

**Université Libre de Bruxelles**  
**Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire**  
**Faculté des Sciences**  
**Master en Sciences et Gestion de l'Environnement**

**Impacts de la fonte des glaciers alpins sur les services écosystémiques  
liés à l'eau. Etude de cas dans le Val d'Hérens (Suisse)**

Mémoire de Fin d'Etudes présenté par  
LAIGNEAUX, Pierre  
en vue de l'obtention du grade académique de  
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement  
Finalité Gestion de l'Environnement Ma120ECTS ENVI5G-T  
Année Académique 2011-2012

**Promoteurs : Prof. Pierre Cornut et Frank Pattyn**



**« Le monde est petit, mais il n'y a que les montagnes qui se rencontrent »**

**Stanilaw Jerzy Lec**

**Imprimé en recto-verso et sur papier recyclé**



## Résumé

Le présent mémoire traite des impacts de la fonte des glaciers alpins sur les services écosystémiques liés à l'eau. Il est question ici de comprendre les étroites interactions qui règnent entre les glaciers, les services qui en découlent et les populations alpines. L'évolution du climat ces trente dernières années est sans appel : les glaciers des Alpes fondent et cela, à une vitesse vertigineuse. Ces modifications brutales vont conduire à une transformation importante des bénéfices que nous tirons des écosystèmes. Que ce soit l'Évaluation des Écosystèmes pour le Millénaire ou la Classification Internationale Commune des Services Ecosystémiques, ces approches nous permettent de montrer les dynamiques et l'interdépendance entre les glaciers et les hommes. Les tendances futures laissent entrevoir des effets particulièrement inquiétants au niveau de la surface et de la masse des glaciers, puisque selon ces études, la quasi-totalité des glaciers alpins devrait avoir disparue à la fin du siècle. La disponibilité accrue des volumes d'eau à moyen terme n'est pas sans conséquences sur les équilibres qui règnent en montagne. Dominé par d'importants glaciers, Le Val d'Hérens en Valais Suisse, en est un bon exemple. La production hydroélectrique, centrée sur un important complexe hydraulique est étroitement dépendante des apports en eau de fonte. La distribution saisonnière des écoulements annuels sera modifiée. Le maximum saisonnier se déplacera de l'été au printemps. Ces apports en eau seront, à court terme, bénéfiques pour certaines centrales à accumulation comme la Grande Dixence, leurs donnant de nouvelles capacités de production. A long terme les tendances sont négatives, la disparition annoncée d'une grande partie des glaciers alpins et des apports d'eau en découlant provoquera une baisse de production. Viendra s'ajouter à cela une grande plus variations dans l'intensité et dans la quantité des précipitations, revues à la baisse généralement pour la fin du siècle. On notera des conséquences à court terme sur les apports en sédiments, apports plus importants pouvant provoquer des dommages aux infrastructures. A long terme le charriage tendra à diminuer avec la baisse des débits. Les incertitudes étant importante au niveau climatologique, les résultats ne peuvent toutefois être généralisés à l'ensemble des centrales hydroélectriques suisses et des Alpes en général.

**Mots clés : Changements climatiques, glaciers, services écosystémiques, hydroélectricité, Val d'Hérens.**



## Remerciements

Ce mémoire représente l'aboutissement de deux années ponctuées de périodes douces mais parfois difficiles et remplies d'embûches. Durant cette dernière année, j'ai eu l'opportunité d'effectuer mon Erasmus à Lausanne, séjour qui a confirmé un intérêt et une passion grandissante pour la montagne. Au pied des Alpes, bercé par les eaux du Lac Léman, on ne peut que contempler ce paysage magique. Je tiens donc à remercier M. Bauler de m'avoir offert la chance de vivre cette riche expérience à l'Université de Lausanne.

Un merci particulier à Florent Widmer de la société Alpiq SA, pour ses précieuses informations et documents, à Marc Bernard du Canton du Valais ainsi qu'à l'ensemble des interlocuteurs suisses que j'ai pu rencontrer ou écouter. Merci aux Professeurs Frank Pattyn et Pierre Cornut pour leur patience et leur disponibilité pendant la réalisation de ce travail.

Merci à Martin, Pauline, Hélène d'avoir su trouver les mots pour me soutenir durant les jours plus difficiles. Que mes amis ne soient pas oubliés pour leur coaching ! Enfin, un merci et une reconnaissance toute particulière à mes parents, pour leur indéfectible présence et leurs encouragements sans failles, contre vents et marées.



# Table des Matières

<b>Résumé</b>	<b>5</b>
<b>Remerciements</b>	<b>7</b>
<b>Table des Matières</b>	<b>9</b>
<b>Table des figures</b>	<b>11</b>
<b>Table des graphiques</b>	<b>12</b>
<b>Table des tableaux</b>	<b>14</b>
<b>Liste des acronymes</b>	<b>15</b>
<b>Introduction</b>	<b>16</b>
<b>Chapitre 1 Notion de glaciologie et historique du climat</b>	<b>19</b>
<b>1.1 Notions de glaciologie</b>	<b>19</b>
1.1.1 Le bilan de masse	20
1.1.2 Méthode de mesure du bilan de masse	20
1.1.3 Zone d'accumulation	22
1.1.4 La ligne d'équilibre	22
1.1.5 Zone d'ablation	24
<b>1.2 Historique du climat : des glaciers, une Terre</b>	<b>25</b>
1.2.1 De la naissance de la Terre au Quaternaire	25
1.2.2 Du quaternaire au Petit Age Glaciaire (PAG)	26
1.2.3 Du Petit Age Glaciaire à aujourd'hui	28
<b>Chapitre 2 Les changements climatiques dans les Alpes : état des lieux et évolution</b>	<b>31</b>
<b>2.1 Evolution des températures dans les Alpes</b>	<b>32</b>
<b>2.2 Evolution des précipitations</b>	<b>38</b>
<b>2.3 Evolution du couvert neigeux</b>	<b>41</b>
<b>2.4 Evolution des bilans de masse au XXème siècle</b>	<b>44</b>
<b>Chapitre 3 Des glaciers et des Hommes : portait du Val d'Hérens</b>	<b>47</b>
<b>3.1 Cadre Physique</b>	<b>47</b>
3.1.1 La présence des glaciers	49
3.1.2 Hydrologie	52
3.1.3 Hydrologie et gestion de l'eau potable	54
<b>3.2 Cadre humain</b>	<b>57</b>
3.2.1 Agriculture	57
3.2.2 Industrie	58
3.2.3 Tourisme et sports d'hiver	58
3.2.4 Gestion de l'enneigement artificiel	60
<b>Chapitre 4 Notion de services écosystémiques</b>	<b>63</b>
<b>4.1 Naissance et évolution d'un concept</b>	<b>63</b>
<b>4.2 Enjeux environnementaux des services écosystémiques</b>	<b>65</b>
<b>4.3 Services écosystémiques : glaciers et eau</b>	<b>68</b>
<b>4.4 La notion de « point de basculement »</b>	<b>71</b>
<b>4.5 La Classification Internationale Commune des Services Ecosystémiques (CICES)</b>	<b>72</b>
<b>4.6 Services Ecosystémiques selon OFEV (FECS)</b>	<b>73</b>

<b>4.7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>75</b>
<b>Chapitre 5</b>	<b>Services écosystémiques : l'hydro-électricité dans le Val d'Hérens</b>	<b>77</b>
<b>5.1</b>	<b>Régime hydrologique</b>	<b>77</b>
5.1.1	Le régime hydrologique simple	78
5.1.2	Le régime hydrologique mixte	78
5.1.3	Le régime hydrologique complexe	79
5.1.4	Typologie dans le Val d'Hérens	81
<b>5.2</b>	<b>Etats des lieux</b>	<b>82</b>
5.2.1	Acteurs en présence et données	82
5.2.2	Gestion du Réseau électrique	83
5.2.3	Cadre législatif et administratif	83
5.2.3.1	Redevance	84
5.2.3.2	Droit de concession et retour de concession	84
5.2.3.3	Débit résiduel et assainissement	86
<b>5.3</b>	<b>Typologie des centrales en présence</b>	<b>88</b>
5.3.1	Les stations au fil de l'eau	88
5.3.2	La station à accumulation	89
<b>Chapitre 6</b>	<b>Hydroélectricité dans le Val d'Hérens : perspectives</b>	<b>93</b>
<b>6.1</b>	<b>Influence sur les complexes hydroélectriques du Val d'Hérens</b>	<b>93</b>
<b>6.2</b>	<b>Influence de différents facteurs climatiques</b>	<b>98</b>
6.2.1	Température	98
6.2.2	Précipitations	99
6.2.3	Des glaciers	99
6.2.4	Conclusion provisoire	102
<b>6.3</b>	<b>Influence sur la production</b>	<b>102</b>
<b>6.4</b>	<b>Influence sur les débits résiduels et les centrales au fil de l'eau du Val d'Hérens</b>	<b>105</b>
<b>6.5</b>	<b>Influence sur les installation et les apports en sédiments</b>	<b>106</b>
<b>6.6</b>	<b>Possibilités d'adaptation</b>	<b>108</b>
<b>Conclusion</b>		<b>110</b>
<b>Bibliographie</b>		<b>113</b>
<b>Annexes</b>		<b>125</b>
<b>Annexe 1.</b>	<b>Photographie d'un bisse en Valais (photographie personnelle)</b>	<b>126</b>
<b>Annexe 2.</b>	<b>Photographie d'une retenue alluvionnée</b>	<b>126</b>
<b>Annexe 3.</b>	<b>Photographie d'une structure métallique permettant de retenir les apports solides de granulométrie variables en amont d'une prise d'eau de la Grande Dixence</b>	<b>127</b>

## Table des figures

Figure 1 : Schéma illustrant les interactions au sein d'un système glaciaire .....	20
Figure 2 : système « glacier » avec les input et les output .....	22
Figure 3 : Schéma représentant la zone d'accumulation, la zone d'ablation ainsi que la zone d'équilibre. ....	23
Figure 4 : Schéma représentant la ligne d'équilibre du glacier en fonction de la pente et d'une augmentation des températures .....	24
Figure 5 : Chronologie des grandes glaciations quaternaires sur le versant nord des Alpes Suisses. ....	26
Figure 6 : Carte schématique du dernier maximum glaciaire (LGM) et des principaux flux glaciaires dans les Alpes du Nord .....	27
Figure 7 : Carte de localisation des postes de mesures utilisées dans le projet Histalp. ....	35
Figure 8 : Changements simulés (en %) des précipitations moyennes hivernales.....	39
Figure 9: carte de la Suisse avec les possibles réductions de neige en partant d'une augmentation des températures de 4°C (par rapport à la période 1990-1999) .....	43
Figure 10 : Evolution des surfaces englacées entre 1973 et 2105 pour le Sud du Valais. ....	46
Figure 11 : Carte du Val d'Hérens et du Val d'Héremence .....	48
Figure 12 : Carte du District d'Hérens .....	49
Figure 13: Carte des deux grands ensemble glaciaire (Glacier du Mont-Collon, Haut glacier d'Arolla, Bas glacier d'Arolla. ....	50
Figure 14 : Carte du bassin versant de la Dixence et de la Borgne .....	53
Figure 15: Illustration reprenant les différentes zones et secteurs de protection autour des captages d'eau potable souterraine.....	55
Figure 17 : Carte reprenant les différentes zone et secteur de captage d'eau pour la région d'Arolla .....	56
Figure 18 : Cadre conceptuel des interactions entre Biodiversité, services écosystémiques, bien-être humain, et forces ou causes à l'origine du changement.....	67
Figure 19 : Illustration montrant les liens de causes à effets entre les composantes du système Terre .....	68
Figure 20 : Ensemble des quatre catégories de SE et leurs interactions avec les éléments nécessaires au bien-être humain .....	70
Figure 21 : Répartition des FEGS en quatre types de prestations.....	73
Figure 22 : représentation graphique des 16 régimes d'écoulement en Suisse .....	80
Figure 23 : Carte de le situation géographique des trois régimes hydrologiques régionaux ...	80
Figure 24 : Schéma des principaux cours d'eau des bassins versants de la Dixence et de la Borgne en Val d'Hérens.....	81
Figure 25 : Aperçu des infrastructures de la Grandes Dixence.....	90
Figure 26 : Evolution de la surface, des volumes et de l'épaisseur de glace pour les bassins versants du Haut Glacier d'Arolla (à gauche) et du glacier de Findel .....	100

## Table des graphiques

Graphique 1: Evolution des températures terrestres au cours des différentes époques géologiques .....	26
Graphique 2 : Fluctuation glaciaire dans les Alpes suisses au Petit Age Glaciaire .....	29
Graphique 3: Evolution du glacier de Ferpècle et du Mont Miné de 1890 à 2005 .....	29
Graphique 4: Évolution des températures en fonction des SRES .....	33
Graphique 5 : Ecart moyen de la température moyenne annuelle de la montagne savoyarde de 1950 à 2010 par rapport à la normale 1971/2000.....	35
Graphique 6: NW- Evolution des écarts annuels moyens des températures de la partie nord-ouest des Alpes de 1850 à 2007 (par rapport à la période 1961/1990). .....	36
Graphique 7: SW- Evolution des écarts annuels moyens des températures de la partie sud-ouest des Alpes de 1850 à 2007 (par rapport à la période 1961/1990). .....	36
Graphique 8 : NE- Evolution des écarts annuels moyens des températures de la partie nord-est des Alpes de 1850 à 2007 (par rapport à la période 1961/1990).....	36
Graphique 9: SE- Evolution des écarts annuels moyens des températures de la partie sud-est des Alpes de 1850 à 2007 (par rapport à la période 1961/1990).....	37
Graphique 10 : Evolution de l’anomalie de températures moyennes globales et comparaisons avec l’évolution en Suisse entre 1901 et 2000 .....	37
Graphique 11 : Evolution des précipitations saisonnière à l’horizon 2100 dans les Alpes Suisses .....	40
Graphique 12 : Débits saisonniers dans le Rhône proche de sa source pour la période de référence 1961-1990 et pour un climat futur se basant sur une augmentation des températures de 4° (2071-2100).....	41
Graphique 13: bilan de masse moyen annuel et cumulé de neuf glacier alpins sur la periode 1967 et 2005 .....	44
Graphique 14 : Evolution de 6 glaciers sur l’ensemble des Alpes, a) bilans de masse cumulés des glaciers, b) bilans de masse cumulés centrés et ajustés sur la tendance de St Sorlin .....	45
Graphique 15: Variation de longueur du glacier du Mont Miné (à gauche) et du glacier de Ferpècle (à droite) .....	51
Graphique 16 : Variation de longueur du glacier du Mont Collon entre 1890 et 2010 .....	52
Graphique 17: Retour de concession dans les 60 années à venir. ....	85
Graphique 18 : Hydrogramme moyen annuel de la Borgne à la station de mesure de la Luette entre 1925 et 1979. ....	86
Graphique 19 : graphe reprenant les informations nécessaires pour déterminer le débit résiduel après le turbinage dans la Centrale de Bramois-Seuterot.....	87
Graphique 20 ( de droite) : Volume des apports journaliers en eau dans le lac des Dix.....	91
Graphique 21 (de gauche) : Energie livrée par les Grande Dixence, production mensuelle .	91
Graphique 22 (gauche) : Evolution du débit et du régime d’écoulement pour le bassin versant de la Gornera (Glacier du Gorner) .....	94
Graphique 23 (droite): Evolution du régime d’écoulement dans le bassin versant de la Gornera (glacier du Gorner) sur des périodes de 30 ans entre 1940 et 2099 .....	94
Graphique 24 ( gauche): Evolution de l’écoulement et des précipitations pour le bassin versant du Haut Glacier d’ Arolla entre 1900 et 2100. ....	95
Graphique 25 (droite): Evolution du Régime d’écoulement dans le bassin versant du Haut Glacier d’Arolla sur des périodes de 30 ans entre 1940 et 2099 .....	95
Graphique 26 (gauche): Evolution du débit et du régime d’écoulement pour le bassin versant de du glacier de Findel. ....	96
Graphique 27 (droite): Evolution du Régime d’écoulement dans le bassin versant du glacier de Findel sur des périodes de 30 ans entre 1940 et 2099 .....	96

Graphique 28: Graphe représentant en haut, l'évolution moyenne des températures par rapport à la période de référence et en bas, la somme des précipitations annuelles. ....	99
Graphique 29 : Distribution des arrivées d'eau (en noir) par rapport à la production hydroélectrique.....	103
Graphique 30: Niveau moyen mensuel du lac des Dix pour la période 1982-1996 .....	104
Graphique 31: Prédications des entrées et sorties dans le lac des Dix .....	104
Graphique 32 (gauche): Changements du transport solide par charriage dans les soixante quatre torrents étudiés pendant la période 2021 – 2050 par rapport à la période de référence 1980 – 2009.....	107
Graphique 33 (droite): Changements du transport solide par charriage dans 64 torrents étudiés pendant la période 2070 – 2099 par rapport à la période de référence 1980 – 2009 .....	107

## Table des tableaux

Tableau 1 : Projections des valeurs moyennes du réchauffement pour la période 2090-2099 par rapport à la période 1980-1999 .....	34
Tableau 2 : Répartition des quatre types de prestations. Entourés en rouge, les services écosystémiques liés à l'eau.....	74
Tableau 3: Vue d'ensemble des changements temporels de régime d'écoulement des bassins versants considérés pour l'ensemble des rapports techniques du projet « Les effets du changement climatique sur l'utilisation de la force hydraulique » .....	101

## Liste des acronymes

AEE : Agence Européenne de l'Environnement

CHy : Commission d'Hydrologie

CICES : Common International Classification of Ecosystem Services

EAE : Entreprise d'approvisionnement en électricité

GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

MEA : Millenium Ecosystems Assessment

MCG : Modèle Climatique Global

MCR : Modèle Climatique Régional

OFEN : Office Fédéral de l'Energie

OFEP : Office Fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage

OFEV : Office Fédérale de l'Environnement

OFSP : Office Fédérale Suisse de la Santé Publique

OSCC : Observatoire Savoyard du Changement Climatique

PNUE : Programme des Nations-Unis pour l'Environnement

PSE : Paiement pour Services Ecosystémiques

SCEE : Système de Comptabilité Economique et Environnementale

SE : Service Ecosystémiques

SRES : Special Report on Emissions Scenarios

SSHL : Société Suisse d'Hydrologie et de Limnologie

TEEB : The Economics of Ecosystems and Biodiversity

VWHG : Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie.

# Introduction

## Problématique générale

Dans un contexte de réchauffement climatique global, se pose différents enjeux planétaires et notamment ceux touchant aux milieux alpins et aux populations qui y vivent. Image caractéristique et témoin privilégié de la modification des conditions atmosphériques, les glaciers des Alpes présentent de nombreux avantages en tant que sujet de recherche. La région des Alpes, et ses glaciers en particulier, est l'une des plus étudiée au monde, avec une multiplicité de données et d'informations disponibles (climatiques, hydrologiques ou glaciologiques). Plusieurs études européennes ou nationales sont aussi actuellement en cours. Par ailleurs l'influence de nombreux facteurs (latitude, altitude, topographie etc...), ajoutent encore à l'intérêt évoqué. Enfin, la présence de l'eau, et plus généralement de l'eau en aval des glaciers (eau de fonte) et jusque dans les grandes vallées alpines, a façonné la structuration et l'aménagement du territoire (grands barrages par exemple) ainsi que l'utilisation de ces ressources hydrologiques et les dynamiques de peuplement. Les hommes vivant dans ces régions, sont donc intimement liés à la présence des glaciers dont ils dépendent à plus d'un titre pour leurs différents apports (hydroélectricité, agriculture, eau potable ou encore sports d'hiver). C'est ici qu'intervient donc, la notion de services écosystémiques.

L'évolution globale du climat aura des conséquences sur l'ensemble des écosystèmes de la terre ainsi que sur les populations qui y vivent. Les territoires de montagnes, dont les Alpes font intimement parties, sont directement concernés par ces évolutions et les glaciers ainsi que les processus hydrologiques en cours, y occupent un position centrale. Le recul glaciaire, une diminution du manteau neigeux ou encore l'augmentation des risques naturels (écroulement rocheux, éboulement, etc.) n'en sont que les témoins les plus visibles. Qui plus est leur occurrence ne cessera d'augmenter au cours des prochaines décennies. Bon nombre de voyants sont au rouge ! C'est dans ce cadre que nous émettons l'hypothèse que la fonte des glaciers alpins aura des impacts sur les services écosystémiques liés à l'eau, au départ de l'analyse de la situation dans le Val d'Hérens.

## Méthodologie

Pour répondre à cette hypothèse et apporter des éléments aux interrogations posées, un nombre important de publications scientifiques, de rapports officiels et de témoignages, ont été utilisés. Cette approche interdisciplinaire, appelle à associer de multiples connaissances abordées parfois sous des angles très différents. Que ce soit la climatologie, la glaciologie, l'économie ou le droit, chacune permet de fournir des éléments de réponse face aux nouveaux défis que nous impose la nouvelle « donne climatique ».

La palette des services écosystémiques, au regard du contexte local, est vaste et il nous a semblé pertinent dès lors, de se concentrer sur une thématique bien précise : celle de l'hydroélectricité. La gestion de l'eau potable considérée, dans un premier temps comme importante, a été mise de côté par la suite. Peu de données existent à ce sujet, ou alors elles sont très parcellaires notamment en ce qui concerne les quantités d'eau potable utilisées dans le Val d'Hérens. Par ailleurs, les dynamiques géomorphologiques qui interviennent dans la constitution des ressources en eau potable, revêtent de nombreuses difficultés quantitatives et qualitatives. A l'opposé, l'hydroélectricité et son évolution sont plus aisément mesurables avec des paramètres tels que le débit et les régimes d'écoulement. Ceci n'enlève rien aux incertitudes qui règnent quant aux paramètres climatiques, étroitement corrélés avec nos futurs développements sociétaux. En outre, le paysage institutionnel suisse, en raison de ces différents échelons de pouvoir, peut parfois être perçu comme un labyrinthe, ce qui peut poser problèmes dans la quête de références. Néanmoins, une fois le système appréhendé, la richesse et la qualité des publications helvétiques offrent de belles surprises. Ceci explique l'importance des sources gouvernementales dans ce travail, sources généralement à la pointe dans les domaines qui les concernent.

## **Structure**

Porté par notre question de recherche, ce travail sera constitué de six chapitres. Dans **le premier chapitre**, nous aborderons des notions de glaciologie ainsi que des éléments factuels sur l'histoire du climat. L'objectif ici est de mettre en lumière les relations complexes, souvent non linéaires, entre les modifications climatiques et la dynamique glaciaire dans le Alpes.

Dans **un second chapitre**, il sera question de dresser un état des lieux et des perspectives d'évolution concernant les changements climatiques dans les Alpes. La sensibilité des glaciers aux changements climatiques sera mise en avant. On tentera de montrer l'ampleur de ces changements sur les températures, les précipitations, le couvert neigeux et enfin les bilans de masses glaciaires pour les régions de montagne. **Au chapitre trois**, nous développerons le cadre physique et le cadre humain du Val d'Hérens, dans le Canton du Valais suisse, en raison des caractéristiques intéressantes qu'il présente pour traiter de la question de l'eau et des services écosystémiques.

Les services écosystémiques seront discutés dans **un quatrième chapitre**. Le cadre conceptuel, les enjeux qu'ils représentent au sein des problématiques environnementales ou encore les différentes typologies de services, seront mises en avant. Nous montrerons l'étroite interdépendance des habitants du Val d'Hérens avec leur milieu. **Les chapitres cinq et six** seront le « cœur » de ce mémoire. Nous y mettrons en évidence l'importance de l'hydroélectricité dans le Val d'Hérens et le rôle prépondérant qu'elle joue au niveau de la ressource en eau. Le choix de ce service écosystémique pour la société suisse, sera mis en évidence dans le cadre des changements climatiques. Nous analyserons

succinctement les différents facteurs, tel que le débit influençant la production hydroélectrique et montrerons que les changements climatiques pourront être, dans un premier temps et dans certaines situations, une opportunité même si, à long terme, ils se convertissent en une réelle menace.

### **Portée et limites**

Lors de la réalisation de ce mémoire, nous avons été confrontés à plusieurs difficultés et limites, parfois inhérentes à la démarche scientifique. La notion de services écosystémiques englobe un grand nombre d'approches que ce soit au niveau de l'économie de l'environnement ou de l'écologie. En raison des limites de ce travail, nous avons choisi de traiter de cette approche uniquement sous l'angle environnemental, tout comme la diversité des contextes régionaux nous a poussé à nous concentrer sur une vallée alpine bien délimitée et présentant des caractéristiques propres.

