cumul mensuel de neige fraîche quotidienne en cm	Moyenne des températures minimales en °C	Moyenne des températures maximales en °C
janv-04	358,6	40	187	-5,1	1,3
févr-04	45,5	33	32	-4,5	4,3
mars-04	101,7	14	39	-3,1	5,6
avr-04	80,1	2	41	0,5	10,2
mai-04	108,3	2	32	3,7	13,8
juin-04	100,5	0	0	8,3	18,9
juil-04	89,9	0	0	10	20,9
août-04	231,5	0	0	10,5	21,1
sept-04	76,7	0	0	7,7	17,9
oct-04	169,3	0	9	5,4	13,9
nov-04	37	1	9	-2,2	5,4
déc-04	126,5	17	82	-4	3,7
janv-05	132	41	97	-6,4	2,2
févr-05	128	63	82	-8,7	-0,5
mars-05	81,2	48	40	-3,2	6,7
avr-05	161,2	6	89	0,9	9,8
mai-05	95,5	0	0	5,5	15,9
juin-05	80,1	0	0	9,5	21,4
juil-05	98,5	0	0	10,1	21,1
août-05	119	0	0	8,7	18,5
sept-05	59,5	0	0	7,8	17,4
oct-05	95,8	0	0	4,4	15,6
nov-05	58,5	6	55	-2	6,6
déc-05	203	47	133	-8	-1
janv-06	63	69	77	-6,5	2,5
févr-06	142,1	65	89	-6,3	1,8
mars-06	335,1	97	168	-4,4	4,1
avr-06	145	4	25	0,7	10,4
mai-06	214,2	0	10	5	15,4
juin-06	63,4	0	2	8,2	21,2
juil-06	187	0	0	12,6	25,1
août-06	254,5	0	0	7,6	16,2
sept-06	112	0	0	9,5	19,3
oct-06	124,3	0	0	5,6	15,8
nov-06	102,8	0	9	0,6	9,6
déc-06	141,8	3	23	-2,8	5,1
janv-07	258,5	9	72	-2,1	4,1
févr-07	231,5	15	110	-2,3	5,6
mars-07	227,3	5	55	-2	6,9
avr-07	41,1	0	0	3,7	16,9
mai-07	313,4	0	5	5,5	15,6
juin-07	263	0	0	8,6	18,6
juil-07	310,9	0	0	9,3	19,7
août-07	279	0	0	9,4	19
sept-07	117,3	0	0	5,4	15,4
oct-07	18,7	0	0	2,7	12
nov-07	70,8	8	48	-3	4
déc-07	209,1	35	128	-5	1,8
janv-08	160,3	28	69	-2,9	4,9
févr-08	75,4	16	33	-3,6	5,8
mars-08	225,8	17	149	-3,2	4,3
avr-08	174,4	5	45	-0,1	8,6
mai-08	75,8	0	0	6,2	16,7
juin-08	97,3	0	0	9	18,3
juil-08	213	0	0	9,8	20,8
août-08	138,4	0	0	9,7	20,2
sept-08	169,3	0	0	5,9	14,6

Station des Diablerets (Suisse). De janvier 2000 à Octobre 2010

Date	Moyenne mensuelle des températures en °C	Précipitations mensuelles totales en mm
janv-00		81,6
févr-00	-5,1	182,1
mars-00	-7,8	95,9
avr-00	-4,9	90,6
mai-00		96,2
juin-00		64,4
juil-00		206,2
août-00		127,6
sept-00		84,9
oct-00		161,1
nov-00		110,6
déc-00		75,1
janv-01		149,1
févr-01		71,3
mars-01		283,5
avr-01		222,2
mai-01	0,5	107,4
juin-01		276,8
juil-01		144,9
août-01		136,1
sept-01		172,7
oct-01	2,1	48,6
nov-01	-4,9	109,7
déc-01	-9,3	94,4
janv-02		39,7
févr-02	-6,5	155,4
mars-02	-4,3	129,2
avr-02	-6,1	62,7
mai-02	-1,9	157,9
juin-02	4,7	140,2
juil-02		229,6
août-02		175,3
sept-02		117,8
oct-02	-1,4	179,1
nov-02	-5,2	249,3
déc-02	-6,1	139,7
janv-03	-8,7	156,1
févr-03	11,4	71,4
mars-03	-5,4	51,2
avr-03	-5,5	91,5
mai-03	-0,3	131,9
juin-03		86,4
juil-03	5	134,6
août-03	7,8	149,9
sept-03	2	61,1
oct-03		175,9
nov-03	-3	54,3
déc-03	-7,1	79,6