# Chapitre 1 Notion de glaciologie et historique du climat

Les glaciers sont les témoins du climat et de l'évolution de celui-ci. Pour mieux saisir les interactions entre les glaciers et les aspects hydriques, il est important de bien comprendre les mécanismes propres influençant la longueur, la surface, l'épaisseur ou encore le volume et les vitesses d'écoulement des glaciers. Les glaciers des Alpes sont relativement petits (à l'exception notamment des glaciers d'Aletsch ou du Gorner) et leurs réactions répondent à des variations climatiques sur des durées courtes de quelques décennies. Les mécanismes qui conditionnent le glissement et la vitesse d'écoulement des glaciers sont relativement complexes et souvent difficile à modéliser. Ce chapitre se veut une introduction aux notions élémentaires de dynamiques et d'évolution glaciaires à travers les âges.

## 1.1 Notions de glaciologie

L'écoulement d'un glacier provient des déformations de la glace et du lit rocheux sur lequel il repose. La réponse, sous l'effet du poids du glacier, se réalise sous trois formes : la déformation de la glace, la déformation du lit et le glissement de la glace sur le lit. La glace possède les mêmes propriétés qu'un fluide c'est-à-dire qu'elle a une certaine viscosité et une certaine plasticité (Vincent, 2003). Ces différentes déformations dépendront des paramètres physiques de la glace comme la température et la structure des cristaux de glace. Le glissement d'un glacier sur son support rocheux s'applique uniquement pour les glaciers « tempérés » (Couterrand, 2008) ou leur base est à température de fusion<sup>1</sup> par opposition aux glaciers dit « froids » figés sur leur lit rocheux. Dans les Alpes, les vitesses d'écoulement sont comprises entre quelques dizaines et quelques centaines de mètres par année.

Selon la théorie de Weertman (Francou et al. 2007), deux éléments peuvent expliquer les mécanismes de glissement d'un glacier tempéré : d'une part la rencontre du glacier avec un obstacle à sa base qui donne lieu à une augmentation de la pression provoquant une fonte, suivie d'un nouveau gel une fois l'obstacle passé, et d'autre part les contraintes inhérentes au passage de l'obstacle qui provoquent des déformations (Vincent, 2002). Par ailleurs la présence de rivières sous-glaciaires ou même d'un réseau hydrographique plus dense à la base du glacier, pourront être responsables du glissement. Enfin, il y a les contraintes internes à la glace qui provoquent des ruptures ou encore des crevasses et qui sont tout aussi difficiles à étudier et à mesurer (intérieur de glacier en mouvement permanent, etc.).

---

<sup>1</sup> Passage de l'état solide à l'état liquide, à une température et une pression donnée.

### 1.1.1 Le bilan de masse

Le bilan de masse se mesure durant une année hydrologique (dans les Alpes, entre le mois d'octobre de l'année en cours et le mois de septembre de l'année suivante, on parle alors de bilan de masse annuel). Cette mesure est particulièrement intéressante puisqu'elle reflète des conditions météorologiques ainsi que les flux d'énergie. Plus exactement, le bilan de masse correspond à la différence entre ce que le glacier gagne par accumulation (précipitations solides, neiges, neiges soufflées, regel d'eau en surface, etc.) et ce qu'il perd par ablation (fonte, évaporation, etc.) (Zryd, 2001).

Le bilan de masse d'un glacier dépendra de la situation de ce dernier. L'exposition, l'altitude et les conditions météorologiques locales auront toutes, leur importance. Le bilan de masse correspond à la hauteur en eau qui est gagnée ou perdue au cours de l'année. Elle s'exprime dès lors en mètres d'eau. Dès lors, lorsque le bilan de masse est négatif le glacier est en retrait et lorsque le bilan est positif il y a formation de glace supplémentaire. Selon Vincent (2010) les bilans de masse de surface, dans les Alpes, atteignent en moyenne des valeurs négatives de - 1 m d'eau/an vers 2 700 m, - 3,5 m d'eau /an vers 2 400 m, et - 7,5 m d'eau /an vers 1 800 m d'altitude.

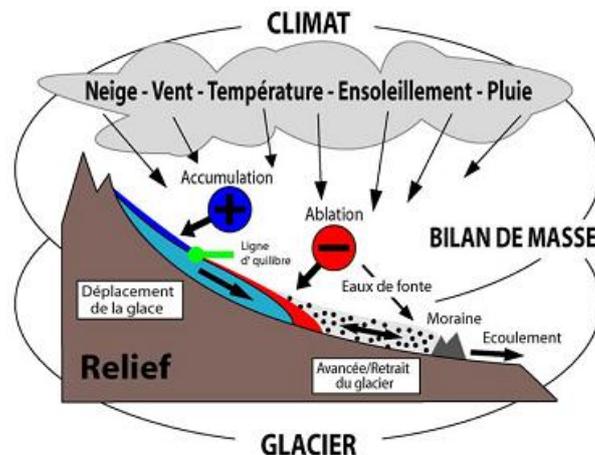


Figure 1 : Schéma illustrant les interactions au sein d'un système glaciaire (Unifr, 2009).

### 1.1.2 Méthode de mesure du bilan de masse

La mesure du bilan de masse peut s'effectuer selon plusieurs méthodes. La première, et l'une des plus répandue dans les Alpes consiste à mesurer, dans la partie haute du glacier, l'accumulation à l'aide de carottages manuels à travers la neige et le névé. Ces mesures sont effectuées en fin de période hivernale lorsque l'accumulation est à son maximum (Vincent, 2010). Une fois la carotte prélevée, cette dernière est pesée en vue d'obtenir la densité et de convertir la hauteur de neige en hauteur d'eau.

L'épaisseur de la couche hivernale s'effectue par simple identification visuelle de la couche du névé de l'hiver précédent (structure des grains différents, tailles différentes, poussières, etc.). Si l'on souhaite déterminer l'épaisseur du manteau neigeux à la fin de la période estivale, il est important d'introduire des balises dans les trous des forages, puisqu'à la fin de l'année hydrologique, l'examen visuel sera nettement plus difficile (Peysson, 2008).

Pour ce qui est de la mesure de la zone d'ablation, on implante dans le bas du glacier des balises à l'aide d'une sonde à vapeur, sonde qui fore des trous de 10 à 12 mètres de profondeur dans lesquels sont introduites les dites balises graduées (en bois, pvc,...). Au fur et à mesure du temps, l'ablation au niveau des balises est mesurée par rapport à l'émergence de la balise à la surface du glacier. Cette mesure est effectuée à la fin de la période estivale, c'est-à-dire en septembre ou octobre (LGGE, 2008).

Ces différentes mesures nous donnent des valeurs sur quelques points du glacier uniquement. Pour avoir le bilan de masse total du glacier il est nécessaire d'extrapoler les valeurs à toute la surface du glacier. La deuxième possibilité vient de la photogrammétrie. Des photographies aériennes précises sont retravaillées en laboratoire et permettent de couvrir l'ensemble de la surface du glacier (Vincent, 2010). Les données issues de ces modèles permettent de confirmer les mesures effectuées directement sur la surface du glacier tous les 5 à 10 ans. L'une des forces de cette méthode est qu'elle permet d'effectuer un suivi dans le temps grâce aux photographies des années précédentes. Une fois les données analysées, on arrive à déterminer le volume du glacier et les variations de celui-ci, avec par la suite la mesure du bilan de masse en équivalent eau.

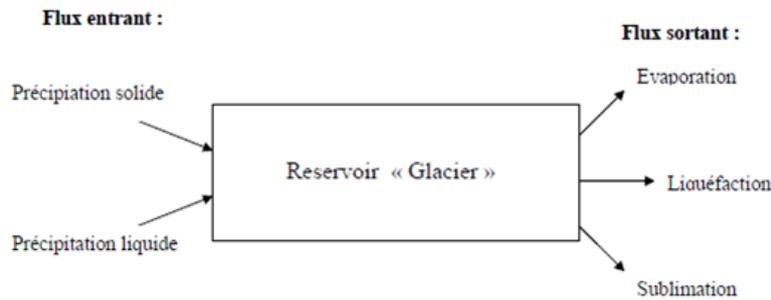
Enfin, la troisième méthode se base sur l'établissement du bilan hydrologique du glacier. On part de l'idée de système ou modèle avec d'un part des flux<sup>2</sup> entrant sur le glacier (le « réservoir »), à savoir des précipitations solides<sup>3</sup>, et d'autre part des flux sortant (ou « puits ») sous forme d'eau via le torrent émissaire. La grosse difficulté réside toutefois dans le fait qu'outre les eaux de fonte du glacier à proprement parler, on retrouve les eaux de fonte de neige des versants adjacents. Par ailleurs, une certaine quantité d'eau quitte le « système glacier » au travers de la percolation dans le substrat rocheux, de la sublimation ou encore de l'évaporation (Vincent, 2010). Il est donc complexe d'estimer les variations du bilan de masse en intégrant l'ensemble de ces paramètres.

Néanmoins cette approche nous permet d'avoir une certaine visibilité des possibles impacts de la fonte de certains glaciers du Val d'Hérens grâce à la présence de mesures hydrologiques (limnigraphe) utilisées par le complexe hydroélectrique de la Grande Dixence.

---

<sup>2</sup> Appelé « source »

<sup>3</sup> Il peut bien entendu s'agir de précipitations liquides durant certain épisode mais qui regèleront par la suite.



**Figure 2 : système « glacier » avec les input et les output (composition personnelle)**

### 1.1.3 Zone d'accumulation

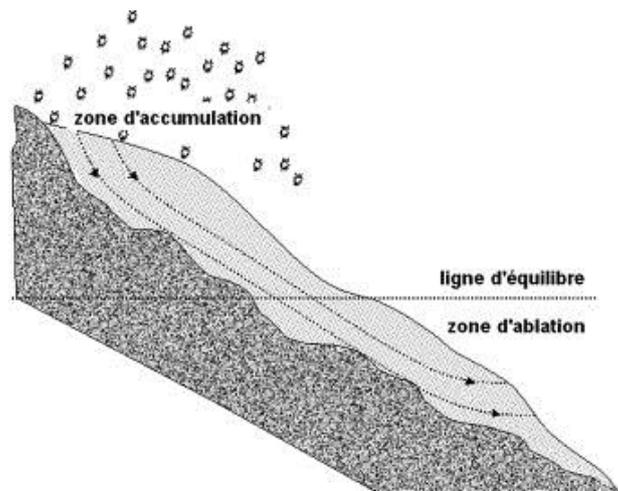
Au sein de la partie haute du glacier, le gain est supérieur à la perte ; on parle alors de zone d'accumulation. Ainsi, dans les Alpes, la zone d'accumulation se situe en moyenne au-dessus de 2900 mètres (Vincent, 2010). En dessous de cette limite, la fonte estivale fait disparaître la neige accumulée durant la période hivernale (d'octobre à mai). Cette zone d'alimentation est vitale pour la survie d'un glacier. Si celle-ci est trop faible ou à trop basse altitude, le glacier sera condamné à disparaître. Bon nombre des glaciers des Alpes, se retrouvent dans cette situation, avec une ligne d'équilibre précaire.

Dans les Alpes, les bilans de masse de surface atteignent en moyenne des valeurs de - 1 mètre d'eau/an vers 2 700 m, à - 7,5 mètres d'eau /an vers 1.800 mètres d'altitude. Aux altitudes inférieures à 4.000 mètres, la fonte estivale (avec son eau de fonte en surface) s'infiltré dans le glacier pour le placer à température de fusion sur toute son épaisseur. On parle dans ce cas de glacier tempéré (majoritaire dans les Alpes). Lorsque la température du glacier est en permanence en dessous de 0° jusqu'au lit rocheux (au-delà de 4000 mètres dans les Alpes généralement), on parle alors de glacier « froid » (Lambiel, 2010) (glaciers suspendus ou par exemple les glaciers des Bossons dans le massif du Mont-Blanc). A haute altitude, la fonte estivale est quasi absente<sup>4</sup>. Normalement, les précipitations sont alors généralement solides (sous forme de neige) et exceptionnellement sous forme liquide lors d'épisode extrême (canicule de 2003 par exemple).

### 1.1.4 La ligne d'équilibre

Cette zone de transition fragile entre accumulation et fonte estivale est dénommée ligne d'équilibre, elle se situe autour de 2900 mètres d'altitude dans les Alpes.

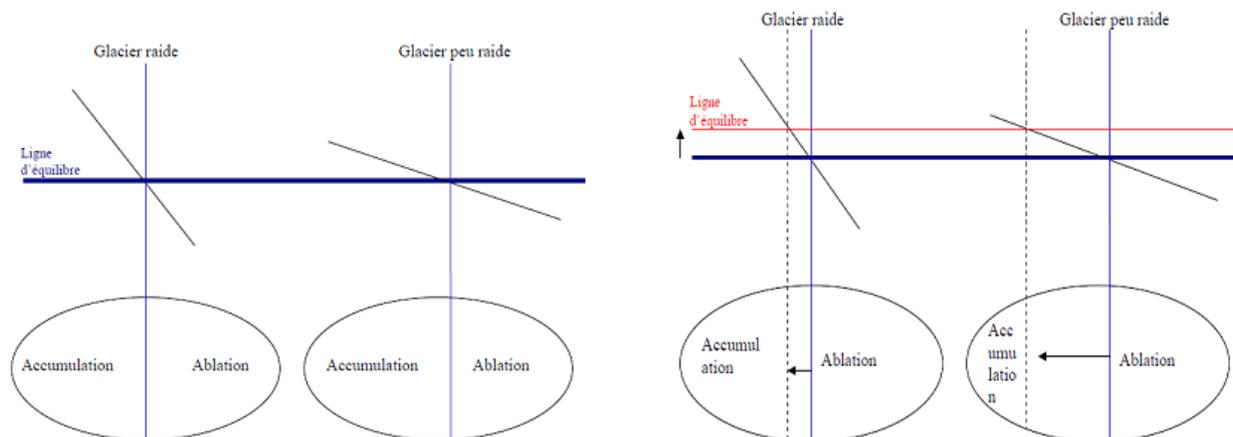
<sup>4</sup> Néanmoins comme la vague de chaleur que nous avons connu en 2003, la neige peut fondre au-delà de 4000 mètres voir plus haut



**Figure 3 : Schéma représentant la zone d'accumulation, la zone d'ablation ainsi que la zone d'équilibre (Unifr, 2010).**

Lorsque l'on relie l'ensemble des points entre la zone d'accumulation et d'ablation du glacier (voir ci-dessous) ou les lieux présentant des bilans de masse de surface nuls, on obtient la ligne d'équilibre du glacier, ligne d'équilibre qui peut être légèrement variable d'un massif à l'autre (Vincent, 2010). Comme nous pouvons l'observer sur la photographie ci-dessus, la zone d'accumulation est recouverte de neige « blanche » tandis que la zone d'ablation constituée de glace « grise », provenant de débris accumulés dans le glacier ou des parois rocheuses avoisinantes. Cette limite correspond en outre à la limite des l'isotherme 0°<sup>5</sup>. Plus cette limite monte en altitude et plus la zone d'accumulation diminue. Selon Reynard (2010), pour qu'un glacier soit en équilibre avec les conditions climatiques existantes, il faut que la zone d'accumulation corresponde à deux fois la surface de la zone d'ablation. Par ailleurs, la ligne d'équilibre d'un glacier est à mettre en étroite relation avec la pente du glacier dans un contexte de réchauffement climatique. Ainsi, pour un glacier à faible pente, avec une augmentation de X degrés, la ligne d'équilibre remontera et la zone d'accumulation diminuera. Il en sera de même pour un glacier plus raide mais dans une bien moindre mesure.

<sup>5</sup> L'isotherme 0° correspond à l'altitude ou la température moyenne atteint 0°. Cet isotherme varie au cours du temps en fonction des conditions météorologique et géophysique.



**Figure 4 : Schéma représentant la ligne d'équilibre du glacier en fonction de la pente et d'une augmentation des températures (composition personnelle)**

En fonction de la zone d'accumulation et de l'altitude de celle-ci, la neige peut mettre plus ou moins de temps à se transformer en glace. La neige n'est pas inerte. Entre le moment de sa chute, de sa fonte, ou de sa transformation en glace, elle ne cessera de se modifier sous l'influence des conditions mécaniques, physiques et thermodynamiques. Notons simplement que les cristaux et grains de neige connaîtront une multitude de modifications lentes et complexes. Ils reflèteront la composition de l'atmosphère des années précédentes.

### 1.1.5 Zone d'ablation

A l'aval du glacier, dans sa région basse, la fonte l'emporte sur l'accumulation. On parle alors de zone d'ablation. Si l'on descend le glacier, la fonte estivale augmente et par conséquent le bilan de masse diminue. Les bilans de masses de surface sont étroitement liés aux échanges entre le glacier et l'atmosphère, mais aussi à la présence ou non de débris rocheux<sup>6</sup> pouvant jouer un rôle isolant (protégeant la glace de la fusion en fonction de l'épaisseur) ou de conducteur (en accélérant la fusion, à l'exemple des « tables des géants » sur certains glaciers)

En outre, afin de caractériser les climats régionaux, les climatologues utilisent la notion de régime (notion relativement peu utilisée). Le régime régional correspond à la somme de l'accumulation et de l'ablation sur l'ensemble du glacier (Vincent, 2010), tandis que le régime spécifique correspond à cette somme divisée par la surface du glacier. Ainsi, les glaciers des zones tempérées (comme la majorité de ceux des Alpes) et maritimes ont un régime élevé puisque qu'ils bénéficient d'une accumulation

<sup>6</sup> Intervient ici la notion l'albedo, le pouvoir réfléchissant, de ces matériaux.

importante et d'une ablation forte, par opposition aux glaciers tropicaux (à hautes altitudes) ou Arctiques qui bénéficient d'un régime faible (Vincent, 2002).

Dans les Alpes, la saison hivernale commence généralement dans le courant du mois de septembre, bien qu'il arrive que certaines portions de la langue glaciaire en basse altitude soient dépourvues de neige fin novembre voir jusqu'en décembre. Jusqu'au mois de mai, l'épaisseur du manteau neigeux tend alors à augmenter avec les apports de neige (malgré la possibilité de périodes de fonte en plein hiver).

La saison estivale elle, commence à partir du mois de mai. L'accumulation solide faiblit et la fusion prend le pas, (sauf à haute altitude, généralement au-dessus de 4000 mètres) et contribue ainsi à la diminution du manteau neigeux. Au-delà de la limite de la ligne d'équilibre, la neige accumulée durant l'hiver ne fondra pas entièrement durant la période estivale, ce qui donnera un bilan de masse positif au mois de septembre. En-deçà de cette altitude, le bilan de masse sera négatif puisque le manteau neigeux de l'hiver ne pourra subsister face à la fonte ; on assiste dès lors à une fonte de la glace du dessous (Vincent, 2010). Notons que même durant la période estivale, il est possible de rencontrer des épisodes de gel ou de neige à plus faible altitude, réduisant ainsi la fonte.

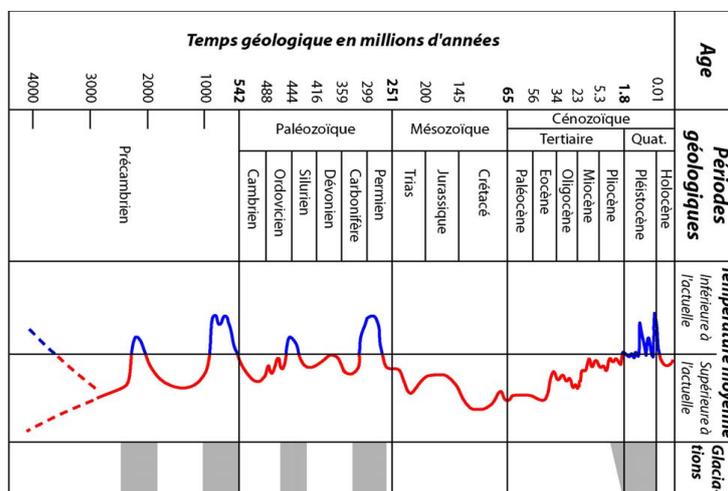
## **1.2 Historique du climat : des glaciers, une Terre**

Pour comprendre la situation actuelle des masses glaciaires dans le Val d'Hérens et plus globalement dans les massifs alpins, il est important de remettre brièvement dans son contexte historique l'évolution des glaciers. Cela nous aidera en outre à mettre en relation le climat et la fluctuation glaciaire.

### **1.2.1 De la naissance de la Terre au Quaternaire**

Depuis la naissance de la Terre il y a 4,6 milliards d'années, le climat n'a eu de cesse de se modifier, connaissant des périodes de glaciation intense et d'autres chaudes et humides. Cette alternance climatique, s'inscrit dans un ensemble complexe de phénomènes : les continents dérivent, le volcanisme et le climat varient, etc... Les températures ont toujours évoluées et répondent à des variations climatiques naturelles. La détermination de périodes glaciaires aussi lointaines, lorsque les continents n'étaient pas du tout disposés comme aujourd'hui, se fait grâce aux informations trouvées notamment dans les roches carbonatées océaniques.

Cinq grandes ères glaciaires ont été dénombrées dans les Alpes (Coutterand, 2008): la glaciation de l'huronien (de 2,4 à -2,1 milliards d'années), la glaciation de la fin du précambrien (de -800 à -550 millions d'années), l'ordovicienne (autour de -450 millions d'années), la permo-carbonifère (de -350 à -250 millions d'années), enfin l'ère glaciaire actuelle, il y a 30 ou 40 millions d'années. Ces glaciations ont connu des intensités variables avec par exemple, à la glaciation précambrienne, une terre quasiment recouverte de glace.



Graphique 1: Evolution des températures terrestres au cours des différentes époques géologiques (Tison, 2011)

## 1.2.2 Du quaternaire au Petit Age Glaciaire (PAG)

Lorsque l'on s'arrête sur la période du quaternaire, sculptrice du paysage alpin, et qui a débuté il y a 2,4 millions d'années, on constate une alternance entre périodes glaciaires et interglaciaires, caractéristiques de la seule période quaternaire.

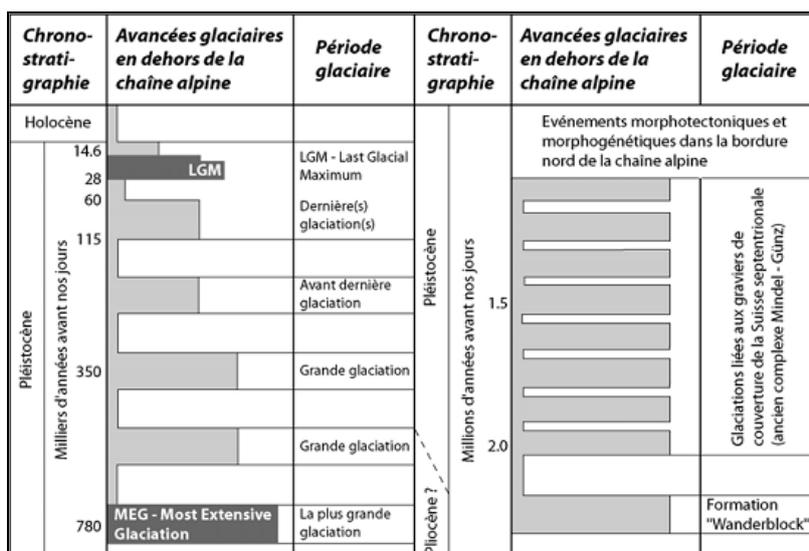
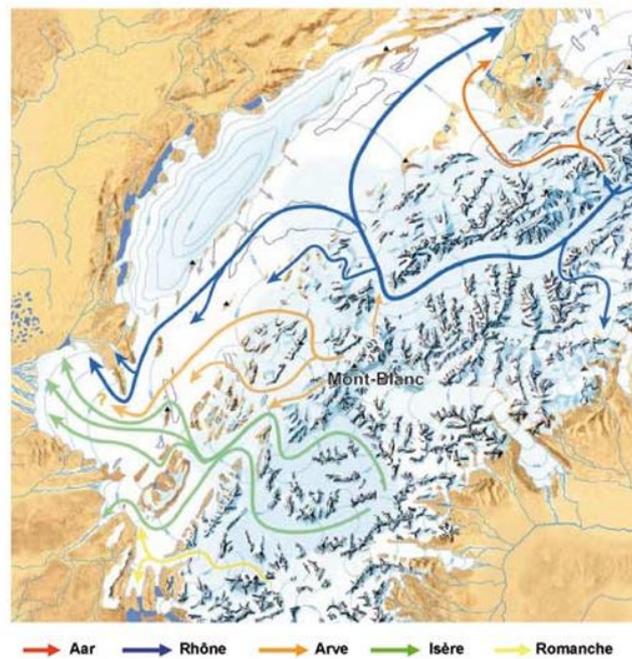


Figure 5 : Chronologie des grandes glaciations quaternaires sur le versant nord des Alpes Suisses. (Unifr, 2009).

La première des grandes glaciations du quaternaire débute il y a 2,4 millions d'années dans l'hémisphère nord en raison d'une diminution de l'intensité du rayonnement solaire aux hautes latitudes (Coutterrand, 2009). Cette baisse s'explique par les cycles<sup>7</sup> de Milankovitch (Tison, 2011). Grâce à différentes méthodes de mesure, on a pu à déterminer au moins 25 glaciations et 25 périodes interglaciaires avec une périodicité d'environ 100.000 ans chacune.

C'est durant ces périodes d'avancée et de retrait glaciaire, que le paysage actuel des Alpes a été modelé. Aussi, c'est au cours du Würm, dernière grande glaciation (environ 115.000 à 10.000 BP), que le relief alpin a pris sa forme actuelle. Au cours du dernier maximum glaciaire (*Last Glacial Maximum*), la glace a atteint son maximum dans l'ensemble du bassin lémanique (vers 27.000 BP). A cette époque, la température annuelle moyenne était nettement plus basse qu'aujourd'hui, de l'ordre de 8 à 10°C plus froid (Coutterrand, 2008). A titre d'exemple, le glacier du Rhône se divisait en deux grandes langues, l'une parcourant le plateau suisse et l'autre, en France, atteignant l'actuelle périphérie lyonnaise. À partir d'environ 20.000 BP, on note une augmentation de l'intensité du rayonnement solaire, avec un réchauffement du climat. Après le dernier maximum glaciaire, on note de nouvelles variabilités glaciaires plus ou moins marquées entre 20.000 BP et 10.000 BP. (Unifr, 2009)



**Figure 6 : Carte schématique du dernier maximum glaciaire (LGM) et des principaux flux glaciaires dans les Alpes du Nord (Coutterrand, 2007)**

<sup>7</sup> On note 3 cycles découverts par Milankovitch dans les années 1910. Le premier cycle, l'excentricité de l'orbite terrestre autour du soleil, avec une fréquence d'à peu près 100.000 ans ; le second cycle concerne la variation de l'obliquité de l'axe de la Terre avec une périodicité de 40.000 ans ; et enfin, le troisième cycle est la précession des équinoxes avec une périodicité de 20.000 ans. Ces trois éléments permettent d'expliquer en partie les variations climatiques du quaternaire.

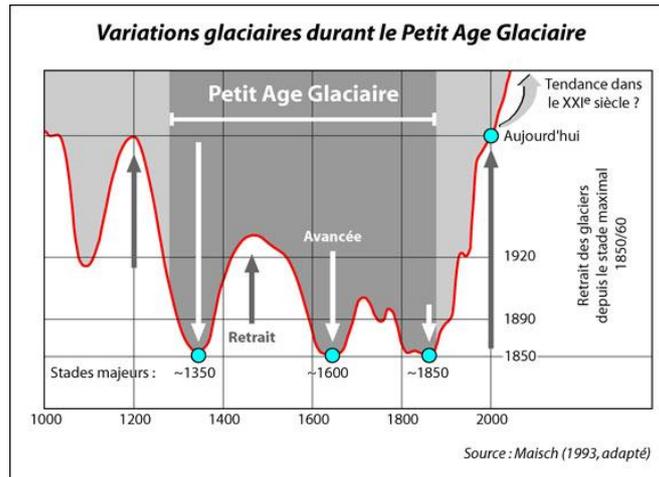
Vient ensuite l'Holocène (10.000 BP à aujourd'hui), au climat assez semblable à celui d'aujourd'hui, caractérisé par de nombreuses fluctuations glaciaires. Au début de l'Holocène les glaciers alpins connaissent une position assez semblable à celle que nous connaissons actuellement. La répétition de ces fluctuations a généralement été de faible amplitude, la plus grande étant celle du Petit Age Glaciaire . Les nombreuses fluctuations glaciaires de l'Holocène ont donné naissance à d'imposants complexes morainiques se superposant parfois. En outre, les optimums climatiques, ou périodes plus chaudes de l'Holocène, ont provoqué une remontée de la limite de la forêt dans les Alpes ( à plus de 200 mètres que la limite actuelle) (Coutterand, 2008). Grâce à l'analyse de débris de bois, notamment des pins d'Arolle, liés au retrait glaciaire de ces dernières années, les chercheurs ont pu mettre en évidence dix épisodes chauds avec une fonte des glaciers. Ceux-ci alternaient avec de nouvelles avancées glaciaires. Ces indications sont précieuses puisqu'elles nous indiquent qu'autrefois des forêts ou des tourbières se trouvaient à la place des glaciers. C'est durant ces périodes favorables de l'optimum climatique, qu'une partie des Alpes et de certaines vallées, jusque-là inaccessibles, commencent à être habitées. La phase maximale de retrait eut lieu entre 9.000 et 6.800 ans BP, et constituerait le pic de l'optimum climatique holocène, au cours duquel de nombreux glaciers alpins ont complètement disparu (Coutterand, 2008).

### **1.2.3 Du Petit Age Glaciaire à aujourd'hui**

Enfin, la période du Petit Age Glaciaire (PAG) s'étend du XIV-XVIème<sup>8</sup> au milieu du XIXème siècles, et est caractérisée par 2 ou 3 poussées glaciaires (en fonction du début du PAG). Cette période connaît un refroidissement du climat de l'ordre de 0,5°C à 1°C sans doute expliqué par une baisse de l'activité solaire et une augmentation de l'activité volcanique (Bertrand, 2003).

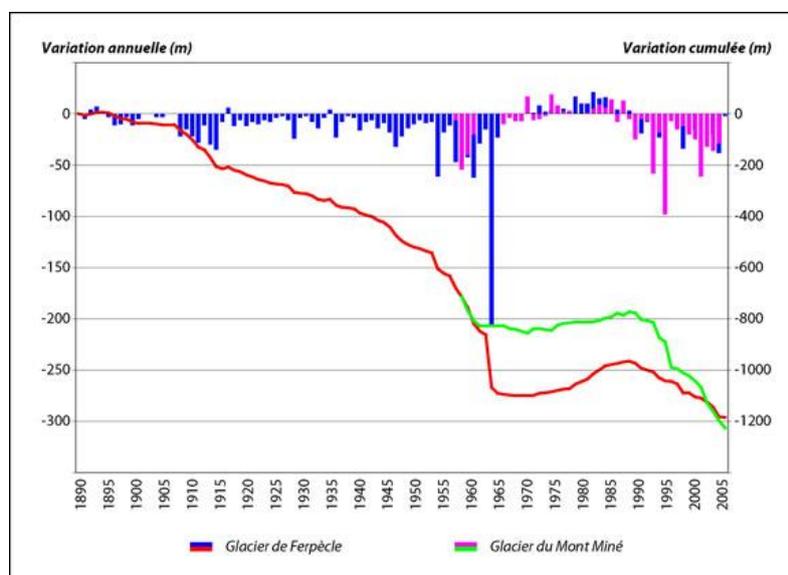
---

<sup>8</sup> Les dates exactes du PAG ne font pas l'unanimité par manque de témoignages historiques directs et surtout par défaut de renseignements sur les extensions glaciaires antérieures aux années 1600 (Reynaud, 2002). Nous prendrons néanmoins les données suggérées par Reynaud et Vincent à savoir de 1600 à 1820 années connues pour d'intenses crues glaciaires (1820 correspondant à l'extension maximale de la majorité des grands glaciers).



**Graphique 2 : Fluctuation glaciaire dans les Alpes suisses au Petit Age Glaciaire (Unifr, 2009)**

La fin du PAG correspond à la période suivant la dernière crue glaciaire de 1820. Par ailleurs, la fin du PAG est concomitante avec le début de mesures sur certains glaciers alpins (Reynaud, 2002). Le retrait des glaciers après le PAG n'a pas été homogène. En effet, on a noté des périodes où les bilans de masse de la plupart des glaciers ont été positifs (durant les décennies 1880-1890, 1911-1920 et 1971-1985) et d'autres où ils étaient négatifs (1870-1880, 1895-1905, 1925-1950) (Unifr, 2009). Depuis le début des années 1980, le retrait glaciaire est généralisé au massif alpin, avec ces 15 dernières années une accélération due à la hausse des températures (Bertrand, 2003).



**Graphique 3: Evolution du glacier de Ferpècle et du Mont Miné de 1890 à 2005. A la fin du Petit Age Glaciaire, les glaciers de Ferpècle et du Mont Miné (Val d'Hérens) étaient unis. A partir des années 1950, leurs langues commencent à se séparer. Cette séparation, « définitive » en 1962, explique l'importante variation de la longueur pour le Glacier de Ferpècle (205 mètres de retrait en 1962-1963) (Bezinge, 2000) (Unifr, 2009).**



## **Chapitre 2 Les changements climatiques dans les Alpes : état des lieux et évolution**

*« L'augmentation du CO<sub>2</sub> et d'autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère conduit à un réchauffement croissant. Il est très probable que la majeure partie du réchauffement depuis le milieu du 20<sup>e</sup> siècle soit dû à la combustion d'agents énergétiques fossiles et à l'augmentation des gaz à effet de serre causée par l'être humain. » (GIEC, 2007)*

*« Le réchauffement climatique est manifeste et observé dans le monde entier (fig. 1). Des mesures indiquent une hausse des températures moyennes de l'air et de l'océan en même temps qu'une diminution de la couverture neigeuse, une intensification de la fonte de la banquise et un recul des glaciers. Une conséquence en est l'élévation du niveau de la mer. Les effets des changements climatiques se traduisent aussi par une augmentation des vagues de chaleur, des sécheresses et des fortes précipitations. » (GIEC, 2007)*

Dans le présent chapitre, il sera question d'aborder quatre aspects importants pour comprendre les liens entre le réchauffement climatique dans les Alpes et la gestion de l'eau : l'évolution des températures, des précipitations, du couvert neigeux et enfin les bilans de masses glaciaires. Il s'agit maintenant de vérifier avec des données scientifiques issues de mesures parfois simples et parfois plus complexes comment les glaciers répondent aux variations climatiques et quels sont les facteurs qui vont les influencer ?

En raison de leurs diversités climatiques et écologiques (reliefs, végétation, etc.), les Alpes conditionnent de nombreux phénomènes atmosphériques et de climats régionaux. Ces interactions complexes et parfois fragiles, sont d'autant plus exposées aux variations climatiques rapides (Brugmann, 2005). Nous avons fait le choix méthodologique de nous appuyer sur des données qui concernent spécifiquement les Alpes françaises et suisses, notamment en raison de l'abondance des sources d'informations disponibles et bien entendu du sujet même du mémoire. Les périodes couvertes seront majoritairement le XX<sup>e</sup> siècle ainsi que le XXI<sup>e</sup> siècle pour ce qui est des modèles prévisionnels. Il n'est pas question ici de traiter en profondeur des changements climatiques et des effets constatés, travail largement accomplis par le GIEC (Groupe d'Expert intergouvernemental sur l'évolution du climat) mais bien de relever sur des échelles de temps court et en complémentarité avec le chapitre précédent, des éléments clés utiles pour la suite du présent travail.

## 2.1 Evolution des températures dans les Alpes

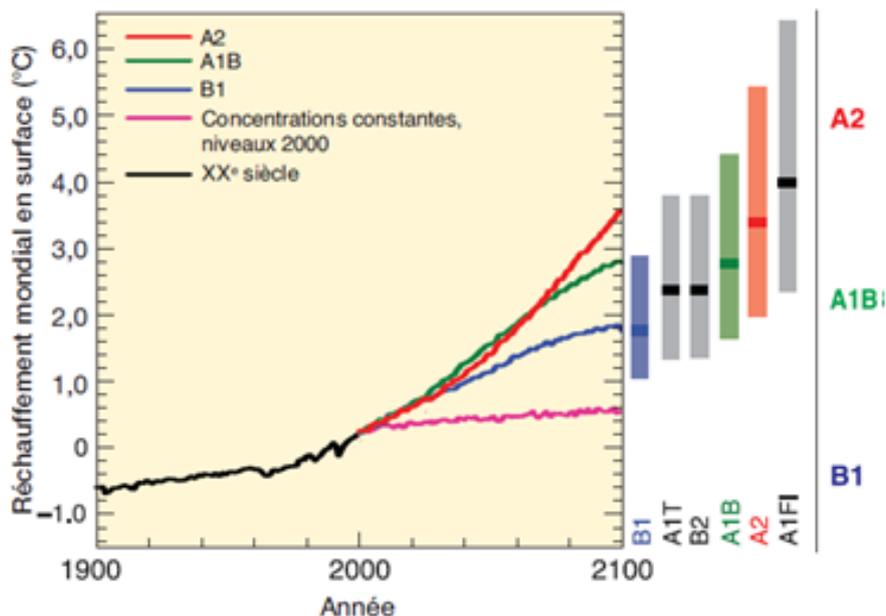
La température de l'air joue un rôle déterminant dans la chaîne climatique et hydrologique. D'elle dépend la nature des précipitations et leur intensité. Ainsi si elles atteignent des valeurs trop clémentes durant la fin de la période hivernale (en avril et mai), la zone d'ablation d'un glacier tempéré alpin sera dépourvue d'une partie du manteau protecteur que représente la neige (Christian, 2007). Une plus grande surface de neige « grise » sera donc visible laissant tout le loisir au rayonnement solaire de la faire fondre.

Selon le dernier rapport du GIEC, « Le réchauffement du système climatique est sans équivoque. On note déjà, à l'échelle du globe, une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan, une fonte massive de la neige et de la glace et une élévation du niveau moyen de la mer. Onze des douze dernières années (1995-2002) figurent parmi les douze années les plus chaudes depuis 1850, date à laquelle ont débuté les relevés instrumentaux de la température à la surface du globe. Alors que, dans le troisième rapport d'évaluation (TRE), on estimait à 0,6 [0,4-0,8] °C la tendance linéaire au réchauffement entre 1991 et 2000, la valeur établie pour 1906 et 2005 atteint 0,74 [0,56-0,92]°C. Entre 1956 et 2005, la tendance linéaire (0,13 [0,10 -0,16])°C tous les dix ans) sur un demi-siècle est près de deux fois plus importantes que celle constatée sur un siècle, entre 1906 et 2005 » (GIEC, 2007).

Si l'on se base sur des modèles climatiques globaux du GIEC dans le rapport spécial sur les scénarios d'émission (au nombre de six<sup>9</sup> et se basant sur des scénarios d'émission de GES en fonction d'un panel de facteurs démographiques, économiques ou encore technologique (GIEC 2007 ; SRES, 2000), l'augmentation des températures serait de l'ordre de 1,1 à 6,4°C à la surface du globe en prenant les valeurs extrêmes minimum et maximum.

---

<sup>9</sup> « Le canevas A1 fait l'hypothèse d'un monde caractérisé par une croissance économique très rapide, un pic de population mondiale au milieu du siècle et l'adoption rapide de nouvelles technologies plus efficaces. Cette famille de scénarios se répartit en trois groupes qui correspondent à différentes orientations de l'évolution technologique du point de vue des sources d'énergie : à forte composante fossile (A1FI), non fossile (A1T) et équilibrant les sources (A1B). Le canevas B1 décrit un monde convergent présentant les mêmes caractéristiques démographiques que A1, mais avec une évolution plus rapide des structures économiques vers une économie de services et d'information. Le canevas B2 décrit un monde caractérisé par des niveaux intermédiaires de croissance démographique et économique, privilégiant l'action locale pour assurer une durabilité économique, sociale et environnementale. Enfin, le canevas A2 décrit un monde très hétérogène caractérisé par une forte croissance démographique, un faible développement économique et de lents progrès technologiques. » (GIEC 2007).



**Graphique 4: Évolution des températures en fonction des SRES. Les traits de couleurs correspondent aux moyennes mondiales multimodèles du réchauffement en surface par rapport à la période 1980-1990. Et les barres de couleurs correspondent aux fourchettes selon les six scénarios SRES de référence pour la période 2090-2099 (GIEC 2007)**

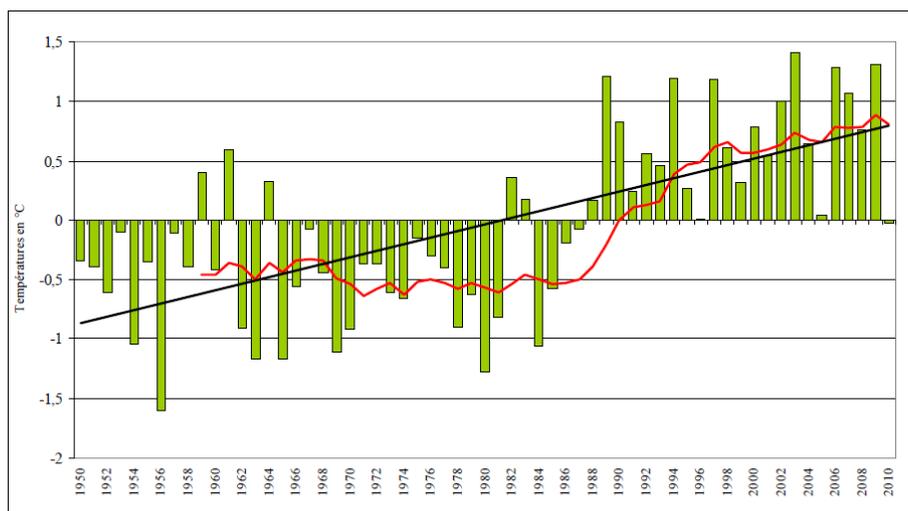
La figure ci-dessus nous montre qu'au rythme actuel voire avec une accélération des émissions de GES, le climat va continuer à se réchauffer avec des modifications très importantes pour le siècle à venir au sein du système climatique. Les barres de couleurs, représentatives des intervalles de confiance pour chaque scénario (avec au milieu de chacune de celles-ci, en gras, la valeur la plus probable), nous informent de l'important degré d'incertitude ainsi que des fourchettes de température supérieures (au-dessus des lignes en gras), pour chaque scénario. Ces fourchettes s'expliqueraient par la prise en compte dans les modèles, de nouvelles rétroactions positives entre le climat et le cycle du carbone (IPCC, 2007). Par ailleurs, la courbe rose, résultant de simulations dans lesquelles les concentrations en GES sont maintenues à leurs niveaux de 2000, montre que les températures continuent quand même à augmenter jusqu'en 2100 (de l'ordre de 0,6°C).

Cas	Variation de température (°C, pour 2090–2099 par rapport à 1980–1999) <sup>a, d</sup>	
	Valeur la plus probable	Intervalle probable
Concentrations constantes, niveaux 2000 <sup>b</sup>	0,6	0,3 – 0,9
Scénario B1	1,8	1,1 – 2,9
Scénario A1T	2,4	1,4 – 3,8
Scénario B2	2,4	1,4 – 3,8
Scénario A1B	2,8	1,7 – 4,4
Scénario A2	3,4	2,0 – 5,4
Scénario A1FI	4,0	2,4 – 6,4

**Tableau 1 : Projections des valeurs moyennes du réchauffement pour la période 2090-2099 par rapport à la période 1980-1999 (GIEC 2007).**

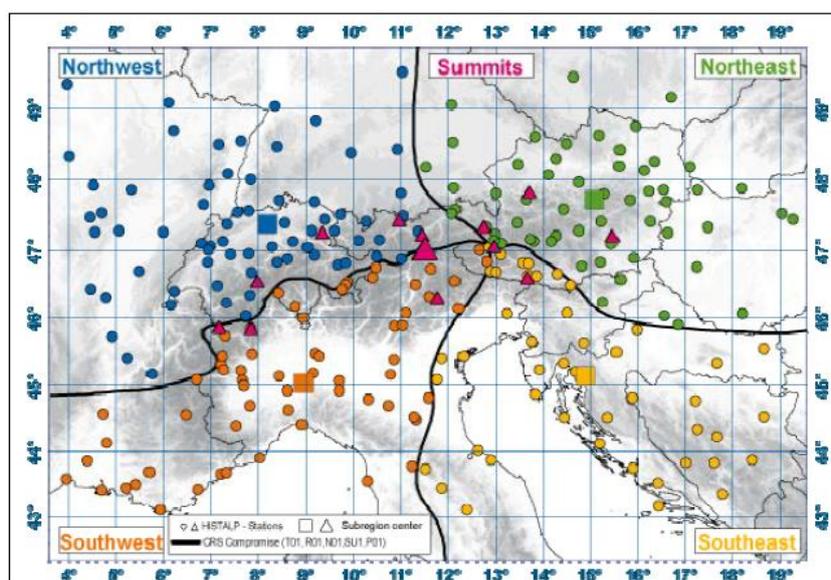
Même si la hausse des températures est quasi généralisée sur le globe, des disparités importantes existent à l'échelle locale. Néanmoins, le constat est unanime pour les Alpes, les températures ont augmenté partout. Qui plus est, le réchauffement s'est accentué durant la dernière décennie (Beniston, 2005) dans les massifs alpins. Cette tendance se marque par une augmentation du nombre de journées estivales chaudes et par une diminution du nombre de jours de gel (ClimChAlp, 2008). Il est important de préciser que les séries de mesures de températures prises dans les Alpes ne sont pas toujours homogènes (stations météo fermées, nouveaux emplacements, etc.). Ce constat, justifie l'utilisation par les scientifiques de méthodes plus pointues, telle que la dendrochronologie pour reconstruire les températures.

Dans les Alpes françaises, la température a, en moyenne, augmenté de 0,9°C au cours de la période (1901-2000) ainsi que la moyenne des températures minimales journalières (Auffray A. et al. 2011). Si l'on regarde par exemple dans les Alpes savoyardes, la température a augmenté de 1,7°C sur la période 1950-2010 (Observatoire Savoyard du Changement Climatique, OSCC, 2010). En comparaison avec l'ensemble des Alpes, les tendances sont très proches.



**Graphique 5 : Écart moyen de la température moyenne annuelle de la montagne savoyarde de 1950 à 2010 par rapport à la normale 1971/2000. (OSCC, 2011)**

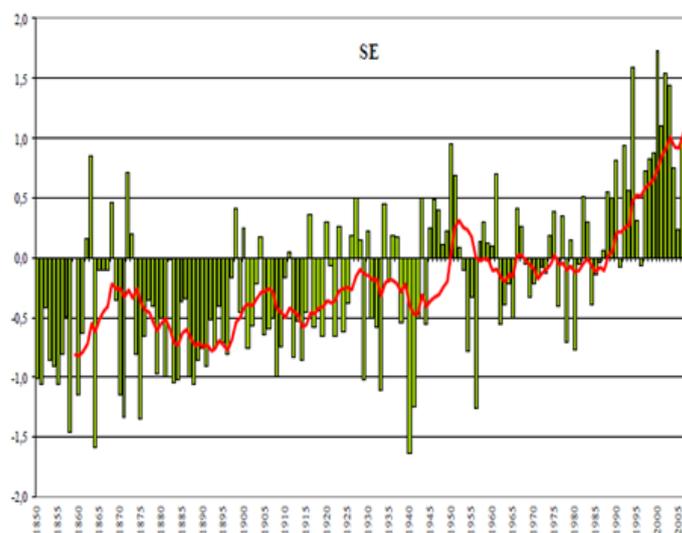
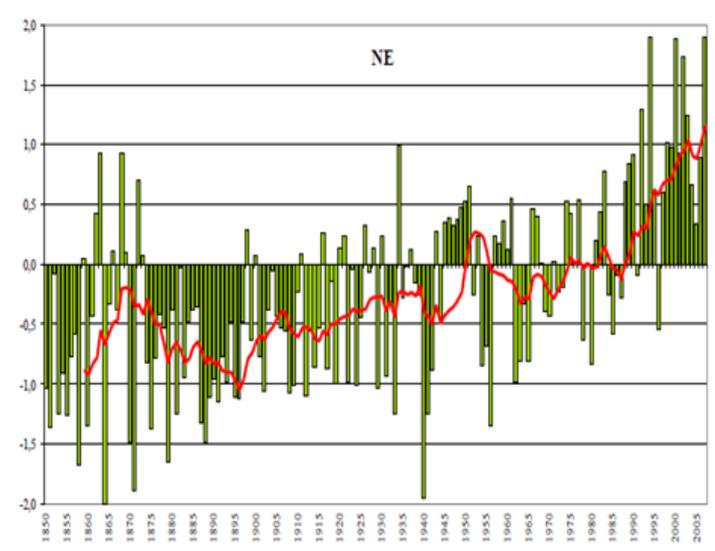
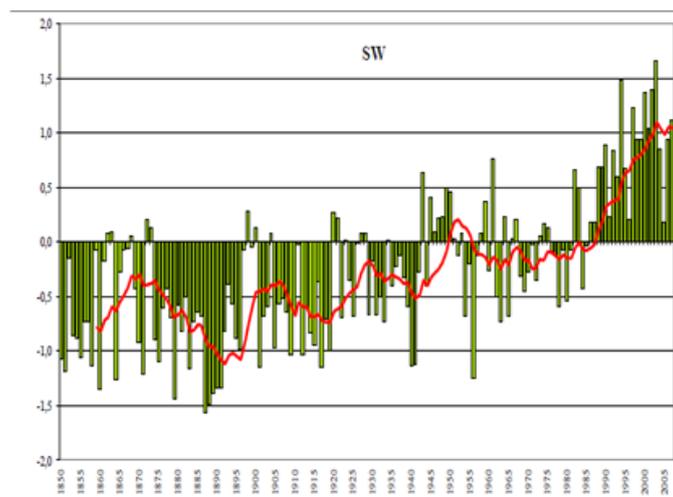
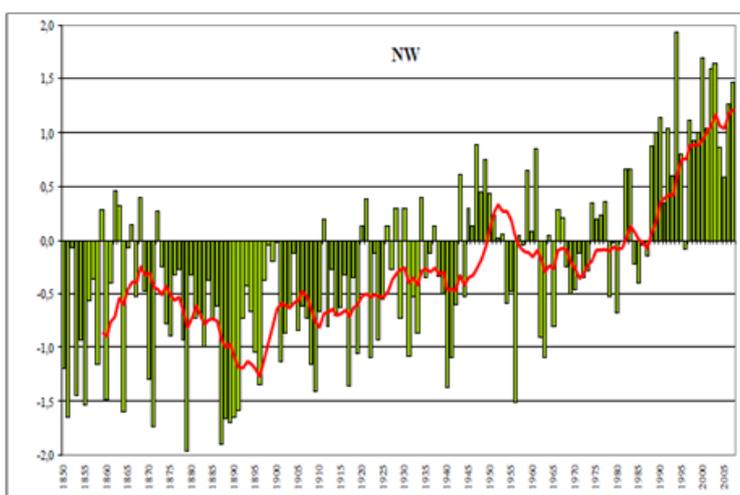
Si l'on examine de plus près les séries climatiques alpines du projet HistAlp<sup>10</sup> (HistAlp database, 2007) et ses quatre sous régions alpines (NW, SW, NE, SE) différents constats ressortent ci-dessous:



**Figure 7 : Carte de localisation des postes de mesures utilisées dans le projet Histalp. Séparation des Alpes en quatre sous-régions climatiquement homogènes (HistAlp database, 2007).**

L'augmentation des températures est nette et uniforme sur l'ensemble des Alpes. Cependant quelques nuances régionales ressortent: d'une part la région nord-ouest a connu l'augmentation des températures la plus importante depuis 1850, suivi par les régions sud-ouest et nord-est et enfin la sud-est, cette dernière se réchauffant plus rapidement depuis 1975 (OSCC, 2010). On remarque donc un gradient dans l'intensité du réchauffement entre le nord-ouest et le sud-est (HistAlp database, 2007).