janv-04	-8,2	279,2
févr-04	-8,7	41,6
mars-04		80,3
avr-04	-6,3	51,7
mai-04	-3,1	104,4
juin-04	1,4	136,1
juil-04	3,2	92,5
août-04	4,2	260,9
sept-04	2,7	67,6
oct-04	-0,6	92,4
nov-04	-6	37,5
déc-04		84,6
janv-05	-8,2	125,7
févr-05	-10	124,2
mars-05	-7,6	43,9
avr-05	-5,4	110,6
mai-05	-0,9	111,3
juin-05		121,4
juil-05		121
août-05		174
sept-05	2,4	84,1
oct-05	1,3	63,9
nov-05	-6,7	35,5
déc-05	10,2	153,6
janv-06	-9,1	43,8
févr-06	10,1	101,8
mars-06		277,8
avr-06		128,6
mai-06	-1,9	182,3
juin-06	4,4	61,4
juil-06		71,1
août-06	-0,2	238,9
sept-06	4,4	118,2
oct-06		95,3
nov-06	-3,3	75
déc-06	-5,1	109,7
janv-07	-5,5	197,7
févr-07	-6,3	140,9
mars-07		137,2
avr-07	-1,1	31,7
mai-07	-0,9	238,1
juin-07	2	191
juil-07	3,2	296,9
août-07	3,6	201,8
sept-07		68,5
oct-07	-0,4	21,6
nov-07	-4,9	88,6
déc-07		204,9
janv-08	-5,9	103,2
févr-08	-5	38,8
mars-08		161,5
avr-08	-7	135,6
mai-08	-0,6	45
juin-08	2,8	123,7
juil-08	4,1	196,1
août-08	4,7	147,2
sept-08	0,6	118,5
oct-08	-1,1	109,7
nov-08	-6,2	101,6
déc-08	-9	96,7
janv-09	-9,6	85,5
févr-09	11,4	77,3
mars-09	-8,6	119,2
avr-09	-4,6	41,4
mai-09	0,9	89,3
juin-09	1,6	190,6
juil-09	4,4	225,7
août-09	6,5	69,8
sept-09	3	80,8
oct-09	-1,3	74
nov-09	-4,6	206,7
déc-09	10,5	172,6
janv-10	11,4	58,2
févr-10	11,3	96,3
mars-10	-9,2	90,3
avr-10	-5,3	33,4
mai-10	-3,3	191,3
juin-10	2,5	147,3
juil-10	6	221,3
août-10	2,9	199
sept-10	0,8	92,9
oct-10	-1,4	

Station d'Aigle (Suisse). De janvier 2000 à Octobre 2010

Dates	Températures moyennes mensuelles en °C	Total mensuel des précipitations en mm	Cumul mensuel de neige fraîche en cm	
janv-00	-0,2	23,4	1	0
févr-00	4,3	85,4		3
mars-00	6,8	57,9		0
avr-00	11	55,5		0
mai-00	16,1	43,5		0
juin-00	18,7	62,4		0
juil-00	16,9	147,2		0
août-00	19,2	67,3		0
sept-00	15,5	78,7		0
oct-00	11	88,7		0
nov-00	7,2	92,1		0
déc-00	4,9	39,5		0
janv-01	4	114,2		0
févr-01	4,8	46,3		2
mars-01	9	218,7		1
avr-01	8,5	146,8		0
mai-01	16,1	66,3		0
juin-01	16,7	184,9		0
juil-01	19,2	114,9		0
août-01	19,4	75,6		0
sept-01	12,8	113,5		0
oct-01	13,2	49,4		0
nov-01	4,2	51,5		0
déc-01	0	51,2	2	2
janv-02	0,6	21,8		0
févr-02	6	94,5		0
mars-02	8	55,5		0
avr-02	10,7	27,1		0
mai-02	13,7	108,3		0
juin-02	19,5	110		0
juil-02	18,9	131,9		0
août-02	17,8	106,8		0
sept-02	14,1	89,9		0
oct-02	10,6	109,4		0
nov-02	7,5	149,9		0
déc-02	5,2	77,1		0
janv-03	1,6	64,8		5
févr-03	0,3	21,7	2	7
mars-03	8	25,4		0
avr-03	11,1	65,9		0
mai-03	15,7	59,3		0
juin-03	22,2	83,5		0
juil-03	20,2	86,6		0
août-03	21,7	94,3		0
sept-03	14,6	53,1		0
oct-03	8,1	129,6		0
nov-03	5,3	41,4		3
déc-03	2,2	30,4		2