<sup>10</sup> HistAlp est une base de données avec le plus grand nombre de séries climatiques homogénéisées à travers les Alpes et cela depuis le 18<sup>ème</sup> siècle.



**Graphique 6: NW- Evolution des écarts annuels moyens des températures de la partie nord-ouest des Alpes de 1850 à 2007 (par rapport à la période 1961/1990).**

*Courbe rouge : moyenne glissante sur 10 périodes.*

*Tendance linéaire : +1,71°C (1850/2007) ; + 1,68°C (1950/2007) ; +1,62°C (1975/2007) (HistAlp database, 2007)*

**Graphique 7: SW- Evolution des écarts annuels moyens des températures de la partie sud-ouest des Alpes de 1850 à 2007 (par rapport à la période 1961/1990).**

*Courbe rouge : moyenne glissante sur 10 périodes.*

*Tendance linéaire : +1,51°C (1850/2007) ; + 1,48°C (1950/2007) ; +1,53°C (1975/2007) (HistAlp database, 2007)*

**Graphique 8 : NE- Evolution des écarts annuels moyens des températures de la partie nord-est des Alpes de 1850 à 2007 (par rapport à la période 1961/1990).**

*Courbe rouge : moyenne glissante sur 10 périodes.*

*Tendance linéaire : +1,52°C (1850/2007) ; + 1,46°C (1950/2007) ; +1,50°C (1975/2007) (HistAlp database, 2007)*

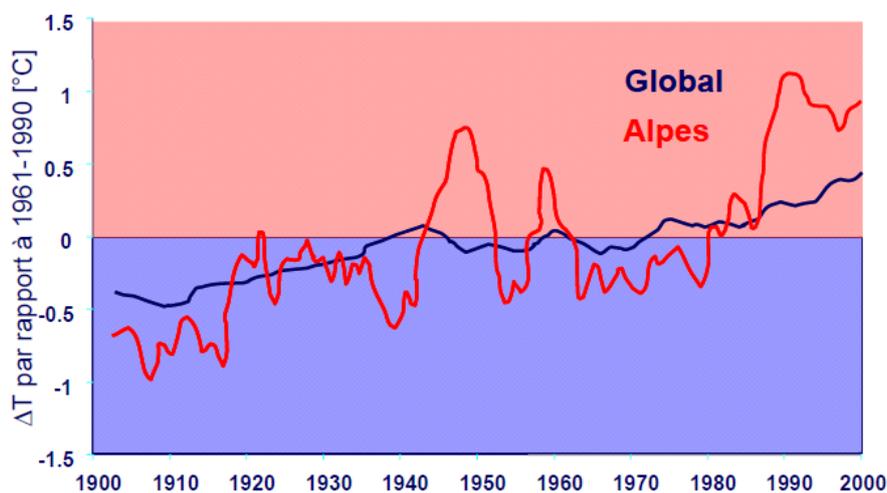
**Graphique 9: SE- Evolution des écarts annuels moyens des températures de la partie sud-est des Alpes de 1850 à 2007 (par rapport à la période 1961/1990).**

*Courbe rouge : moyenne glissante sur 10 périodes.*

*Tendance linéaire : +1,37°C (1850/2007) ; + 1,28°C (1950/2007) ; +1,62°C (1975/2007) (HistAlp database, 2007).*

Ensuite, la tendance au réchauffement serait de l'ordre de 0,2 et 0,4°C par décennie dans les Alpes françaises. Selon les modèles de Météo France (Auffray A. et al 2011) l'augmentation des températures moyennes annuelles journalière serait comprise entre 2,3°C et 2,7° C selon le scénario B2 et entre 3°c et 3,5° pour le scénario A2 pour la période 2070-2099.

En ce qui concerne les Alpes suisses, les tendances sont assez similaires. « Du fait de la faible étendue géographique de la Suisse, les tendances de l'évolution du climat, qui ressortent de ces mesures, sont affectées d'une forte variabilité. Mais elles ne laissent aucun doute sur les changements climatiques en cours, notamment en ce qui concerne les températures. » (OCCC 2008)



**Graphique 10 : Evolution de l'anomalie de températures moyennes globales et comparaisons avec l'évolution en Suisse entre 1901 et 2000. L'anomalie se calcule sur la base des différences de températures par rapport à la période de référence 1961-1990. (Beniston 2008)**

Les différents sites de mesure (dix-huit au total, situés entre 317 et 2.500 mètres d'altitude) des Alpes suisses nous indiquent une augmentation des températures à partir de 1960, comme le montre le graphe ci-dessus. Aussi, l'augmentation totale des températures durant la période 1900-2006 est

estimée approximativement à 1,47°C avec un réchauffement plus prononcé ces trente dernières années (+ 0,4°C par décennie). Avec par exemple une augmentation de 1,8°C à Neufchâtel (487m), ou 3,5°C au Santsis (2.500 m) sur la période 1901-2000 (ClimChAlp, 2008). A noter que des études menées à haute altitude sur le sommet du Mont-Blanc (4.800m) et sur le Dôme du Gouter (4.300m) montrent une augmentation des températures de la glace de 1°C à 2°C entre 1994 et 2005 (cela sur de grandes profondeurs) avec certes, une influence nulle sur la fonte directe, mais une influence possible sur la stabilité du glacier à long terme<sup>11</sup>.

D'après les simulations, pour la période 2071-2100 se basant sur le scénario A2<sup>12</sup>, les températures estivales dans les Alpes Suisse augmenteront d'environ 4,6 °C. Selon certains modèles climatiques régionaux, les températures de l'été 2003 pourraient être à la norme pour les périodes estivales entre 2071-2100. Enfin selon une étude de 2005 (ClimChAlp, 2008), trois courbes d'évolution ressortent en fonction des scénarios d'émission : ne augmentation de +1°C pour la période de 2020-2049 et une augmentation, sur la période 2070-2099, soit de 2,4°C à 2,8°C pour le scénario A2 soit de 3°C à 3,6°C pour le scénario B2.

Enfin, selon Beniston, « pour la fin du 21ème siècle au niveau planétaire, et pour les Alpes, on assistera vraisemblablement à une augmentation moyenne des températures de l'ordre de 4-5°C, avec des extrêmes de températures estivales pouvant atteindre 6-8°C de plus par rapport à aujourd'hui. [...] Le nombre de jours caniculaires sera multiplié par 5 d'ici 2070-2100» (Beniston, 2009) ». Les hivers seront donc clairement plus chauds et plus courts et les étés plus chauds voir à tendance caniculaire.

## **2.2 Evolution des précipitations**

La compréhension de l'évolution des précipitations, étroitement liée à celle des températures, est importante pour cerner les enjeux touchant les glaciers et plus largement la gestion de l'eau. L'estimation de la variabilité des précipitations ou de la neige, est primordiale pour la gestion du parc hydro-électrique par exemple, ou pour des secteurs de l'économie alpine tels que les sports d'hiver ou l'agriculture. Ce sujet sera abordé par la suite.

Voici un aperçu de quelques données pour l'ensemble des Alpes ainsi que pour les Alpes suisses, même si l'analyse de l'évolution des précipitations dans la chaîne alpine se heurte à plusieurs difficultés, telles l'influence orographique, la localisation des stations de mesure (trop peu nombreuses en outre), la présence de régimes différents entre le nord et le sud, l'est et l'ouest ou encore la

---

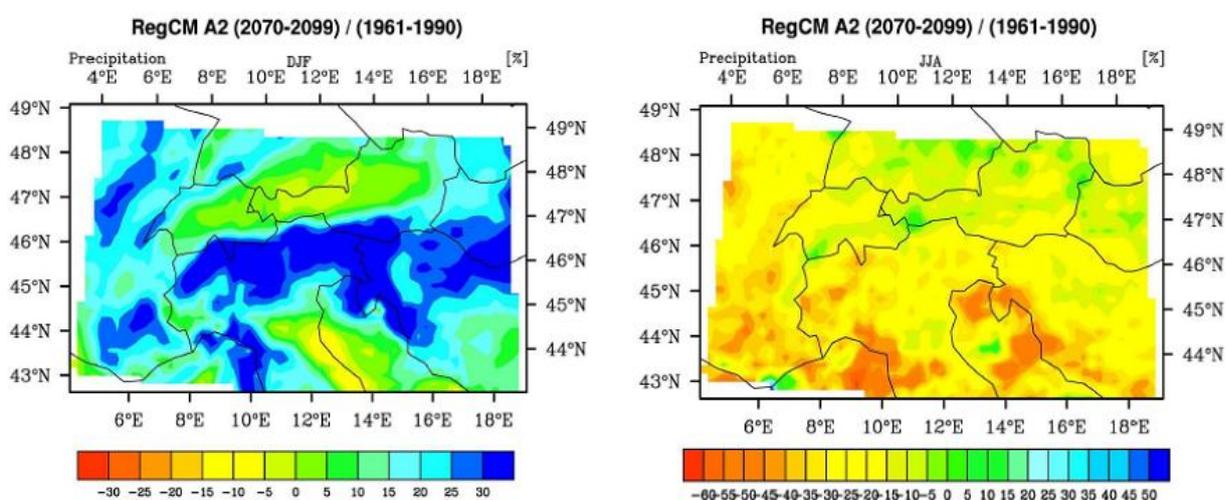
<sup>11</sup> Passage d'un glacier froid à un glacier tempérée par exemple.

<sup>12</sup> Le canevas A2 décrit un monde très hétérogène caractérisé par une forte croissance démographique, un faible développement économique et de lents progrès technologiques.

difficulté d'ajuster des séries de mesures sur des échelles spatiales et temporelles différentes. De ce fait une incertitude importante reste présente.

Globalement l'évolution des précipitations dans l'Arc alpin est peu significative même si l'on note des variabilités interannuelles et inter saisonnières importantes (Casty et Al, 2005), selon ces mêmes auteurs (Casty et al.) sur la période 1500-2003, il n'y a pas d'augmentation ou diminution linéaire des précipitations sur les cinq cent dernières années. Néanmoins, une faible tendance à l'augmentation des précipitations annuelles, surtout due à l'augmentation des précipitations estivales et printanières, est observée. Quant aux chutes de neige, elles diminuent légèrement sous l'effet du réchauffement de l'air (Beniston et al. 2003)

En ce qui concerne les modèles prédictifs via des MCR<sup>13</sup>, ces derniers montrent une augmentation des précipitations moyennes hivernales (dont des périodes de précipitations intenses) et une nette diminution des précipitations moyennes estivales (en partie due à une baisse des journées humides) à l'horizon 2100 (OSCC, 2008). Par ailleurs, les automnes connaîtront aussi une diminution des précipitations mais une augmentation de leur intensité (avec des impacts sur le régime hydrologique) (Etchevers et al., 2002).



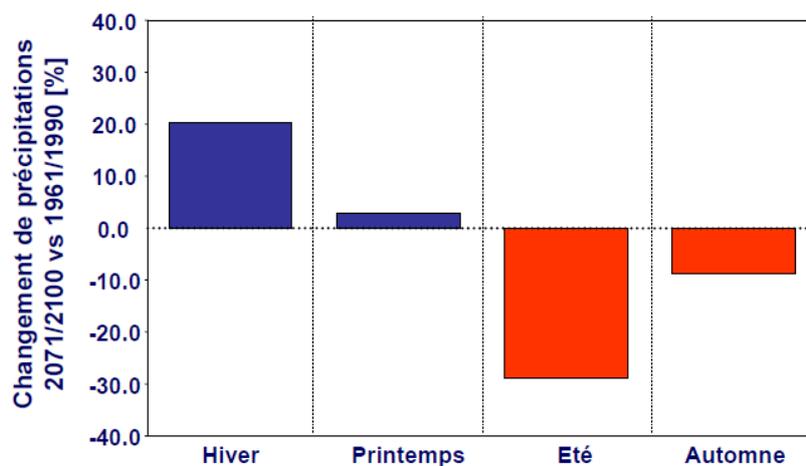
Sources : WP5 ClimChAlp report, chapitre 2

**Figure 8 : Changements simulés (en %) des précipitations moyennes hivernales (gauche) et des précipitations moyennes estivales (droite) entre la période 1960-1991 et la période 2071- 2100 (modèle RegCM, scénario A2) (ONERC, 2008)**

Si l'on regarde à l'échelle des Alpes suisses, le constat est assez semblable même si l'on note une augmentation des précipitations hivernales de 15 à 20% sur la période 1901-1994 ainsi qu'une baisse de 10% des précipitations estivales sur la même période (Guyer et al., 2007). En regardant les données de la station de Santis, située à 2500 mètres d'altitude, aucune variation significative n'est observée.

<sup>13</sup> Modèle(s) climatique(s) régional(aux)

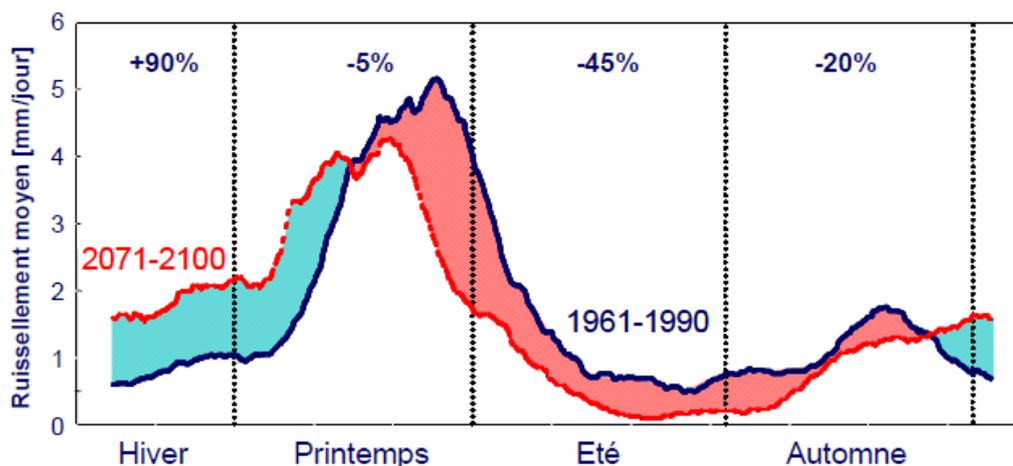
Selon des projections pour 2050, « il faudra s’attendre sur le versant nord des Alpes à une augmentation d’environ 8% des précipitations en hiver (11% sur le versant sud) et à une diminution de 17% en gros en été (19% sur le versant sud). Au printemps et en automne, des augmentations ou diminutions des précipitations sont toutes deux possibles. L’incertitude est particulièrement grande pour l’été. » (ONERC, 2007). D’ici 2100, cette tendance s’accroîtra donc d’autant plus. Enfin, les précipitations moyennes et extrêmes connaîtront un décalage saisonnier avec plus d’événements intenses au printemps et à l’automne et moins durant l’été (ONERC, 2008)



**Graphique 11 : Evolution des précipitations saisonnière à l’horizon 2100 dans les Alpes Suisses (Beniston, 2007)**

En outre les débits des rivières pourront être profondément modifiés en fonction de l’importance et de la nature des précipitations futures. Une diminution des précipitations sous forme solide (neige, grésil) au profit de précipitations pluvieuses en hiver provoquerait un changement important du régime hydrologique<sup>14</sup> des rivières durant l’été (période d’étéage), dans la mesure où ces écoulements sont actuellement tributaires de la fonte de la neige et des glaciers.

<sup>14</sup> « Le régime hydrologique résume l’ensemble des caractéristiques du débit et de ses variations dans le temps. Il est ainsi caractérisé par de plus ou moins grandes amplitudes entre les débits les plus bas (basses eaux ou étiage) et les débits les plus élevés (hautes eaux). Le débit d’étiage d’un cours d’eau alpin est parfois très faible mais peut-être extrêmement élevé en période de hautes eaux (facteur supérieur à 20 pour le régime glaciaire, jusqu’à 39 pour la Massa). Inversement, le débit d’un cours d’eau alimenté par des sources peut être relativement constant durant l’année. » ( Qualité des cours d’eau en Valais, 2007). Deux régimes sont concernés ici ; 1) le régime glaciaire se caractérisant par un taux d’englacement de 15 à 20% du bassin versant et des débits très importants en été, induits par la fonte de la glace. Le pic maximum annuel est très prononcé et intervient en juillet-août. L’étiage quant à lui débute à la fin de l’automne. L’amplitude des variations de débits journalières (en période estivale) et mensuelles est très grande en raison d’un rapport crue/étiage très élevé. 2), le régime nivoglaciaire, caractéristique de la plupart des cours d’eau valaisans présente de hautes eaux en mai-juin-juillet, correspondant à la fonte nivale, suivie de la fonte glaciaire et des variations diurnes élevées pendant la saison chaude. ( Qualité des cours d’eau en Valais, 2007).



**Graphique 12 : Débits saisonniers dans le Rhône proche de sa source pour la période de référence 1961-1990 et pour un climat futur se basant sur une augmentation des températures de 4° (2071-2100). (Beniston, 2007).**

Les ressources en eau seraient donc clairement touchées avec à la clé une modification de la distribution des débits en fonction des saisons et une quantité d'eau disponible dans un bassin versant différente (Langevin et al., 2008) . Ainsi « Malgré le manque de significativité des tendances à l'échelle alpine et le manque de direction générale de l'évolution des précipitations, des fluctuations locales des régimes de précipitations ont été observées. » (OSCC, 2008).

### 2.3 Evolution du couvert neigeux

*« Les diminutions dans la couverture de neige ont été documentées dans plusieurs régions du monde, sur la base de séries temporelles annuelles d'équivalent-eau des neiges de montagne et de l'épaisseur de la neige. La neige de montagne peut être sensible aux petites modifications de température, particulièrement dans des zones climatiques tempérées où la transition de la pluie à la neige est généralement étroitement associée à l'altitude du point de congélation. La diminution de la couverture neigeuse de montagne en Amérique du Nord occidentale et dans les Alpes suisses est plus marquée à faible et chaude élévation.[...]. L'épaisseur de la neige de montagne a aussi baissé dans les Alpes et en Australie du sud-est. » (GIEC 2007)*

La neige est étroitement corrélée aux températures de l'air ainsi qu'à l'ensemble des précipitations, notamment dans le ratio précipitations solides/précipitations liquides. Même si d'autres facteurs tel que le vent ou la végétation sont influents, elle joue un rôle primordial dans les écosystèmes de montagnes (en remplissant des fonctions d'isolant, de réflexion (albédo) ou encore d'alimentation pour les glaciers). Pour un glacier, il peut neiger précocement et en grosse quantité mais ce qui est déterminant, c'est la quantité de neige qui contribue à son alimentation, c'est-à-dire la neige qui passe

la saison estivale pour entamer sa métamorphose en glace et ensuite sa longue course vers la langue glacière. Les neiges estivales sont donc importantes puisqu'elles protègent la glace sombre de la langue glaciaire du rayonnement.

« La hauteur moyenne de neige en hiver varie fortement d'une année à l'autre, selon la température de l'air et les précipitations neigeuses. Elle dépend aussi fortement de la chronologie des événements. Un hiver peut être bien enneigé même s'il neige relativement peu, si la neige tombe en début de saison et que la température de l'air reste ensuite basse toute la saison. » (ONERC, 2008)

Les études de terrain sur la couverture neigeuse dans les Alpes sont assez récentes puisque la plupart datent des années septante. Nous manquons donc de recul, même si des modèles ont reconstitué les tendances depuis les années cinquante.

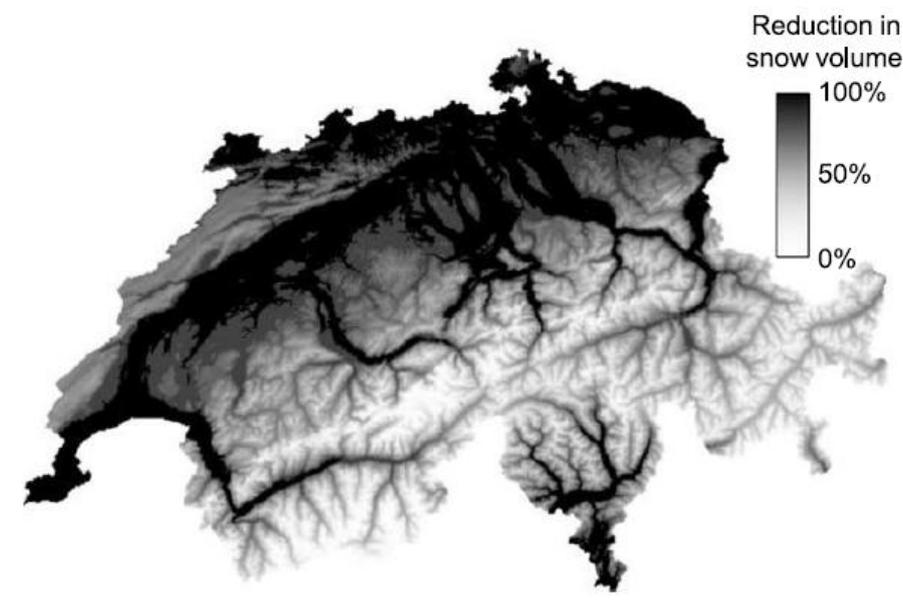
Si l'on regarde la situation dans les Alpes suisses, « depuis le milieu des années 1980 et jusqu'à aujourd'hui, la durée de la saison d'enneigement et la quantité de neige du manteau (basé sur un seuil de 20 cm), ont été réduites de deux à trois semaines dans les Alpes suisses. Ces changements sont dus à des hautes pressions persistantes et inhabituelles au-dessus des Alpes. Ces changements restent dans la fourchette de plus ou moins deux semaines (la durée s'étale entre novembre et mi-mai). La situation aujourd'hui est similaire à celle de la décennie 1930 ». Mais, toutes les études s'accordent sur le fait que les changements les plus prononcés sont détectés au niveau des altitudes les plus basses. Ce résultat est en accord avec l'idée que les tendances des températures sont les plus visibles aux altitudes pour lesquelles un petit changement de température conduit à une augmentation des pluies par rapport aux précipitations sous forme de neige ("snow line"), (Bavay et al. 2009).

Par ailleurs, « au site de moyenne altitude du Château d'Oex (980 m), la profondeur de neige a été réduite de 45 % entre 1960 et 1990. Mais il existe une très forte variabilité interannuelle, par exemple, la durée s'échelonne entre dix jours pour l'hiver 1961-1962 à cent dix jours l'hiver suivant. La saison d'enneigement au Château d'Oex commence plus tard et se finit plus tôt dans les années 1990 que dans les années 1960. A Davos (1590 m), la réduction a été de 12 % entre 1960 et 1990 (avec passage d'une épaisseur de 330 cm à 228 cm). Par contre, ces tendances sont inversées pour le site de haute altitude du Säntis (2500 m), où l'épaisseur du manteau neigeux a augmenté de 35 % (passage d'un manteau de 1590 cm dans les années 1960 à un manteau de 2475 cm dans les années 1990). » (Beniston et al. 2003)

De manière générale on peut dire que depuis le début de la décennie 1970, la durée et la hauteur d'enneigement ont eu tendance à diminuer pour la plupart des sites d'étude, mais que l'on rencontre une importante variabilité annuelle dans l'intensité des chutes de neige.

Selon les modèles, « Une augmentation moyenne de la température de 4°C, prévue par de nombreux RCM pour cette région de l'Europe, réduirait les quantités de neige de 50% dans les Alpes suisses. Pour chaque degré d'augmentation des températures, la limite neige/pluie monterait de 150 mètres; les régions où les chutes de neige sont courantes aujourd'hui auront de plus en plus de précipitations sous forme de pluies. Un réchauffement moyen de 4°C pour la période 2071-2100 (simulations obtenues dans le cadre du projet PRUDENCE<sup>15</sup>) suggèrent que le volume de neige dans les Alpes suisses pourrait être réduit d'au moins 90% à 1.000 mètres d'altitude, de 45 à 60 % à 2.000 mètres et de 30 à 40 % à 3.000 mètres» (ONERC, 2008)

« La durée d'enneigement pourrait également être fortement réduite avec un climat plus chaud, avec une saison d'enneigement qui finit 50 à 60 jours plus tôt à haute altitude (au-dessus de 2000-2500 mètres) et de 110 à 130 jours à des altitudes moyennes (aux alentours de 1.000 mètres). Une réduction de 15 à 20 jours de la saison d'enneigement peut donc être attendue pour chaque degré de réchauffement de la saison hivernale ». (Beniston et al. 2003)

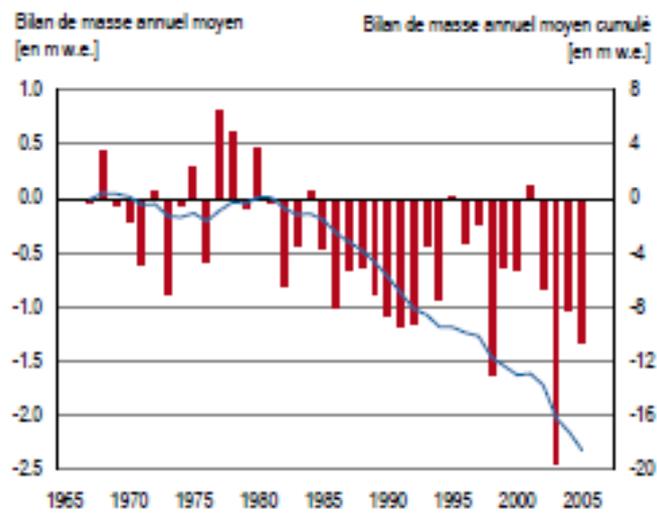


**Figure 9: carte de la Suisse avec les possibles réductions de neige en partant d'une augmentation des températures de 4°C (par rapport à la période 1990-1999) (Beniston et al 2003).**

<sup>15</sup> Le projet PRUDENCE est une initiative européenne avec pour objectif de modéliser l'évolution climatique à l'échelle régionale. Pour de plus amples détails, voir: <http://prudence.dmi.dk/>.

## 2.4 Evolution des bilans de masse au XXème siècle

Si l'on regarde l'évolution moyenne du bilan de masse de neuf glaciers alpins entre 1965 et 2005 on constate que jusqu'en 1980, les variations annuelles « s'équilibrent » quelque peu avec des pertes et des gains compensés d'année en année. Mais depuis le milieu des années 1980, on perçoit nettement une tendance allant dans le sens de pertes continues, qui s'accroissent même. On s'aperçoit donc que les glaciers sont une illustration impressionnante du rapide changement climatique en présence.



**Graphique 13: bilan de masse moyen annuel et cumulé de neuf glacier alpins sur la période 1967 et 2005 : Saint Sorlin (F), Sarennes (F), Silvretta (CH), Gries (CH), Sonnblickkees (A), Vernagfermer (A), Kesselwandfermer (A), Hinterereisfermer (A), et Careser (I). (Haerberli et al., 2007).**

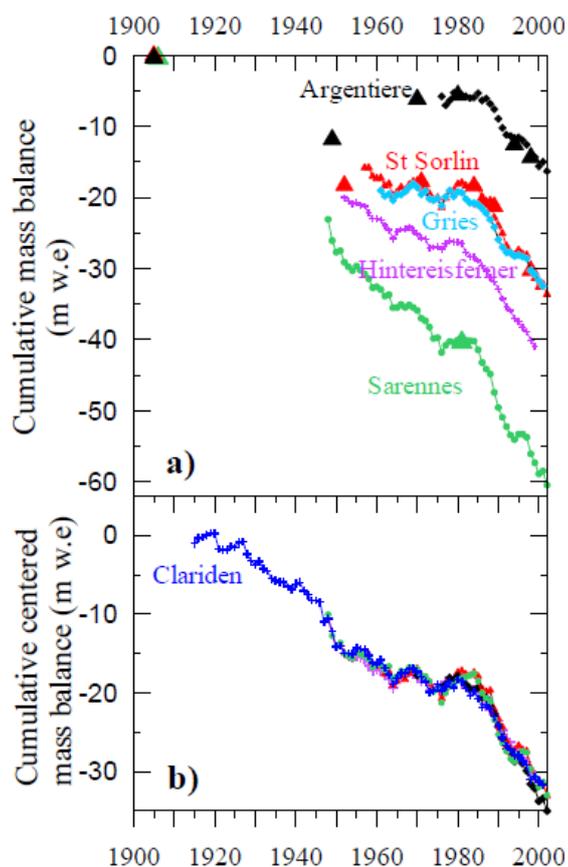
D'après les analyses de Vincent C. (2007), quatre grandes périodes ont été identifiées au cours du 20<sup>ème</sup> siècle : a) du début du 20<sup>ème</sup> au début des années 1940 où les glaciers alpins perdent de la masse ; b) la période 1942-1953 où les glaciers connaissent une forte ablation et de faible précipitations ; c) la période 1954-1981 avec un accroissement des bilans de masse et une avancée parfois importante des fronts de certains glaciers et enfin dernière période, depuis le début des années 1980, où les glaciers des Alpes ont des bilans de basses largement négatifs et cela en corrélation avec l'augmentation des températures.

En moyenne, pour toute la surface des glaciers Alpins, la perte atteint entre 0,5 et 1 mètre d'équivalent eau par an pour la période 1965-2003, avec un pic de fonte de 2,5 mètres en 2003 en raison de la canicule<sup>16</sup>. Si l'on additionne les pertes des différentes années pour la période allant de 1980 à 2005, on obtient une perte cumulée de près de 20 mètres d'équivalent eau. (Changements climatiques en

<sup>16</sup> Ce qui correspondrait à huit fois la moyenne annuelle pour la période 1960-2000 (Hoelzle & al. 2003)

Suisse - Indicateurs des causes, des effets et des mesures, 2007). Entre 2000 et 2005 les pertes de masse annuelles moyennes ont été d'environ 1 mètre e.e.<sup>17</sup> ( Haerberli et al. 2007).

Par ailleurs, si l'on se base sur une série de bilans de masse des Alpes (autrichiennes, suisses et françaises) (Vincent et al., 2004 ) entamée dans les années 1950, dont une série unique de bilans de masse pour le glacier de Clariden commencée en 1914, on constate que les bilans de masses moyens annuels sont variables d'un endroit à l'autre des Alpes tout en gardant des courbes de mesures assez similaires. Pour avoir un aperçu à l'échelle des Alpes, Vincent et son équipe ont, je cite « enlevé la tendance de chacune de ces séries et l'on remplacée par celle de St Sorlin<sup>18</sup> : pour cela, chaque valeur de bilan de masse annuel est diminuée de la valeur moyenne des 50 dernières années et on lui ajoute la valeur moyenne de celle de Saint Sorlin. » (Vincent et al., 2004 ). On obtient alors les courbes reportées sur le graphe ci-dessous. On voit donc bien que les variations des bilans de masse pour les cinquante dernières années sont très semblables pour l'ensemble des Alpes.



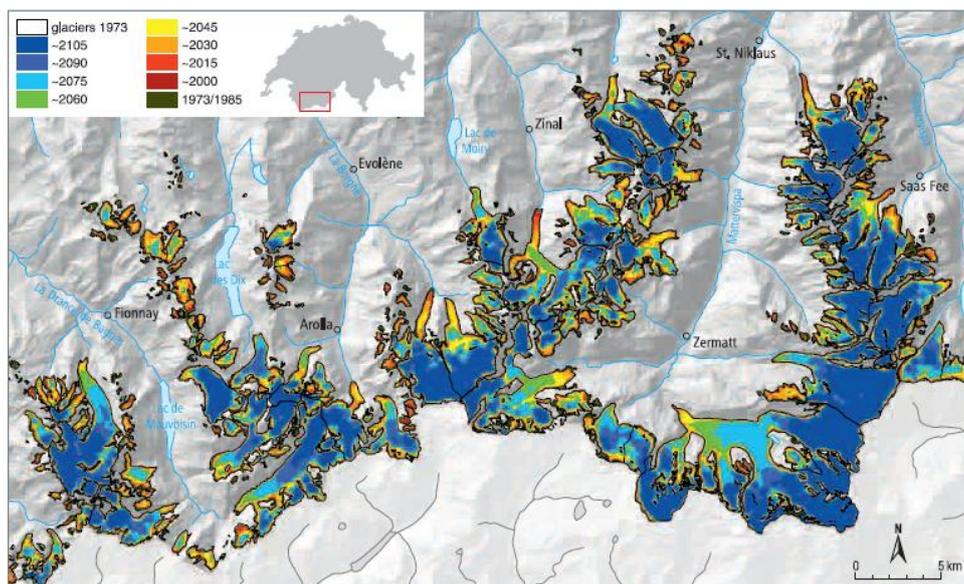
**Graphique 14 : Evolution de 6 glaciers sur l'ensemble des Alpes, a) bilans de masse cumulés des glaciers, b) bilans de masse cumulés centrés et ajustés sur la tendance de St Sorlin ( Vincent et al. 2010).**

<sup>17</sup> E.e.: équivalent eau

<sup>18</sup> En sachant que le glacier de Saint Sorlin a perdu environ 32 m d'eau sur le 20<sup>ème</sup> siècle, cela correspond à l'équivalent d'une lame d'eau de 32 m en moyenne sur l'ensemble de sa surface.

En ce qui concerne les Alpes suisses<sup>19</sup>, elles ont perdu, entre 1973 et 2000, 19 % de leur surface englacée, dont 1 % entre 1973 et 1985 et 18 % entre 1985 et 2000. Ainsi, ce sont les petits glaciers qui sont le plus touchés par le réchauffement. Leur fonte représente 44 % de la perte totale de surface englacée, alors qu'ils ne constituent que 18 % de l'ensemble des glaciers suisses (Unifr, 2009). Pour illustration, la situation de trois glaciers aux morphologies différentes entre 1960 et 2005.

Enfin, selon certains modèles « la remontée en altitude de la ligne d'équilibre des glaciers de 100m correspond à un réchauffement de 0.6-0.7°C. Avec une remontée de la limite des neiges de 100 m (correspondant à l'année 2015 avec le scénario A ou à l'année 2025 avec le scénario C du GIEC), un cinquième des glaciers actuels et un quart des surface des glaciers des Alpes suisses disparaîtraient. Avec un scénario de remontée de 200 m, seulement 847 des 1923 glaciers existants persisteraient. Avec un scénario de remontée de 300 m (période 2060-2130), environ les trois quarts des glaciers d'aujourd'hui disparaîtraient. » (Bade et al. 2000). La tendance sera donc à une disparition des glaciers plus petits, à une évolution des glaciers les plus grands vers des tailles plus réduites avec, comme impact, une diminution de leur inertie face aux changements climatiques et une augmentation de la vitesse de leur fonte (Unifr, 2009).



**Figure 10 : Evolution des surfaces englacées entre 1973 et 2105 pour le Sud du Valais. Il s'agit d'une extrapolation de différentes données issues de mesures glaciaires (mesures radars notamment) par rapport aux modèles climatiques du GIEC ( en partant de l'hypothèse d'un augmentation des température de l'ordre de 1,6°C pour la période 2021-2050 et d'une augmentation de 3,0 à 4,5°C pour la période 2070-2099°C ( par rapport à la période de référence 1980-2009) (SSHL et CHy, 2011).**

<sup>19</sup> Les Alpes suisses et leurs glaciers représentent 1 230 km<sup>2</sup> ce qui correspond quasiment à la moitié de la surface englacée des Alpes, 2 800 km<sup>2</sup>.

## **Chapitre 3 Des glaciers et des Hommes : portrait du Val d'Hérens**

Le Val d'Hérens est un terrain d'analyse intéressant puisqu'il regroupe en son sein beaucoup d'éléments caractéristiques d'une petite vallée alpine. Clairement délimité par une ligne de partage des eaux (bassins versants), avec en tête de vallée un important massif composé de plusieurs glaciers (d'Arolla, des Vignettes, de Cheilon, etc.), la présence du plus haut barrage poids hydroélectrique du monde (Grande Dixence), plusieurs rivières et stations de ski ainsi qu'une importante dynamique de recherche scientifique, font de cette zone un lieu propice pour illustrer la problématique des services écosystémiques liés à l'eau. Ce chapitre a donc, pour objectif, de dresser un portrait de la géographie humaine du Val d'Hérens afin de bien cerner les relations qu'entretiennent les acteurs en présence avec leur milieu naturel. On tentera aussi d'illustrer l'importance que revêt la présence des glaciers et leurs évolutions futures pour les activités de cette zone.

### **3.1 Cadre Physique**

La Suisse est le pays des montagnes par excellence, avec plus de 61% de son territoire (41. 285 km<sup>2</sup>) couvert par la chaîne des Alpes et quarante-huit des quatre-vingt deux sommets de plus de « 4000 ». Quarante-quatre pourcent de la superficie glaciaire de Alpes se trouve en Suisse (dont le plus long glacier d'Europe, celui d'Aletsch) et représente 3% de la surface totale du pays (1.230 km<sup>2</sup>). Le Val d'Hérens se trouve dans le sous-ensemble des Alpes valaisannes au cœur du canton du Valais<sup>20</sup> perpendiculaire à la vallée du Rhône et à la ville de Sion, chef-lieu du canton. Le Val d'Hérens se subdivise à son tour en deux petites vallées, celle d'Arolla et le Vallon de Fèrpeclé, toutes deux caractérisées par de hauts glaciers dans leur partie supérieure.

---

<sup>20</sup> Où l'on trouve le point culminant de la Suisse, la Pointe Dufour à 4634 mètres d'altitude ainsi que le célèbre Cervin

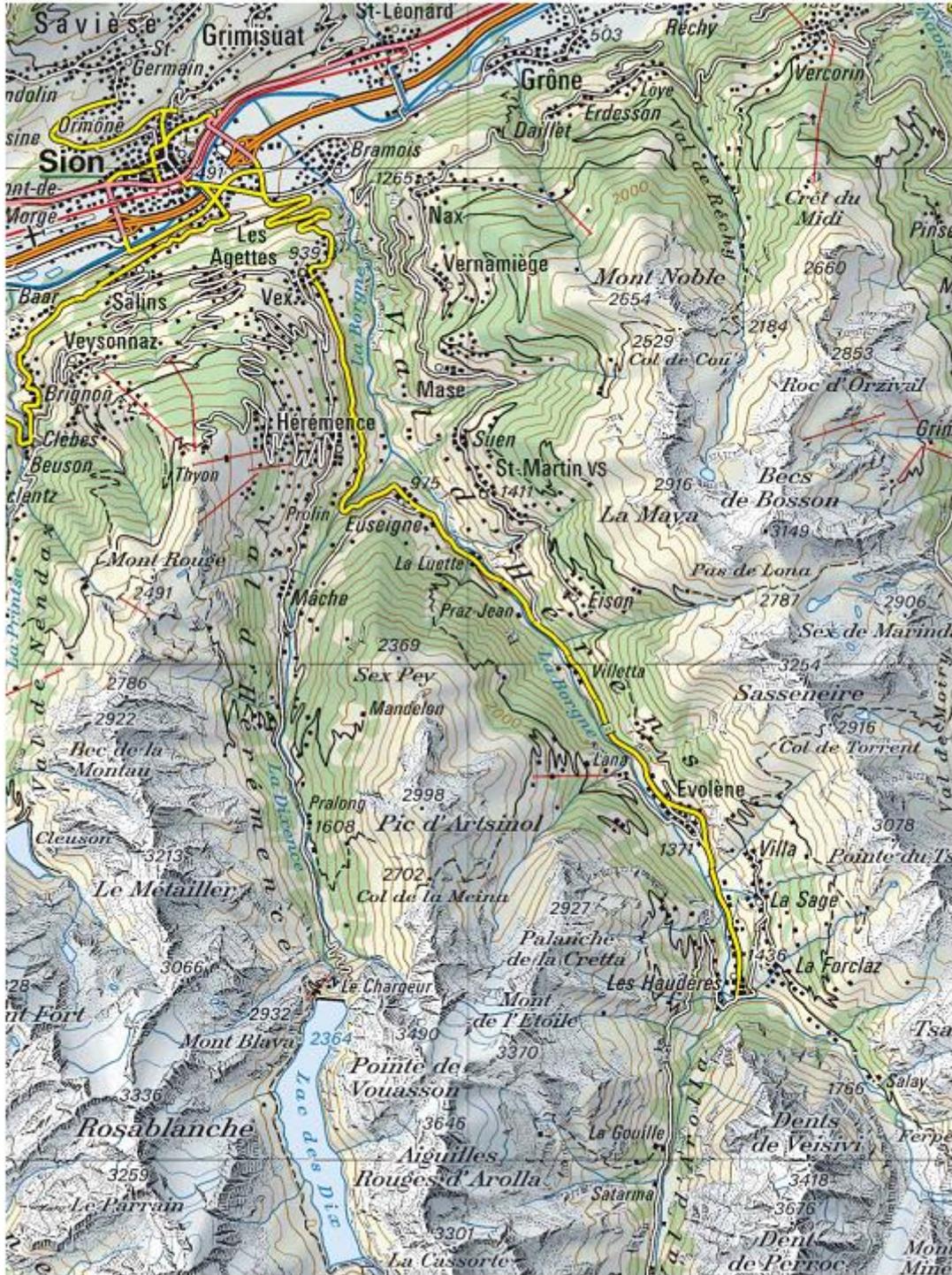


Figure 11 : Carte du Val d'Hérens et du Val d'Héremence ( Swisstopo, 2012).

Le Val d'Hérens est constitué de six communes distinctes, situées sur le territoire du district d'Hérens (ce dernier compte de plus la commune d'Ayent sur la rive droite du Rhône) : Evolène au Sud, en amont du Val d'Hérens (troisième plus grande commune du Valais en superficie avec 20.994 hectares), Vex, Mont-Noble et les Agettes qui se trouvent à l'entrée du Val d'Hérens (au Nord et sur la

rive gauche du Rhône) et Héremence, située à l'Ouest. Enfin, on retrouve la commune de Saint-Martin, coincée entre Mont-Noble et Evolène.



Figure 12 : Carte du District d’Hérens et entouré en rouge, les 6 commune du Val d’Hérens (Canton du Valais, 2010).

### 3.1.1 La présence des glaciers

Les glaciers du Val d’Hérens ont toujours occupé une place importante dans la vie de ses habitants, que ce soit pour les effets sur les infrastructures (avalanches, crues glaciaires, etc.) ou encore pour l’industrie hydroélectrique. L’une des grandes richesses de cette zone, est la présence d’une large gamme de glaciers à des altitudes et des expositions différentes<sup>21</sup>. Parsemé de sommets, dont le plus élevé est la Dent Blanche (4357 mètres), on retrouve des glaciers de calotte comme celui du mont Collon (glaciers non contraints par la topographie et qui s’écoulent dans plusieurs directions différentes), des glaciers de cirque ou encore des glaciers de transsection (qui occupent un col et s’écoulent dans deux ou plusieurs vallées). En plus de cela, on dénombre une série importante de névés permanents (certainement amenés eux aussi à disparaître), de glaciers couverts, ou encore des glaciers

<sup>21</sup> 16,6% de la superficie du Val d’Hérens et d’Héremence soit 64,4 km<sup>2</sup> est couvert par des glaciers. «Qualité des cours d’eau en Valais, 2007 »

rocheux<sup>22</sup> (même si l'on se trouve ici dans le domaine du périglaciaire). Si l'on y regarde de plus près, trois ensembles glaciaires ressortent dans le haut du Val d'Hérens. D'une part, l'ensemble glacier de Férpècle et glacier du Mont-Minée, et d'autre part l'ensemble Glacier du Mont-Collon, Haut glacier d'Arolla et Bas glacier d'Arolla. Enfin, on distingue un troisième ensemble, plus petit, qui reprend le glacier de Tsijore Nouve et le glacier de Pièce.

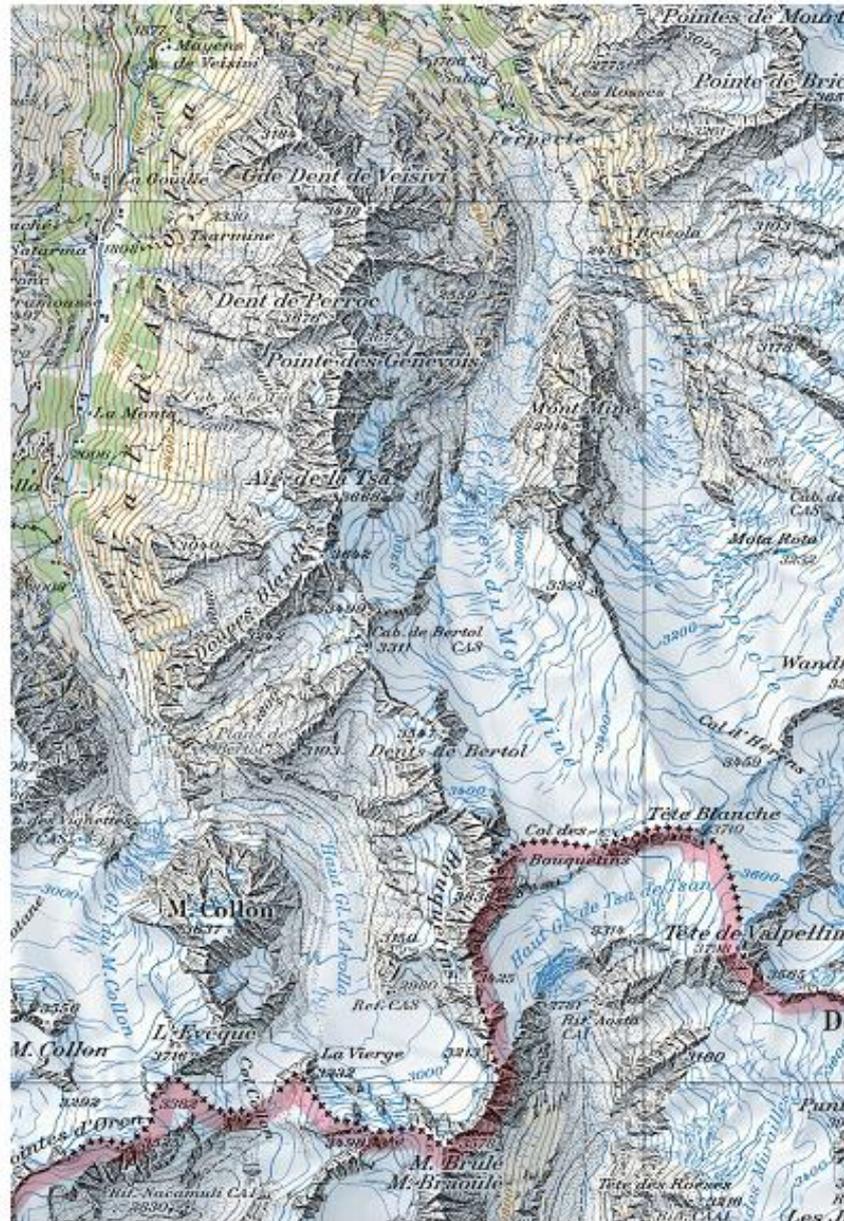
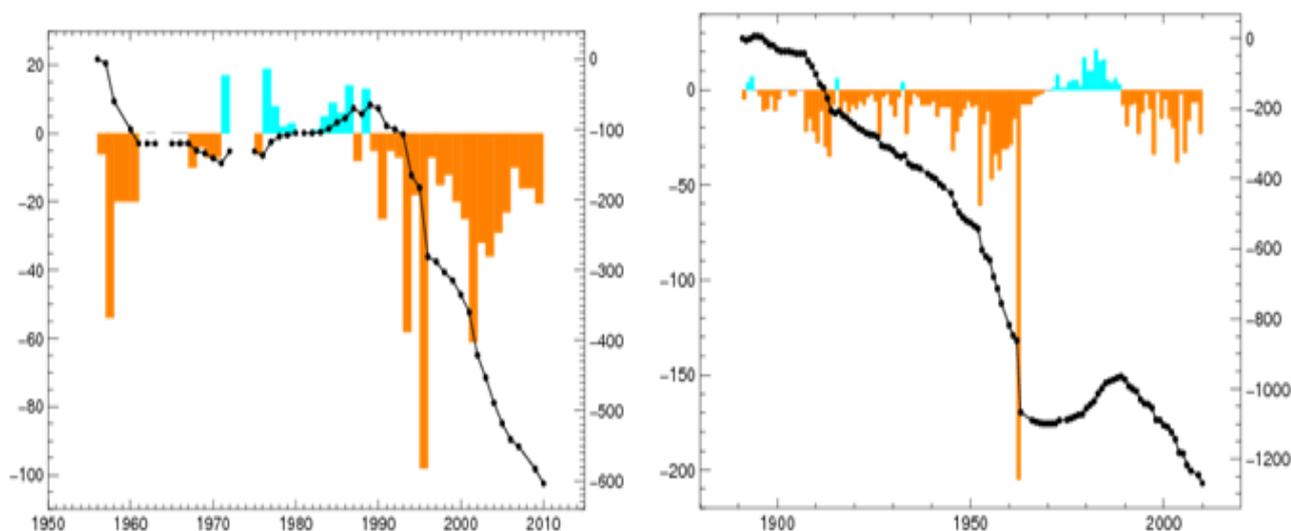


Figure 13: Carte des deux grands ensemble glaciaire (Glacier du Mont-Collon, Haut glacier d'Arolla, Bas glacier d'Arolla, en bas à gauche, et glacier de Férpècle, glacier du Mont-Minée, au centre de l'image à gauche) (Swisstopo, 2012).