janv-04	1,9	162,5 1	7
févr-04	2,7	19,9	1
mars-04	5	45,4	1
avr-04	9,8	24,8	0
mai-04	12,8	59,2	0
juin-04	17,5	82,5	0
juil-04	18,5	179,9	0
août-04	18,8	173	0
sept-04	15,5	35	0
oct-04	12,2	103,5	0
nov-04	4,6	15,5	0
déc-04	1,4	55,9	4
janv-05	-0,7	58,1 2	1
févr-05	-1,8	54,9 4	8
mars-05	5,6	38,6 1	1
avr-05	9,5	102,7	0
mai-05	14,5	45,4	0
juin-05	19,1	64,1	0
juil-05	19,1	83,7	0
août-05	17,1	145,1	0
sept-05	15,9	95,7	0
oct-05	10,9	69,3	0
nov-05	4,3	24,1	5
déc-05	-0,3	84,3 2	0
janv-06	-0,9	19	5
févr-06	1,9	50,1	1
mars-06	4,3	139	2
avr-06	10,1	95,7	0
mai-06	14,2	150,7	0
juin-06	18,5	89,2	0
juil-06	21,8	115,3	0
août-06	15,7	216,2	0
sept-06	16,9	103,3	0
oct-06	.13	63	0
nov-06	7,5	44,4	0
déc-06	2,7	69,4	0
janv-07	3,7	67,2	0
févr-07	4,9	86	0
mars-07	6,2	79,8	0
avr-07	13,6	9,5	0
mai-07	14,5	167,1	0
juin-07	17,6	161,3	0
juil-07	18,1	216,5	0
août-07	17,9	197,1	0
sept-07	13,9	56,3	0
oct-07	9,9	12,5	0
nov-07	4	40,9	1
déc-07	1,5	94	0
janv-08	3,8	56,9	0
févr-08	3,8	25,8	0
mars-08	5,9	69,1	2
avr-08	8,9	99,8	0
mai-08	16	21,2	0
juin-08	18	59	0
juil-08	19	133,1	0
août-08	18,4	98	0
sept-08	13,8	118,1	0
oct-08	10,8	66,8	0
nov-08	5,1	49,3 1	8
déc-08	1,1	83,6 1	5
janv-09	-0,1	47,7	1
févr-09	1,3	63,3 2	7
mars-09	5,6	70,7	0
avr-09	12,2	21,9	0
mai-09	16,2	76,2	0
juin-09	17,5	91,8	0
juil-09	19,8	122,7	0
août-09	20,7	51,8	0
sept-09	16,1	33,2	0
oct-09	10,4	55,5	0
nov-09	8,3	119,9	0
déc-09	3,1	89,3	4
janv-10	-0,7	30,8 3	0
févr-10	2,1	48,4	2
mars-10	5,6	58,9	0
avr-10	10,8	11,3	0
mai-10	13,3	109,8	0
juin-10	-17,9	71,3	0
juil-10	21	87,8	0
août-10	18,2	122,4	0
sept-10	14,1	46	0
oct-10	10,1	28,3	0

Annexe 3. Les prélèvements dans le lac 1730. (D'après les documents écrits de la Lyonnaise des eaux sur les prélèvements mensuels)