<sup>22</sup> « Les glaciers rocheux sont l'expression visible, dans des matériaux non-consolidés, de la déformation lente et continue (*steady-state creep*) d'un corps de pergélisol sursaturé en glace » (Lambiel, 2011).

Si l'on regarde de plus près le premier ensemble glaciaire, orienté Sud-Nord, on constate que la zone d'accumulation est commune aux deux glaciers, chacun d'eux étant alimenté approximativement par la moitié de cette zone (même si le glacier du Mont-Miné est mieux protégé de la fusion grâce à son orientation favorable) avant de se séparer en deux branches<sup>23</sup>. La zone d'accumulation est délimitée à l'Est par l'arrête sud de la Dent Blanche, au Sud par la Tête Blanche et à l'Ouest par l'arrête des Bouquetins. A retrouve donc à l'Est le glacier de Ferpècle et à l'Ouest le Glacier du Mont-Miné. Ces deux glaciers sont séparés par le Mont-Miné, imposant massif rocheux de trois kilomètres de long. Selon un inventaire réalisé en 1973 (VWHG, 2010), la surface glaciaire s'étendait sur 20,74 km<sup>2</sup> et leur longueur respective était de 6,6 kms pour le glacier de Ferpècle (avec une surface de 9,77 km<sup>2</sup>) et de 8,35 kms pour celui du Mont Miné (avec une surface de 10,97 km<sup>2</sup>). Entre 1956 et 2010, les glaciers du Mont-Miné et de Ferpècle ont perdu respectivement 604 et 555 mètres.

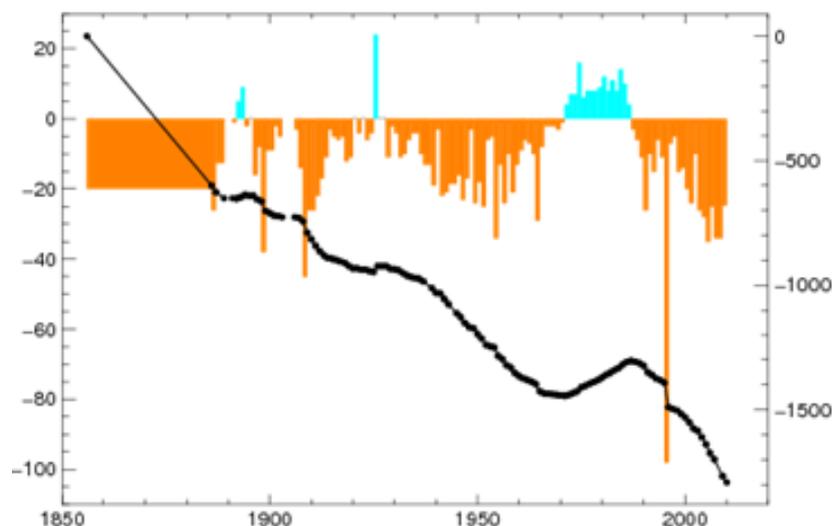


**Graphique 15: Variation de longueur du glacier du Mont Miné (à gauche) et du glacier de Ferpècle (à droite). Les bâtonnets représentent les variations annuelles, et la courbe noire la variation de longueur cumulée. (VWHG, 2010).**

Le second ensemble, orienté aussi Sud-Nord, est lui bien délimité par deux zones d'accumulation distinctes, séparées au milieu par le Mont-Collon. Le glacier du Mont Collon (appelé bas glacier d'Arolla dans sa partie aval, après la chute de séracs) et sa zone d'accumulation sont délimités à l'Ouest par le Col de Charmotane et le Pigne d'Arolla, au Nord par les pointes d'Oren et à l'Est par l'Evêque et le Mont Collon. Le glacier Haut glacier d'Arolla est quant à lui, délimité à l'Ouest par le Mont Collon et le Col Collon, au Nord par le Mont Brulé et à l'Ouest par l'arrête des Bouquetins. En 1973, le glacier du Mont Collon avait une longueur de 4,80 km pour une surface de 13.17 km<sup>2</sup>. Entre 1956 et 2010, il a perdu 471 mètres de longueur dont 359 sur la seule période qui va de 1973 à 2010.

<sup>23</sup> De la fin du PAG aux années 1950, les deux glaciers étaient coalescents pour former une langue glaciaire commune.

Sur l'ensemble des mesures faites, entre 1856 et 2010, il a perdu 1792 mètres. Pour le Haut glacier d'Arolla, sa longueur est de 4 km et sa surface de 4,4 km<sup>2</sup> (Burlando et al. 2008). Entre 1890 et 1998 son retrait serait supérieur à 1000 mètres (Oerlemans et al, 1998), valeur largement dépassée au cours de ces dix dernières années qui ont été parmi les plus chaudes enregistrées.



**Graphique 16 : Variation de longueur du glacier du Mont Collon entre 1890 et 2010. Les bâtonnets représentent les variations annuelles et la courbe noire, la variation de longueur cumulée (VWHG, 2010).**

### 3.1.2 Hydrologie

Pour ce qui est de l'hydrologie, un ensemble territorial homogène se dessine et correspond à la délimitation du bassin versant de la Borgne (388 km<sup>2</sup>, Val d'Hérens) et de la Dixence (Val d'Héremence), les deux principales rivières qui nous intéressent. La Borgne, qui se décompose en amont en deux bras, la Borgne d'Arolla (10,5 kms) qui prend sa source au pied du glacier du même nom et celle de Ferpècle (6,3 kms) qui prend sa source dans la Vallée de Ferpècle au pied du glacier du Mont-Miné et du glacier de Ferpècle. Ces deux torrents se rejoignent aux Haudières pour former la Borgne d'Hérens (21,5kms). La Dixence quant à elle (12,1 kms), prend naissance au pied du barrage de la Grande Dixence et rejoint la Borgne d'Hérens à Cambioula. Le point de confluence avec le Rhône se trouve à Bramois juste en amont de Sion. Leur régime hydrique, plus largement abordé dans les chapitres suivants, sont de type glaciaire jusqu'à la jonction des deux rivières à glacio-nivale en aval de la jonction (Canton du Valais, 2007).

Comme l'illustre la carte ci-dessous, les cours d'eau du Val d'Hérens sont relativement fort sollicités: plus de vingt et un captages pour l'hydroélectricité (voir chapitre 5), de nombreuses prises d'eau

potable à proximité des cours d'eau principaux et secondaires et des captages pour l'irrigation (sous forme d'anciens bisses<sup>24</sup>).

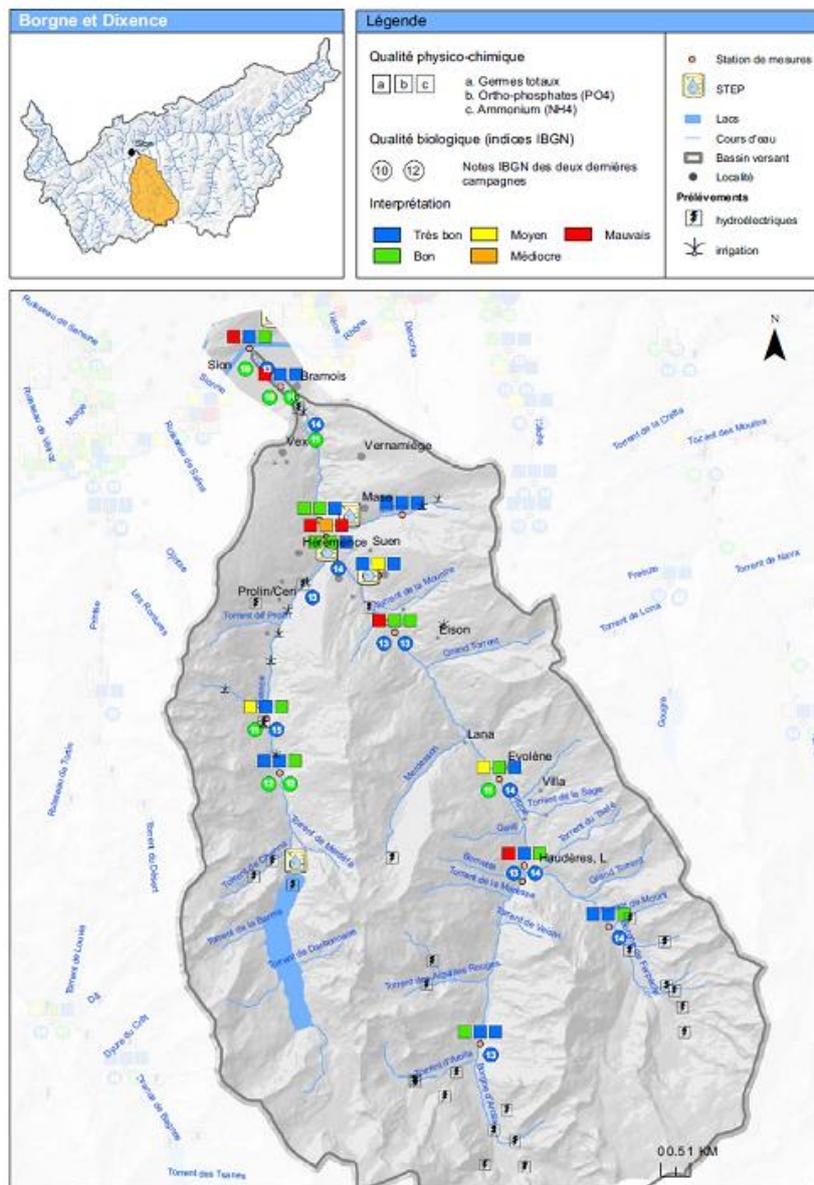


Figure 14 : Carte du bassin versant de la Dixence et de la Borgne (Canton du Valais, 2007)

<sup>24</sup> Les bisses font partie intégrante du patrimoine historiques et paysagé valaisan depuis le XIVE siècle, ils sont le témoin de la vie sociale et économique du Valais (par ailleurs région la plus sèche de Suisse avec 600 mm de pluie par an dans la plaine du Rhône). Ils étaient destinés à assurer l'irrigation des prairies et cultures afin d'obtenir les fourrages nécessaire à l'élevage des bovins. Certains de ces ouvrages, construits comme des défis à la pesanteur, ont été taillés à flanc de falaises, enjambant les obstacles les uns après les autres. Aujourd'hui la plupart ont disparu faute d'entretien. Au début du siècle dernier on dénombrait encore plus de 200 bisses sur l'ensemble du Valais sur une distance équivalente à 1800 kilomètres alors qu'aujourd'hui, la longueur du réseau principal de bisses s'élèverait à environ 650 km (Annexe 1)

### 3.1.3 Hydrologie et gestion de l'eau potable

Les compétences en matière d'eau potable se répartissent entre les trois grandes entités administratives de la Suisse. La Confédération gère les aspects législatifs liés à la qualité de l'eau. Les Cantons qui disposent de la ressource, sont chargés de dresser un inventaire des installations d'approvisionnement et des ressources souterraines sur leur territoire. Enfin, ce sont généralement les communes qui disposent de la compétence d'approvisionnement et de gestion de leur réseau d'eau potable, même si elles peuvent la confier à un tiers (ce qui est le cas pour les communes du Val d'Hérens) (Reynard, 2000).

En Valais, l'eau de distribution provient en grande majorité d'eau souterraine généralement facilement exploitable, de bonne qualité et souvent utilisable sans traitement<sup>25</sup> (40% de sources et 50% via puits de captage dans l'aquifère). Son coût est donc relativement bas par rapport au reste de la Suisse<sup>26</sup>. Autour des zones de captage, le Canton du Valais impose des restrictions quant à l'utilisation du sol (travaux, bâtis, etc.) (Canton du Valais, 2006). Pour le Val d'Hérens, l'approvisionnement en eau potable des habitants s'effectue via des prises d'eau directement aux sources et dans une moindre mesure par captage dans la nappe phréatique. Les prises d'eau peuvent être publiques ou privées mais doivent toutes deux répondre à des critères sanitaires stricts (OFSP, 2010).

Afin d'éviter toute pollution ou contamination, des zones de protection des eaux souterraines ont été délimitées tant au niveau des secteurs (*secteur A<sub>u</sub>*<sup>27</sup> *de protection des eaux souterraines, « s'étend à l'ensemble des eaux souterraines potentiellement exploitables pour l'approvisionnement en eau potable et englobe les zones attenantes nécessaires à leur protection »* (Canton du Valais, 2010)) que des captages (*zones S1 (Zone de captage ; « Aucune installation ou activité n'est autorisée, à l'exception des travaux de construction et les activités servant à l'approvisionnement en eau potable. Cette zone doit être clôturée », zone S2 (« Zone de protection rapprochée ; la construction d'ouvrages et d'installations est interdite. Les installations existantes comportant un risque pour les eaux souterraines doivent être assainies voire démantelées ») et la zone S3 (« Zone de protection éloignée ; tout nouveau projet comportant un risque pour les eaux souterraines doit être évalué et ne peut être autorisé que sur la base des conclusions du rapport hydrogéologique. Les installations existantes comportant un risque pour les eaux souterraines devront être assainies »* - Canton du Valais, 2010). A

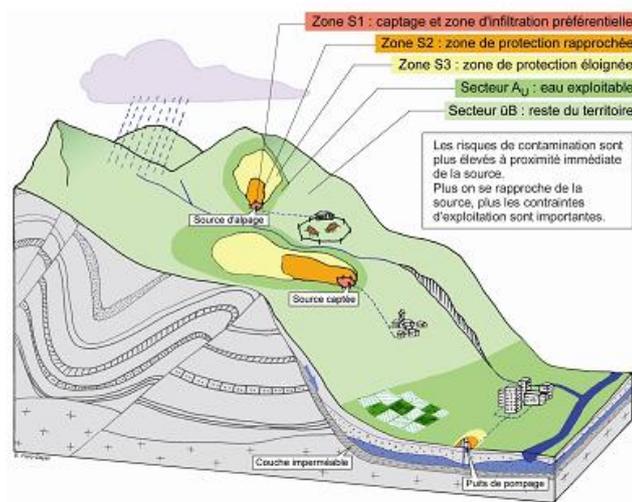
---

<sup>25</sup> Plus de 3000 sources sont captées et utilisées en Valais pour l'approvisionnement en eau potable (Canton du Valais, 2010)

<sup>26</sup> Le prix moyen du m<sup>3</sup> d'eau en Valais s'élève à 0,61 CHF soit largement en dessous de la moyenne suisse (1.22 CHF) et de la moyenne de Suisse Romande (1.60CHF) (D'Urso, 2006).

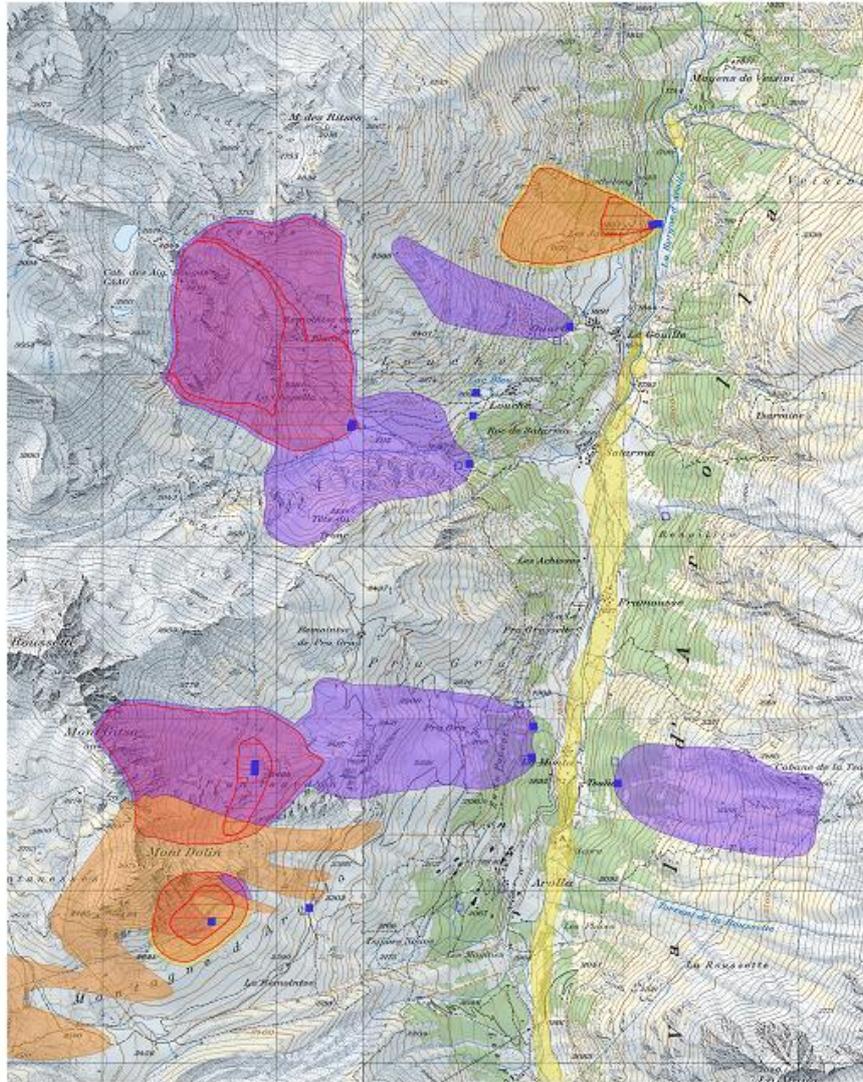
<sup>27</sup> « La délimitation du secteur A<sub>u</sub> de protection des eaux souterraines est réalisée par le SPE sur la base des informations hydrogéologiques disponibles. Les secteurs de protection des captages d'eau potable sont délimités par les communes puis, après leur mise à l'enquête publique, homologués par le canton. » (Canton du Valais, 2010)

l'intérieur même de ces secteurs et zones, l'utilisation du sol est réglementée. (Canton du Valais, 2010)



**Figure 15: Illustration reprenant les différentes zones et secteurs de protection autour des captages d'eau potable souterraine. (Canton du Valais, 2010)**

La grande majorité des captages d'eau du Val d'Hérens proviennent de sources (carrés bleus sur la carte, ici pour la régions d'Arolla) dont l'alimentation est déterminée par les paramètres morphologiques de l'aquifère (poreux-roche karstique, en orange sur la carte), fissuré (roches silicatées, en mauve) et meuble (zone d'alluvions fluviales, très perméable, en jaune) et l'interconnexion des vides au sein du sous-sol (CREALP, 2012). Les zones de captages ont distinctement été définies par les communes et approuvées ou non après enquête publique par le canton du Valais ( S1 en rouge hachuré et S2 zones entourées de rouge). On retrouvera en annexe un carte complète du Val d'Hérens avec l'ensemble des périmètres protégés (Annexe 2) .



**Figure 16 : Carte reprenant les différentes zone et secteur de captage d'eau pour la région d'Arolla (Swisstopo, 2012).**

La météorologie, les phénomènes climatiques ou encore l'hydro-géologie jouent un rôle déterminant sur le niveau des eaux souterraines et l'alimentation des sources. La variabilité du niveau d'une nappe souterraine est donc très semblable à celle d'un cours d'eau, sauf que l'on ne parle plus de débit mais de niveau (OFEFP, 2004). L'approvisionnement des sources et des nappes aquifères dans le Val d'Hérens est donc principalement de type nivo-glaciaire, nival et nivo-pluvial (voir chapitre 5). L'analyse des différentes zones d'approvisionnement est dès lors fortement dépendante des précipitations solides et liquides. La composante glaciaire est néanmoins importante dans le débit de la Borgne et de la Dixence, et peut influencer les deux prises d'eau (Bagnoud et al. 2006).

Il est certain que la modification des conditions climatiques aura des répercussions sur la quantité et la qualité et appellera les autorités publiques du Val d'Hérens à réfléchir à des mesures d'adaptation à

long terme. Dans la mesure où la fonte glaciaire n'intervient pas directement dans la problématique de l'eau potable, cette thématique ne sera pas abordée plus longuement dans ce mémoire.

## **3.2 Cadre humain**

L'occupation du Val d'Hérens est largement antérieure à notre ère et s'inscrit dans un processus plus large de peuplements des vallées alpines entamés il y a plus de 30.000 ans, et marqué par de grands épisodes de l'histoire comme la glaciation du Würm. Sans refaire l'histoire du Valais et du Val d'Hérens, soulignons que la centralité du canton en a fait un endroit de rencontre très recherché. Lieu de passage quasi obligé entre la France et l'Italie, il devient un canton à part entière au sein de la confédération Suisse, en 1815. Ses sept communes ont connu et pris des directions différentes dans leur développement respectif. La commune d'Evolène et son village d'Arolla (lieu de départ pour de nombreuses randonnées alpines) connaissent un tourisme ancien et faiblement intensif (Debardieux et al. 2008). A l'opposé, la commune des Agettes et la station de Thyon, se sont très vite tournées vers l'industrie du ski de masse (domaine des Quatre vallées). Quant à Saint-Martin, elle a réussi à saisir les potentialités offertes par le tourisme durable.

### **3.2.1 Agriculture**

Le Val d'Hérens a depuis toujours été marqué par une économie axée sur l'agriculture montagnarde, en grande partie dépendante des aléas naturels. Suite à l'exode rural des années cinquante et soixante et une diminution de l'agriculture traditionnelle, on a toutefois vu se développer une industrie touristique « douce » à partir des années soixante.

Aujourd'hui, l'agriculture dans le Val d'Hérens est composée aux trois quarts d'exploitations bovines destinées pour la plupart à la production de lait et au combat de reines<sup>28</sup> (Mieville-Ott et al. 2010), le solde se consacrant à la production bovine et ovine pour la viande. Plus de 70 % des agriculteurs du Val d'Hérens ont un second emploi hors secteur agricole afin d'avoir des revenus suffisants. Depuis 1996, la surface et le nombre d'exploitations familiales diminuent. Ainsi, depuis 2006, le Val d'Hérens a perdu plus de 10% de sa surface agricole utile, avec comme effet une déprise agricole<sup>29</sup> et une extension de la forêt (Le Temps, 2011). Pour faire ressortir leur spécificité agricole, les communes du Val d'Hérens ont investi dans l'économie agropastorale, en se basant sur des spécialités locales

---

<sup>28</sup> L'une de ses particularités est son aptitude combative donnant lieu à l'organisation de matchs de reines très prisés par la population valaisanne et, de plus en plus, par le reste de la population suisse. Il n'y a pas de paris sur les matchs mais des revenus peuvent être tirés de la vente de la descendance des vaches titrées.

<sup>29</sup> Il s'agit d'une diminution ou d'un abandon de l'activité agricole, en l'occurrence ici des prairies alpines ou pâtures. Généralement elles sont (re)colonisées par des espèces pionnières tel le bouleau, le peuplier et les mélèzes.

comme la viande d'Hérens (variété « Hérens » et sous label « Viande d'Hérens »), et sur la rénovation du bâti agricole traditionnel (Debardieux et al, 2008).

Pour maintenir les populations dans les zones de montagne et promouvoir leur développement, il faut offrir aux habitants les possibilités de développer une activité et de trouver un emploi. L'agriculture à elle seule ne peut donc apporter une réponse suffisante. Il est alors important d'avoir un tissu économique diversifié au sein duquel une agriculture de montagne de qualité et à haute valeur environnementale a toute sa place (Canton du Valais, 2004). Il est donc souhaitable pour le Val d'Hérens, de mettre l'accent sur une agriculture de qualité et sur une production agricole durable et respectueuse de l'environnement (filère courte de production laitière notamment).

### **3.2.2 Industrie**

En dehors de l'agriculture, le Val d'Hérens n'abrite que quelques entreprises actives dans le bâtiment ou les travaux publics et une gravière. Il en allait tout autrement dans les années cinquante avec la construction, à partir de 1951, du Barrage de la Grande Dixence dans le Val de Dix. Ce gigantesque chantier transformera définitivement le paysage économique de la région. Usine à béton, gravière, construction de logements, feront vivre la région durant près de dix ans. Dans un contexte de déclin agricole, ce chantier permettra aux paysans de retrouver de l'emploi en tant qu'ouvrier. Ces emplois ne seront toutefois pas durables puisqu'en 1961 le chantier se termine et le déclin de l'agriculture s'accroît sans qu'il y ait création suffisante d'emplois dans les autres secteurs (Mayoraz, 2003). L'industrie touristique viendra redynamiser la région, tout en contribuant à sa reprise démographique.

### **3.2.3 Tourisme et sports d'hiver**

Le tourisme représente l'élément essentiel dans l'économie du Val d'Hérens, particulièrement pour les communes possédant des installations de ski (notamment Evolène<sup>30</sup>, Arolla et Mont Noble). D'une prédominance de l'agriculture et d'un style de vie rythmé par les saisons, le Val d'Hérens s'ouvre, à partir du XIX<sup>ème</sup> siècle, au tourisme en même temps que la construction d'un accès « routier » réalisé en 1861. Ce tourisme de première génération (Reynard, 2011), complémentaire à l'agriculture qui se concentre sur Evolène et Arolla, rencontre un vif succès chez les riches anglais soucieux de venir profiter du soleil et de l'air montagnard dans de confortables hôtels. C'est durant cette période, que l'alpinisme se développe surtout à Arolla, à la demande des anglais puis des allemands, avides de

---

<sup>30</sup> A noter que depuis la création de la station de ski d'Evolène et de sa société de gestion Télé-Evolène, elle n'a cessé d'être en déficit financier à tel point que son avenir à plusieurs fois été remis en question.

gravir de nouveaux sommets (Pigne d'Arolla, Mont Collon, ou encore la Dent Blanche dans le Val d'Hérens).

Arolla, en tant que station pionnière, réussira rapidement à concilier tourisme hivernal (ski, ski de randonnée..) et tourisme estival (randonnées, alpinisme, halte sur la Haute route Chamonix-Zermatt),... en développant à bon escient son secteur immobilier (sans surcapacité et en petites structures) tout en misant sur un tourisme doux et respectueux de la montagne (paysage, environnement, etc.). Tout en souhaitant conserver un cadre de vie unique, Arolla et ses habitants ont pu développer harmonieusement la pratique du ski, aidé il est vrai, par une configuration géographique peu propice aux grands projets et aux lourdes infrastructures et à une altitude intéressante permettant un enneigement de qualité<sup>31</sup>. Sur les hauteurs d'Evolène, la Forclaz et la Sage connaissent elles aussi, un développement touristique un peu différent qui tourne le dos au tourisme de masse, limité en cela par des lieux peu propice à la pratique du ski et par une volonté des habitants de conserver leur cadre de vie (Mayoraz, 2003).

La commune de Mont-Noble, possède elle aussi une petite station de sport d'hiver, Télé Mont-Noble. Avec par le passé une économie essentiellement tournée vers l'agriculture de montagne, elle vit aujourd'hui en partie des sports d'hiver et du tourisme agro-pastoral (promotion des paysages, des produits des terroirs etc.).

Saint-Martin ratera le tournant du tourisme hivernal à cause d'une proximité trop grande avec les deux stations voisines (Télé-Mont-Noble et Télé-Evolène). La présence d'un domaine skiable qui ne présente pas une rentabilité suffisante, décidera les autorités communales en 1989, d'axer leur stratégie touristique sur un développement rural ainsi que sur la valorisation du patrimoine local. Elle laissera de côté le lancement de grands projets touristiques pour s'orienter vers un tourisme « durable » axé sur la mise en valeur de son patrimoine naturel et culturel. Ainsi, elle fera partie des premières communes à adhérer au réseau « Alliance dans les Alpes », qui réunit depuis 1997 plus de 300 communes de sept pays de l'arc alpin ce qui lui permettra par ailleurs, de bénéficier d'intéressantes subventions publiques<sup>32</sup>. Les communes d'Hérérences, des Agettes et Vex uniront leur destin touristique hivernal

---

<sup>31</sup> A la fin des années 1950, germe l'idée de créer une infrastructure de sport d'hiver digne de son nom, à même de redynamiser la vallée. M Tissière guide de haute montagne disait ceci : « seule l'introduction d'un tourisme industrialisé peut sauver nos vallées, et particulièrement le Val d'Hérens, d'un dépeuplement qui amènerait sa mort à brève échéance. ». L'objectif principal était ni plus ni moins de construire un téléphérique reliant Arolla au sommet du Pigne d'Arolla à 3796m. Ce projet sera abandonné faute de financement et de refus de la part des autorités fédérales (OFEV) suisses. A noter qu'aujourd'hui, la station de ski d'Arolla est détenue à 50% par ses habitants.

<sup>32</sup> « Ces communes membres du réseau se sont associées dans le but de mettre concrètement en application la Convention alpine afin d'installer un développement durable dans l'espace alpin. Pour cela les membres du réseau travaillent en étroite collaboration avec les citoyens afin d'améliorer la situation écologique, sociale et économique de leurs communes. Pour ce faire les communes échangent entre elles leurs expériences et leurs

au grand domaine skiable de Thyon Quatre Vallées (Verbier) tout en misant sur un tourisme estival axé aussi sur la valorisation des patrimoines naturels et locaux. La commune d'Héremence, située en grande partie dans le Val d'Héremence tire un important profit touristique du Barrage de la Grande Dixence (plus de 100.000 touristes par an) (Dayer, 2009).

En terme d'emploi, bon nombre de postes de travail permettent de faire l'appoint en période hivernale face à une diminution des charges de travail dans les structures agricoles. On notera que l'exploitation de remontées mécaniques bénéficie à l'ensemble de l'économie locale en tant que pôle attractif. Dépendant en partie du tourisme d'hiver, les commerces, logements, hôtels, artisans ou encore services aux personnes (moniteurs de ski, guide, etc.) ne pourraient vraisemblablement pas survivre en dehors de lui. Pour la commune d'Evolène plus de 40% de leur chiffre d'affaire serait réalisé durant la période hivernale (Mayoraz, 2003).

### **3.2.4 Gestion de l'enneigement artificiel**

Lors de l'apparition des premiers canons à neige dans les années soixante, la neige artificielle ou de culture, servait à pallier l'imprévisibilité des chutes de neige alors qu'aujourd'hui, la situation est le plus souvent inversée (Badre et al., 2009). A l'échelle de la Suisse les stations de ski sont passées d'enneigement artificiel de 6% en 1996 à près de 35% de leur domaine skiable pour l'hiver 2009-2010 (Remontée Mécanique Suisse, 2011), loin derrière l'Autriche (54%) et l'Italie (68%) ou l'utilisation de ce type d'infrastructure est quasi généralisée.

Le canton du Valais et le Val d'Hérens, plus particulièrement, ont toutefois adopté une politique différente à cet égard dans la mesure où l'utilisation d'enneigeurs artificiels est bien encadrée voire limitée. En Valais, l'enneigement artificiel n'est autorisé qu'en période hivernale normale, il doit être « rationnel », ne peut avoir lieu qu'à des endroits où la topographie est favorable, et à une altitude supérieure à 1500 mètres d'altitude (sauf si les conditions locales le justifient) » (Dupont et al., 2007). Par ailleurs, la fiche de Coordination (D10) incite à « l'utilisation de canons à neige amovibles et respectant les normes de protection contre le bruit ». Les « installations d'enneigement techniques doivent respecter les intérêts de l'environnement (protection des eaux, des paysages et des biotopes, respecter les débits minimaux, etc.) ». Enfin, « l'enneigement d'une surface qui dépassent cinq hectares doit, en plus, faire l'objet d'une étude d'impact sur l'environnement conformément à l'Ordonnance relative à l'étude de l'impact sur l'environnement. » (Canton du Valais, 2001).

---

savoir-faire. Cela tient à des rencontres régulières, des conférences, des congrès ainsi que des excursions. » (CIPRA, 2012)

Dans le Val d'Hérens, Arolla dispose de trois canons à neige pour environ deux kilomètres de pistes, Evolène cinq canons pour 42 kilomètres de pistes et Télé Mont-Noble 2 canons pour 30 kilomètres de pistes). Des contacts pris avec trois opérateurs, il ressort qu'aucune des stations de ski n'utilise (ou à utilisé) les canons à neige comme unique source d'enneigement mais toujours bien en appoint à un enneigement naturel et de façon raisonnée. Par ailleurs, les dates d'ouverture et de fermeture des stations ont toujours été conditionnées à un enneigement naturel suffisant. Il n'a jamais été question d'avancer ou de prolonger la saison de sports d'hiver de façon importante (plusieurs semaines).

L'utilisation de neige artificielle dans le Val d'Hérens est donc limitée, au regard d'autres stations voisines tel que Verbier (195 kilomètres de pistes et 114 canons à neige (TéléVerbier SA, 2012) ou encore le domaine des Portes du Soleil (France) avec 694 canons à neige. Son impact possible ou potentiel sur les ressources en eau n'apparaît donc pas comme une source d'inquiétude, en ce compris, les conflits d'usage avec l'eau potable ou l'hydroélectricité. Dans tous les cas, et par rapport aux informations obtenues, les apports en eau pour les installations concernées proviennent de ressources navales et pluviales. L'impact de la fonte glaciaire et de l'eau de fonte, ne concerne donc pas directement la problématique de l'enneigement artificiel. La production de neige artificielle représente dans de nombreux cas un atout économique pour le tourisme hivernal des stations de ski face aux aléas climatiques (Paccard, 2010). Si ces équipements, que l'on peut considérer comme une assurance « ski », permettent à de nombreux domaines de garder une attractivité en période de faible enneigement, pour beaucoup de stations l'augmentation des températures et le raccourcissement de la période hivernale risquent de mettre à mal d'un point de vue économique et environnemental la pérennité et l'intérêt de ce type d'installation. Une réflexion sur l'avenir de ce modèle touristique s'impose donc.

Si de manière générale, les communes du Val d'Hérens ont su trouver un équilibre entre un tourisme doux, la mise en valeur de leur patrimoine et une agriculture de montagne, c'est sans doute au prix d'un développement touristique plus faible par rapport aux grandes infrastructures des stations des vallées voisines (Verbier et Zermatt). Se pose alors la question de la viabilité de ces stations de moyenne altitude non seulement d'un point de vue financier mais aussi climatique dans un contexte de réchauffement global. La solution pour dynamiser durablement le Val d'Hérens se trouve donc certainement dans la diversification des activités touristiques qui repose sur la qualité de l'accueil, la valorisation du patrimoine naturel et la recherche « d'authenticité ».



## Chapitre 4 Notion de services écosystémiques

L'objectif de ce chapitre est d'introduire et de comprendre la notion de services écosystémiques (SE), de cerner les relations entre ceux-ci et les acteurs en présence (habitants, gestionnaires) et les mettre en perspective avec le contexte du réchauffement climatique. Les aspects économiques (paiement pour services écosystémiques), aussi passionnant soient-ils, ne seront pas abordés dans ce cadre. Nous focaliserons notre attention sur l'appréhension des fonctions écologiques et la manière dont les services qui en découlent influencent le bien-être humain. La montagne, et les Alpes en particulier sont le laboratoire des changements globaux qui se manifestent aux niveaux local, régional mais aussi mondial et les écosystèmes alpins et les services qui en découlent sont donc les premiers touchés. Les SE liés aux glaciers et à l'eau ne font pas exception. Tentons d'y voir plus clair.

### 4.1 Naissance et évolution d'un concept

La révolution industrielle a bouleversé notre relation aux milieux naturels tout en améliorant significativement les conditions de vie d'une large frange de la population. Cette (re)évolution de la société ne s'est pas faite sans impacts sur les ressources naturelles ainsi que sur la modification des écosystèmes. On est passé graduellement d'une conception où les ressources planétaires étaient infinies, facilement accessibles et gratuites au constat, surtout à partir des années 1970, que les dégradations et les destructions occasionnées aux écosystèmes par les activités humaines étaient difficilement substituables. La notion de services écosystémiques est arrivée sur le devant de la scène grâce à une prise de conscience des scientifiques et des autorités publiques quant à l'importance des relations entre l'Homme et son environnement (Antona et al. 2011). Elle apparaît d'abord aux Etats-Unis au sein du monde des chercheurs en écologie, sous l'appellation de « service environnemental », notion qui sera reprise dans un rapport destiné à préparer le Sommet de la Terre de Stockholm en 1972 (Mooney, et al., 1997).

Selon ces auteurs, la notion de service environnemental dérive des fonctions écologiques que nous fournissent les écosystèmes mais, à ce stade, la question de la conservation de ces services et des écosystèmes n'est pas encore posée. Il s'agit seulement de diminuer les impacts humains sur ces derniers tout en soulignant que les services rendus par la nature sont trop souvent ignorés (Bonnin et al. 2011).

Le concept de services écosystémiques prend naissance avec la publication du livre « Nature's Services » en 1997 dans lequel Gretchen Daily définit les services écosystémiques comme « les

conditions et processus par lesquels les écosystèmes naturels et les espèces qui les construisent soutiennent et permettent la vie humaine » (Daily, 1997). Cette notion s'inscrit dans une perspective où l'on cherche à mettre en relation, à partir des années 1970, l'économie et le respect de l'environnement. Le tout, dans un contexte de crise énergétique et de remise en question de la croissance (publication du rapport « The Limits to Growth » en 1972).

En 1977, E. Westman publie un article "How much are nature's services worth?" (Westman, 1977) dans lequel il essaie de montrer toute l'importance économique des « services écosystémiques pour l'humanité notamment en mettant en évidence que la réhabilitation ou la restauration d'un écosystème dégradé peut être impossible ou financièrement trop élevée. En 1997, Robert Costanza et ses collègues publient « The value of the world's ecosystem services and natural capital », publication dans laquelle ils proposent une évaluation monétaire des écosystèmes globaux à l'échelle planétaire (Costanza, 1997). Cette dernière publication va connaître un écho considérable, mais ses résultats seront soumis à controverse au sein même de la sphère scientifique et économique (Binning et al. 2001). Enfin, en 2009, le TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity) est publié. Cette étude mondiale, initiée par le G8 et les cinq grands pays en développement, cherche à intégrer la valeur économique de la biodiversité ainsi que les services fournis par les écosystèmes dans les prises de décision (TEEB, 2009). Il met outre en avant « le bienfait économique mondial de la diversité biologique, les coûts de la perte de biodiversité et l'échec à prendre des mesures de protection par rapport aux coûts de conservation efficace » (TEEB, 2009)

L'institutionnalisation du concept de services écosystémiques ( parfois aussi appelé « services écologiques ») se fait véritablement en 2005 avec la publication du *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA, 2005). La publication du MEA est le résultat d'une démarche globale entamée dès 1992 au Sommet de la Terre à Rio de Janeiro, période au cours de laquelle les problématiques environnementales ainsi que les évaluations qui en découlent sont au-devant de la scène (notamment pour coordonner les politiques publiques). Entre 1993 et 1995, sous l'égide du Programme des Nations-Unis pour l'Environnement (PNUE), le *Global Biodiversity Assessment* (GBA) est réalisé. Ce dernier se compose d'un état de l'art sur les questions de biodiversité. Il ne contient pas de recommandations et seul, une minorité de pays, sont mis à contribution (Bonnin et al. , 2011). Entre 1998 et 1999, un comité de pilotage est mis en place par la Banque mondiale, le PNUE et le PNUD en vue d'élaborer un cadre de travail, reprenant scientifiques, représentants d'ONG et responsables politiques. La réflexion amenant à la publication de *Millennium Ecosystem Assessment* est entamée en 2001. Elle cherche à « évaluer les conséquences de l'évolution des écosystèmes sur le bien-être de l'Homme et d'établir la base scientifique des actions requises pour un renforcement de la conservation des écosystèmes, de leur exploitation de manière durable et de leurs contributions au bien-être de l'Homme » (MEA, 2005). Le MEA part du principe que les hommes font partie intégrante des

écosystèmes et qu'il existe des interactions dynamiques entre eux et ces écosystèmes. Plus de 1360 experts se réunissent entre 2001 et 2005 et proposent des actions à mettre en place pour diminuer l'impact humain sur les écosystèmes ou améliorer leur conservation. En 2005, le rapport et ses conclusions, fruit d'un travail mené par quatre groupes, sont publiés. Elles sont sans équivoque : nos activités exercent une telle pression sur les écosystèmes terrestres et leur capital naturel, qu'elles mettent en péril le bien-être des générations présentes et futures. Par ailleurs, elles nous informent de notre capacité à inverser la tendance actuelle en revoyant nos pratiques économiques et politiques.

Ce rapport a le grand mérite de mettre en exergue, pour les décideurs économiques et politiques, nos dépendances envers les services écosystémiques et la nécessité que nous avons de les protéger. Néanmoins, il pointe également les gros efforts qui sont encore nécessaires pour parvenir à un équilibre. On notera que c'est à ce moment précis, que les économistes et le secteur privé vont s'emparer de la notion de paiement pour services écosystémiques (PSE). Ce paiement, qui est un système contractuel incluant des transferts entre bénéficiaires (une municipalité) et un fournisseur (par exemple une compagnie hydroélectrique), tente de réduire les externalités négatives (pollutions, etc.) tout en favorisant les externalités positives (comme par exemple les fonctions de régulation d'un glacier). Ces PSE peuvent s'effectuer à des échelles différentes, locale, régionale ou internationale. (Boisset, 2008).

Une autre définition des PSE selon Wunder, nous indique qu'il s'agit d'une transaction volontaire qui concerne un service environnemental précis (ou une utilisation de l'espace qui fournit le service) et qui implique, au minimum, un acheteur du service face à un vendeur (prestataire) du service... et pour autant que ce vendeur (i.e. le fournisseur du service) soit en mesure d'en assurer la fourniture (Bauler, 2010).

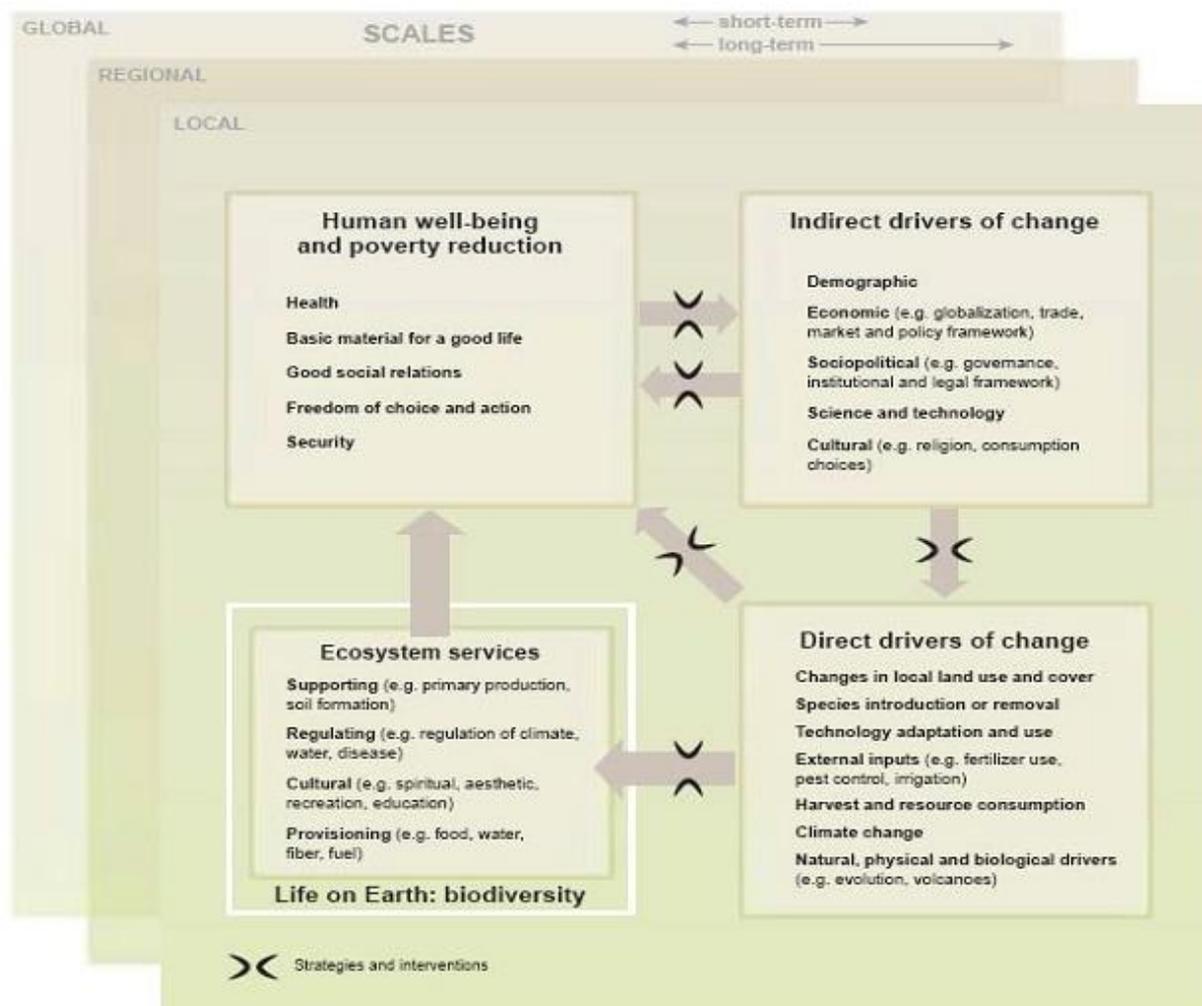
## **4.2 Enjeux environnementaux des services écosystémiques**

*« Il est scientifiquement établi, même si c'est de manière incomplète, que les changements provoqués au niveau des écosystèmes augmentent la probabilité d'apparition de changements non-linéaires à ce niveau (dont des changements accélérés, brutaux, et potentiellement irréversibles), avec des conséquences importantes sur le bien-être de l'Homme. » (Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique, 2010).*

*“The scientific community has worked feverishly for most of the last two decades to offer quantitative insight into the fate of species and ecosystems faced with the changing climate that is expected to result from a doubling of atmospheric carbon dioxide (CO<sub>2</sub>).”(GIEC, 2007)*

La notion de services écosystémiques abordée dans le MEA nous oblige à revoir notre rapport à la nature (Ferry, 1992). Partant d'une perspective très anthropocentrée et utilitariste de la nature (par rapport aux services qu'elle nous offre), l'humain prend conscience, au travers des services écosystémiques, de sa dépendance face aux écosystèmes (Hess, 2011). Cette approche part du principe que la protection de l'environnement doit se faire uniquement dans la mesure où l'environnement et les services écosystémiques couvrent les besoins humains d'aujourd'hui et des générations futures (Blancher et al. 2011). Par cette approche, l'homme semble se rapprocher de la nature (même s'il considère encore trop souvent que les ressources naturelles lui appartiennent) et se distancie d'une approche biocentriste, dans laquelle il donne une valeur intrinsèque à l'environnement, en mettant en avant la valeur propre de la biodiversité (Hess, 2011).

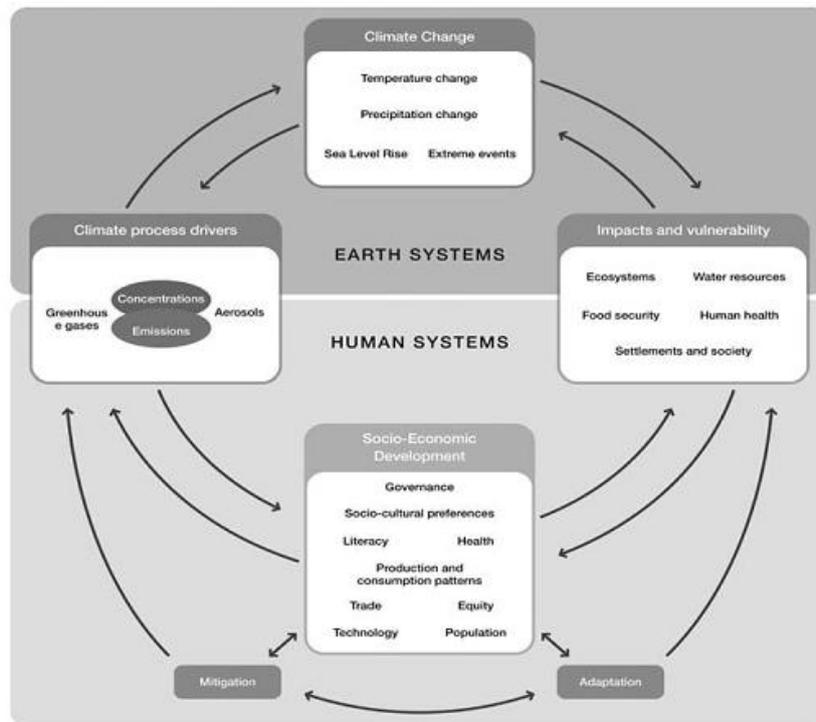
La notion de services écosystémiques telle que développée dans le MEA cherche, dans un premier temps, à comprendre les mécanismes et interactions entre les écosystèmes (en ce compris l'état écologique des écosystèmes) et dans un second temps, à mettre en relation les services rendus par ceux-ci et le bien être qu'ils peuvent nous apporter.