2010-2011	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DÉCEMBRE	JANVIER	FÉVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT
Eau potable en m ³	395	0	40	291	1119	21974	21771	84	14	0	0	1
Neige artificielle en m ³	0	146	37610	60425	16719	37	0	278	8	0	0	1
2011-2012	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DÉCEMBRE	JANVIER	FÉVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT
Eau potable en m ³	0	97	443	10855	17622	33060	9006	9	2	0	0	3319
Neige artificielle en m ³	442	1427	3903	16277	10404	2871	2	0	99	0	0	0

Annexe 5. Les débits mensuels moyens de la Dranse de Sous-Saix calculés à partir des relevés de la sonde ; et les débits de la Dranse de Seytroux (Hydrofrance.fr). De septembre 2010 à juin 2012.

	Débit Dranse Prodains	Débit Dranse Seytroux
sept-10	148,43	2084,7
oct-10	72,93	1799,967742
nov-10	183,9	5475,2
déc-10	211	8871,870968
janv-11	115,9	5394,290323
févr-11	7,22	2046,821429
mars-11	40,39	2809,096774
avr-11	396,85	6000,366667
mai-11	403,71	3388,387097
juin-11	380,78	6651,733333
juil-11	332,12	5934,806452
août-11	244,02	2798,16129
sept-11	233,37	2996,8
oct-11	186,83	3330,322581
nov-11	24,42	1426,933333
déc-11	87,39	7552,451613
janv-12	66,9	7422,032258
févr-12	332,44	2895,62069
mars-12	223,81	9091,322581
avr-12	333,5	13948,43333
mai-12	642,45	16235,12903
juin-12	570,86	10040

Annexe 6. Les recommandations de la mairie des Gets pour économiser l'eau suite aux pénuries de 2007. Brochure « l'eau aux Gets faire face à une situation de crise » distribuée par la mairie en 2007. (Mairie des Gets, 2007).

RAPPEL SUR QUELQUES GESTES SIMPLES A FAIRE POUR UNE MEILLEURE ÉCONOMIE D'EAU :
A FEW SIMPLE TIPS TO BETTER SAVE WATER

- >Je prends une douche rapide plutôt qu'un bain car je consomme ainsi entre 25 et 100 litres d'eau au lieu de 250 litres environ, et je participe à la préservation de cette ressource naturelle limitée.
 >I take a quick shower rather than a bath
 This way I use between 25 and 100 litres of water instead of 250 litres.
- >Je coupe l'eau quand je me brosse les dents, me lave les mains ou me rase. Je réduis ainsi ma consommation d'eau de moitié.
 >I turn off the water when cleaning my teeth, washing my hands or shaving.
 This way I reduce my consumption by half
- >J'installe une chasse d'eau à double commande dans mes toilettes ou je place une bouteille pleine de sable ou une brique dans le réservoir, car je réduis ainsi ma consommation d'eau de 1 à 2 litres à chaque remplissage de la cuvette.
 >I install a flush with double command on the toilet or I place a sand filled bottle or brick in the water tank.
 It reduces the water consumption by 1 to 2 litres at each refill.
- >J'équipe ma robinetterie de systèmes permettant de limiter ma consommation d'eau, comme par exemple des réducteurs de débit, des aérateurs, des mitigeurs ou des douchettes à faible débit.
 >I put water saving devices on the taps to limit my water consumption (i.e.: mixer taps or shower heads with low pressure flow)
- >Je répare au plus vite les éventuelles fuites d'eau, car une fuite goutte à goutte peut représenter 35 000 litres d'eau par an. Une lecture attentive de sa facture d'eau permet souvent de les détecter.
 >I quickly repair any leaks because a drip can represent 35,000 litres of wasted water a year.
 A close inspection of one's bill helps to detect them.
- >Je ne fais fonctionner mon lave-linge ou mon lave-vaisselle que lorsque la machine est remplie ou j'utilise la touche demi-charge qui permet d'économiser environ 30 % du volume d'eau.
 >I only put my washing machine or dishwasher on when they are full or I use the half load button which can save around 30% of water.
- >J'arrose mon jardin le soir quand l'évaporation est moins forte, ce qui me permet de faire une économie d'eau de 50 % en moyenne pour la même efficacité.
 >I water the garden in the evening when the evaporation is less which enable me to save roughly 50% of water with the same efficiency.
- >Je n'arrose pas ma pelouse qui reverdira toute seule au retour des pluies.
 >I do not hose down the lawn which will green up again with the next rainfall.
- >J'utilise des techniques économes en eau : goutte-à-goutte, tuyaux suintants, paillage lors de fortes chaleurs pour conserver l'humidité du sol... et je récupère l'eau de pluie au bas des gouttières.
 >I use water saving devices in the garden and recuperate rain water from the bottom of the gutters.
- >Je recouvre le sol au pied des plantes, des arbres et des arbustes d'une couche d'herbe coupée ou de copeaux de bois pour absorber l'eau et conserver l'humidité.
 >I line the ground at the foot of plants, trees and shrub with a layer of cut grass or wood shavings to absorb water and keep humidity

Informations - Contact :
Stéphanie FRANCHETEAU
 Mairie des Gets
 Service de l'eau
 Tél. +33(0)4 50 74 74 65
 Fax :+33(0)4 50 74 74 57
 E-mail : sfrancheteau@mairie-les-gets.fr

communication officielle de la mairie des Gets - validation générale - RCS : 589304815 - 04 50 74 74 65

Depuis quelques années le recours à l'enneigement artificiel est de plus en plus courant dans les stations de ski des Alpes mais également dans les autres massifs français et étrangers. Cependant la production de neige nécessite l'utilisation d'un volume d'eau important, souvent pompé dans les réserves d'eau potable, les rivières, les nappes phréatiques ou encore dans les réserves collinaires. Or l'enneigement n'est pas le seul usage de l'eau dans les stations de sports d'hiver, et ce nouveau besoin concerne la saison hivernale lors des étiages des cours d'eau et des besoins pour les diverses activités. Depuis quelques années, cette technique fait l'objet de nombreuses controverses au sein de la communauté scientifique, politique et des populations locales, car les volumes d'eau pompés sont particulièrement importants.

Notre recherche s'appuie sur des enquêtes auprès des acteurs impliqués, des observations de terrain et des mesures, à différentes échelles de travail. Deux modèles de production de neige sont confrontés : Avoriaz (France) et Champéry (Suisse). Les impacts des usages sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Dranse de Sous-Saix, sur le domaine d'Avoriaz, sont aujourd'hui limités et dans les deux stations la ressource est actuellement suffisante pour satisfaire tous les besoins. A ce jour les situations de pénuries d'eau et de conflits autour de la ressource sont rares, et sont dues à des problèmes de gestion. Un ensemble de propositions inspirées d'initiatives locales pour une meilleure gestion de la production de neige et des usages de l'eau a été proposé.

Mots clés : neige artificielle, ressource en eau, hydrosystème, station de montagne, conciliation des usages

[Artificial snow and water resources in mountains: impacts on hydrosystem.
The example of the Northern Alps (France, Switzerland)]

For some years now the use of artificial snow has become increasingly frequent in Alpine skiing resorts as well as in the other French and foreign massifs. Nevertheless, snowmaking calls for a large amount of water, which is often pumped from drinking water reserves, rivers, groundwater tables or else from hill water reserves. This relatively recent practice, added to the different activities already present, is of concern for the local populations and environmental associations. For several years now, this technique has been the subject of numerous controversies within the scientific and political community and local populations. As things stand, the work performed by researchers and, more particularly, geographers is thin on the ground, because the volumes of water pumped are particularly important.

Our research is based on interviews with those involved in snow production, field observation and measures. Two models of artificial snow are confronted : Avoriaz (France) and Champéry (Switzerland). The impacts of the uses on the hydrological functioning of the Dranse de Sous Saix catchment area, in Avoriaz's area are now limited and in both resorts, the resource is currently sufficient to satisfy all the needs. At the present time water shortages or conflicts involving the resource are unusual, and are thus due to management problems.

A set of proposals inspired local initiatives for a better artificial snow management and water uses management have been proposed.

Keywords : Artificial snow, water resource, hydrosystème, ski resorts, conciliation of water uses

Géographie

Ecole doctorale de géographie de Paris. 191 rue Saint-Jacques. 75005. Paris