**Figure 17 : Cadre conceptuel des interactions entre Biodiversité, services écosystémiques, bien-être humain, et forces ou causes à l'origine du changement. Cette illustration montre bien l'interdépendance entre l'ensemble des composantes. (Millenium Ecosystem Assessment, 2005)**

Cette vision des services écosystémiques permet d'avoir une image plus globale des processus à l'œuvre dans les écosystèmes tout en montrant l'interdépendance entre les communautés biotiques et abiotiques (Adams et al. 2009) (figure ci-dessus). Les services écosystémiques ne seront pas identiques et n'auront pas les mêmes fonctions si on les regarde sur une échelle de temps plus longue. L'évolution des techniques, mais aussi le rapport que la société aura avec ces services pourra évoluer. Ainsi un bénéficiaire à un moment X ne sera peut-être plus le même à un moment Y et il en sera de même avec la localisation d'un service comme par exemple un barrage hydroélectrique. La compréhension des mécanismes et des dynamiques en présence, est essentielle. Elle permet de mettre en place des actions influençant notamment la résilience des écosystèmes (Bennett et al. 2009). L'agencement de ces services au sein même des écosystèmes, est donc en perpétuelle évolution. Les services écosystémiques vont interagir entre eux dans un écosystème précis avec des effets spécifiques. Dès lors, le concept de services écosystémiques nous fournit un cadre intéressant dans lequel interviennent des aspects environnementaux mais aussi sociaux et économiques. Dans le cas

présent, il s'agit de comprendre les relations au sein du triangle suivant : Glacier-Eau-Humains, les trois composantes étant étroitement liées à l'évolution du climat global (température, précipitation, etc.)



**Figure 18 : Illustration montrant les liens de causes à effets entre les composantes du système Terre (GIEC 2007).**

### 4.3 Services écosystémiques : glaciers et eau

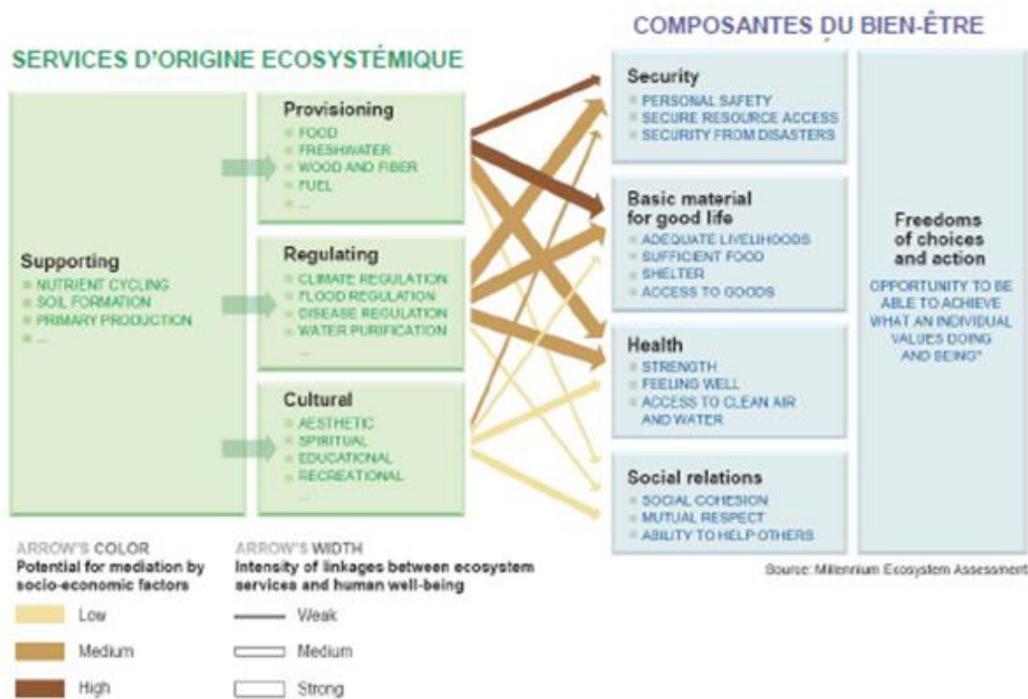
La Commission Economique pour l'Europe du Conseil Economique et Social des Nations Unies (UNECE, 2006) a identifié huit grands services écosystémiques liés à l'eau : prévention, contrôle et protection contre les inondations, régulation des écoulements et de l'approvisionnement en eau, amélioration de la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines, retenue des sédiments et réduction de l'érosion, stabilisation des berges et rivages et diminution des risques de glissement de terrain, amélioration de l'infiltration et favorisation de la capacité de rétention d'eau du sol et facilitation de la recharge des eaux souterraines. A ces services, il convient d'ajouter aussi les services culturels tels que les bénéfiques récréatifs, esthétiques et spirituels (CREDOC, 2009). Cet ensemble de services écosystémiques n'est figé ni dans le temps, ni dans l'espace et un certain nombre d'autres SE peuvent découler de ceux cités.

Si l'on se recentre sur les glaciers alpins, et comme nous l'avons mis en évidence au chapitre deux, des changements dans les précipitations, dans l'enneigement et plus encore, dans les quantités de glace

stockées dans les glaciers, vont modifier les dynamiques hydriques dans les vallées alpines, que ce soit au niveau de l’approvisionnement en eau ou au niveau de la production hydroélectrique (Delestrade et al. 2010). Bon nombre de glaciers de petite ou moyenne taille, devraient disparaître au cours des cent prochaines années. Les précipitations neigeuses se transformeront plus rapidement en pluie et réduiront la capacité des glaciers à accumuler l’eau sous forme solide, diminuant d’autant les possibilités de redistribution d’eau durant les mois d’été (Leavesley, 1994). La diminution du volume de glace aura d’abord un impact sur l’augmentation de l’écoulement annuel prévu sur les glaciers et l’on assistera ensuite, à une réduction de ce dernier, parallèlement à la diminution de la surface glaciaire (Gestion durable de l’eau, 2010),

En Suisse, environ 80% de l’eau potable provient d’eau souterraine, une diminution du transport d’eau de fonte en raison du retrait glaciaire et une modification saisonnière des précipitations, pourront provoquer un stress hydrique de manière locale. A cela s’ajouteront des pressions supplémentaires, notamment une demande accrue en eau pour le tourisme, l’agriculture, ou la neige artificielle, le tout accentué par des conflits d’usage (EEA, 2011). Le retrait des glaciers influence donc de nombreux secteurs dépendant de l’eau de fonte, tels que la production d’énergie hydraulique, l’irrigation, le tourisme d’hiver et dans une moindre mesure, l’approvisionnement en eau potable.

Le MEA a classifié les services écosystémiques en quatre catégories (voir lien avec classification UNECE ci-dessus) : les services de régulation, les services culturels, les services d’approvisionnement, et les services d’appuis (ou de soutien). Ces quatre catégories remplissent toutes des fonctions bien distinctes et sont considérées comme indispensable pour le bien-être des êtres humains.



**Figure 19 : Ensemble des quatre catégories de SE et leurs interactions avec les éléments nécessaires au bien-être humain (MEA, 2005)**

- Prestation de régulation

Les services de régulation concernent les avantages provenant de la régulation naturelle des écosystèmes : régulation du climat (à différentes échelles, mondiale à locale), pollinisation, ou encore régulation des régimes hydriques, atténuation des crues et sécheresses, le glacier jouant ici le rôle de zone d'accumulation et de régulation du débit.

- Prestation culturelle

Les services culturels concernent les avantages non matériels que nous procurent les écosystèmes. On parle ici de l'aspect culturel, religieux ou spirituel, esthétique, ou encore éducatif et récréatif. On notera que dans le Val d'Hérens la pratique de l'alpinisme est bien présente, elle fait partie de cette catégorie de prestations.

- Prestation d'approvisionnement

Si l'on prend les services d'approvisionnement, on entend ici les produits ou biens directement tirés des écosystèmes. Il peut s'agir de bois, de nourriture, de ressources génétiques, ou encore dans le cas qui nous intéresse, de l'alimentation en eau douce

## Prestation de soutien ou prestation de base

Cette dernière catégorie de services écosystémiques, même si elle ne fait pas toujours l'unanimité, concerne les services « primaires », c'est-à-dire l'ensemble des services nécessaires à la production des services écosystémiques (voir schéma). On parle ici du cycle des nutriments (azote, oxygène, etc.), de la formation des sols, etc. Ces prestations constituent quelque part le socle de l'ensemble des prestations, permettant par là leur existence. Elles ne sont pas toujours prises en compte parce qu'elles font partie intégrante des prestations et services consommés par la suite (Haines-Young et al. 2010).

### **4.4 La notion de « point de basculement »**

La Convention Internationale sur la diversité biologique a créé la notion de « point de basculement » en ce qui concerne les services écosystémiques (Projections des changements de la biodiversité et des services écosystémiques pour le 21e siècle, 2011). Pour définir cette dernière, elle se base sur des situations où « les changements dans les écosystèmes sont assez significatifs pour avoir des impacts importants sur la biodiversité ou les services écosystémiques à l'échelle mondiale et régionale ». Les impacts sur les SE doivent satisfaire à l'un des quatre facteurs ou critères suivants :

- L'effet général d'un facteur du changement global est amplifié par des boucles de rétroaction positive<sup>33</sup> ;
- Il existe un seuil au-delà duquel survient un changement abrupt entre plusieurs états écologiques stables ;
- Les changements provoqués par un facteur sont de longue durée et difficiles à inverser ;
- Il existe un délai significatif entre la dynamique des facteurs et l'expression des impacts, ce qui complique grandement la gestion écologique. (Projections des changements de la biodiversité et des services écosystémiques pour le 21e siècle, 2011).

Si l'on compare ces facteurs à la dynamique glaciaire et hydrologique face au réchauffement global, on atteindra bientôt un « point de basculement ». Rappelons qu'il y a un certain nombre de rétroactions positives (et parfois négatives) qui ont lieu sur les glaciers dans ce contexte de réchauffement et que les processus à l'œuvre se déroulent sur des périodes plus ou moins longues. On verra ci-après que ce « point de basculement » est corrélé à l'évolution des services écosystémiques que nous avons identifiés et choisis de traiter.

---

<sup>33</sup> Les rétroactions positives amplifient le(s) phénomène(s) en présence.

## 4.5 La Classification Internationale Commune des Services Écosystémiques (CICES)

La CICES a vu le jour en 2009 à l'initiative de l'Agence Européenne de l'Environnement (AEE), en partenariat avec les Nations Unies, avec comme objectif de nommer et de décrire les services écosystémiques en relation avec les activités économiques. Elle souhaite mettre en œuvre, sur la base du MEA, un nouveau système de classification plus uniforme.

La CICES part de l'idée que la classification doit être compatible avec l'ensemble des typologies de biens et services écosystémiques utilisés dans la littérature internationale, et compatible avec le Système de comptabilité économique et environnementale (SCEE) développé par l'OCDE, l'ONU et le Banque Mondiale notamment<sup>34</sup>. La CICES définit les SE comme la contribution que les écosystèmes apportent au bien-être humain et résultant des interactions entre les facteurs biotiques et abiotiques (Haines-Young et al. 2010). Cette classification ressemble fortement à celle établie par le MEA sauf qu'elle ne contient pas les prestations de soutien (voir point 4.3) qui sont directement intégrées dans les catégories de la CICES. Tout comme l'inventaire établi par l'OFEV ci-dessous, sont prises en compte uniquement les prestations directement utiles à l'Homme (OFEV, 2011). On le verra, une fois encore, les services écosystémiques liés à l'eau sont bien présents.

Theme	Class	Group
Provisioning	Nutrition	Terrestrial plant and animal foodstuffs
		Freshwater plant and animal foodstuffs
		Marine plant and animal foodstuffs
		Potable water
	Materials	Biotic materials
		Abiotic materials
	Energy	Renewable biofuels
		Renewable abiotic energy sources
Regulation and Maintenance	Regulation of wastes	Bioremediation
		Dilution and sequestration
	Flow regulation	Air flow regulation
		Water flow regulation
		Mass flow regulation
	Regulation of physical environment	Atmospheric regulation
		Water quality regulation
		Pedogenesis and soil quality regulation
	Regulation of biotic environment	Lifecycle maintenance & habitat protection
		Pest and disease control
		Gene pool protection
	Cultural	Symbolic
Religious and spiritual		
Intellectual and Experiential		Recreation and community activities
		Information & knowledge

**Tableau 2 : Tableau représentant l'ensemble de services écosystémiques établis par la CICES (Haines-Young et al. 2010)**

<sup>34</sup> Ce système complète le système de comptabilité nationale (outil mesurant l'activité économique d'un ou plusieurs pays au cours d'une période donnée et établi en 1993 par l'ONU) en fournissant un cadre commun afin d'observer les interactions entre l'économie et l'environnement. Le SCEE comprend des comptes de flux physiques provenant de quatre types de ressources : ressources naturelles, intrants provenant des écosystèmes, produits et résidus. Des comptes intégrant les flux économiques et physiques sont ensuite réalisés pour relier activité économique et utilisation des ressources (OCDE, 2006)

## 4.6 Services Ecosystémiques selon OFEV (FEGS)

Les autorités suisses, aidées par un panel d'experts, ont développé une nouvelle approche permettant de comprendre les services écosystémiques au sein d'unités physiques déterminées.

En complémentarité avec d'autres systèmes de classification tels le MEA ou la CICES, l'Office Fédéral de l'Environnement a établi une liste de services écosystémiques (au nombre de vingt-trois) sous la forme d'un « Inventaire des prestations écosystémiques finales ». Cet outil a pour objectif final de guider les administrations publiques dans la gestion des politiques environnementales (planification, mise en œuvre, adaptation, atténuation, etc.) en mettant bien l'accent sur la contribution des écosystèmes au bien-être.

L'inventaire de ces vingt-trois prestations reprend uniquement les prestations dites « finales », c'est-à-dire les prestations qui profitent directement à l'Homme et à son bien-être (Final Ecosystem Goods and Services, FEGS). Ces prestations finales sont à mettre en opposition avec les prestations dites « intermédiaires » qui elles, contribuent aux prestations finales (OFEV, 2011). Quatre types de prestations finales ont été déterminés, chacune avec des propriétés particulières:

- Les prestations écosystémiques finales directement utiles, soit celles qui sont directement utilisées par l'homme ;
- Les prestations écosystémiques, utilisées pour la production de biens du marché. Elles ne sont alors pas consommées directement (comme par exemple la pollinisation) ;
- «Ecosystème naturel / sain, correspondent aux milieux écologiques pertinents pour la santé.
- Les prestations écosystémiques intermédiaires sont celles qui n'apportent aucun bénéfice direct à l'homme. Une exception ici : le stockage du CO<sub>2</sub> en tant que prestation préalable à la stabilité du climat (OFEV, 2011).

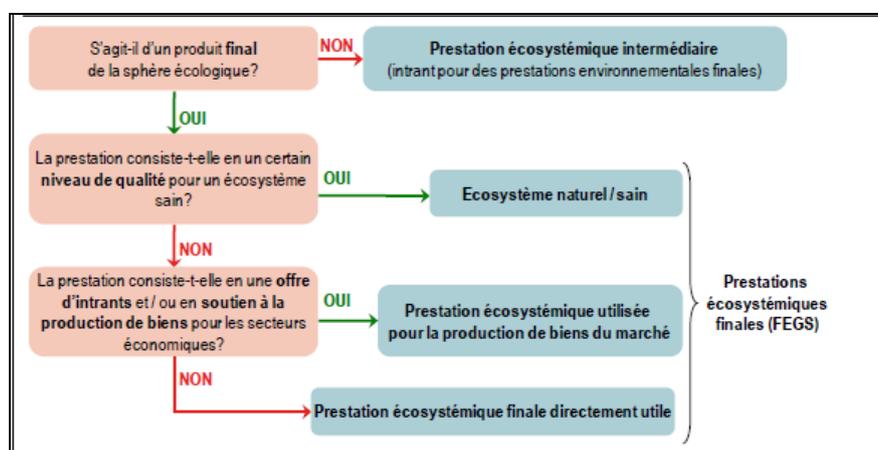


Figure 20 : Répartition des FEGS en quatre types de prestations (OFEV, 2011)

Ces quatre types de prestation sont classifiés en quatre catégories de bénéfiques (santé, sécurité, diversité biologique et prestations économiques). Comme on le verra dans le tableau ci-dessous, ces quatre catégories correspondent aussi à celles du MEA, elles peuvent donc s'intégrer à ce système international de classification.

N°	Prestation écosystémique finale (FEGS)	Type de prestation	Bénéfice	Type de service selon EM (2005)
<b>Santé / Bien-être</b>				
Sa1	Prestation récréative grâce à la chasse, la cueillette et l'observation de la faune et de la flore sauvage	Prestation écosystémique directement utile	Détente	Prestations culturelles
Sa2	Prestation récréative grâce à des espaces verts urbains ainsi que des espaces de détente de proximité ou plus éloignés	Prestation écosystémique directement utile	Détente	Prestations culturelles
Sa3	Prestation récréative grâce à des espaces de détente aménagés aux alentours des constructions (p. ex. jardins)	Prestation écosystémique directement utile	Détente	Prestations culturelles
Sa4	Possibilité d'identification grâce à de beaux paysages caractéristiques (héritage naturel et culturel)	Prestation écosystémique directement utile	Bien-être	Prestations culturelles
Sa5	Régulation du microclimat local grâce aux écosystèmes	Prestation écosystémique directement utile	Bien-être	Prestations de régulation
Sa6	Air sain et de bonne qualité pour l'homme	Ecosystème naturel / sain	Prévention	Pas compris sous cette forme (tendance à le classer sous Prestation de régulation)
Sa7	Silence	Ecosystème naturel / sain	Prévention	Pas compris sous cette forme (tendance à le classer sous Prestation de régulation)
Sa8	Un niveau de rayonnement non ionisant sans danger pour la santé	Ecosystème naturel / sain	Prévention	Pas compris sous cette forme (tendance à le classer sous Prestation de régulation)
<b>Sécurité</b>				
Sé1	Protection contre les avalanches, les chutes de pierres, et les laves torrentielles grâce à la végétation sur les pentes escarpées	Prestation écosystémique directement utile	Protection de l'homme, des animaux et des biens matériels	Prestations de régulation
Sé2	Protection grâce à des zones qui peuvent être inondées ou retenir l'eau	Prestation écosystémique directement utile	Protection de l'homme, des animaux et des biens matériels	Prestations de régulation
Sé3	Stockage du CO <sub>2</sub>	Prestation écosystémique intermédiaire	Protection de l'homme, des animaux et des biens matériels	Prestations de régulation
<b>Diversité biologique</b>				
D1	Valeur d'existence (intrinsèques) de la diversité au niveau des espèces, gènes, écosystèmes et paysages	Prestation écosystémique directement utile	Existence de la diversité biologique et des paysages (en plus de son importance pour toutes les prestations écosystémiques)	Que partiellement couvert: Prestations culturelles
<b>Prestations économiques (facteurs de production naturels)</b>				
E1	Eau potable et eau d'usage issues d'eaux souterraines et d'eaux superficielles utiles	Prestation écosystémique directement utile	Approvisionnement en eau	Prestations d'approvisionnement
E2	Soutien à la production de biens: pollinisation et lutte contre les ravageurs	Prestation écosystémique = intrant	Contribution à l'agriculture et à la sylviculture / industrie agroalimentaire	Prestations de régulation
E3	Sol fertile pour l'exploitation agricole et sylvicole	Prestation écosystémique = intrant	Contribution à l'agriculture et à la sylviculture / industrie agroalimentaire	Prestations de base
E4	Plantes fourragères et engrais organiques pour l'exploitation agricole	Prestation écosystémique = intrant	Contribution à l'agriculture / industrie agroalimentaire	Prestations d'approvisionnement
E5	Accroissement du bois pour l'exploitation sylvicole	Prestation écosystémique = intrant	Contribution à la sylviculture	Prestations d'approvisionnement
E6	Gibier et poisson pour l'exploitation commerciale	Prestation écosystémique = intrant	Contribution à l'économie de la chasse et de la pêche	Prestations d'approvisionnement
E7	Paysages naturels et culturels à valeur touristique	Prestation écosystémique = intrant	Contribution à la valeur ajoutée touristique	Prestations d'approvisionnement
E8	Energies renouvelables: énergie hydraulique, énergie éolienne, biomasse, énergie solaire	Prestation écosystémique = intrant	Contribution à l'économie énergétique	Que partiellement couvert: Prestations d'approvisionnement
E9	Soutien à la production de biens: capacité de refoisonnement	Prestation écosystémique = intrant	Refroidissement pour diverses branches	Prestations de régulation
E10	Ressources génétiques et substances actives biochimiques	Prestation écosystémique = intrant	Contribution à l'industrie pharmaceutique et à l'agriculture (entre autres)	Prestations d'approvisionnement
E11	Soutien à la production de biens: réduction et stockage des résidus	Prestation écosystémique = intrant	Contribution à l'élimination des eaux usées et des déchets	Prestations de régulation

**Tableau 1 : Répartition des quatre types de prestations. Entourés en rouge, les services écosystémiques liés à l'eau. (OFEN, 2011).**

La complémentarité et la richesse du système développé par l'Office Fédéral Suisse de l'Environnement est qu'il donne un réel aperçu des services écosystémiques à l'échelle de la Suisse tout en étant inséré dans le système de classification mondiale (via le MEA). Qui plus est, un ensemble d'indicateurs qualitatifs et quantitatifs ont été établis pour chaque prestation écosystémique finale (FEGS)

FEGS	Indicateurs	Base de données
Prestations économiques (facteurs de production naturel)		
E1: Eau potable et eau d'usage issues d'eaux souterraines et d'eaux superficielles utiles	I1: Approvisionnement en eau provenant d'eaux de source et de nappes phréatiques non traitées en millions de m <sup>3</sup> d'eau par an	Société Suisse de l'industrie du Gaz et des eaux, (SSIGE), statistique annuelle de l'eau
	I2: Pourcentage de l'eau de source et de nappes phréatiques sur l'approvisionnement total en eau	

**Tableau 3: Proposition d'indicateurs pour l'une des prestations écosystémiques finales (FEGS) (voir tableau complet en annexe) (OFEV, 2011)**

Ils nous permettent d'avoir des données mesurables (surface de forêts, débitmétrie, etc/), d'identifier le/les prestataires des services concernés, l'offre ou la demande de ce service ou encore la relation direct avec le bien-être. (OFEV, 2011). Ces indicateurs, sont repris généralement dans des bases de données nationales ou régionales et sont appelés à évoluer de manière plus précise au cours des différentes recherches menées. L'atout majeur de ces indicateurs est de fournir des indices mesurables et visibles afin de montrer les apports des écosystèmes au bien-être humain. Dans le même ordre d'idée, cet inventaire et ces indicateurs permettent de concrétiser la notion de SE dans les décisions politiques tout en évaluant les progrès déjà réalisés ou non.

## 4.7 Conclusion

Il ressort de nos trois méthodes d'identification des services écosystémiques (MEA, FEGS, CICES), que la problématique liée à l'eau y occupe une position centrale. Toutes trois ont des approches un peu différentes mais arrivent globalement aux mêmes résultats. C'est pourquoi, au regard des enjeux que représentent les services écosystémiques dans les régions de montagne et plus spécifiquement dans les Alpes, il est primordial de cerner les impacts présents et à venir sur la gestion de l'eau. Les impacts probables du réchauffement climatique sur les glaciers alpins, l'existence de possibles points de basculement, y compris dans le Val d'Hérens vont concentrer notre attention dans le chapitre suivant à travers la question de l'hydroélectricité et du Barrage de la Grande Dixence.



## **Chapitre 5 Services écosystémiques : l'hydro-électricité dans le Val d'Hérens**

Dans un contexte de réchauffement climatique et face aux enjeux de son approvisionnement énergétique, la Suisse est appelée, tôt ou tard, à revoir le mix sur lequel cet approvisionnement repose aujourd'hui. Ses nombreux barrages et centrales au fil de l'eau vont très certainement être confrontés à des modifications de débits et de précipitations, dans le sens d'une diminution des disponibilités nette en eau. L'utilisation des ressources en eau, aussi bien pour la force hydraulique que pour des usages récréatifs ou d'approvisionnement, nécessite de connaître de façon la plus détaillée possible les tendances à court, moyen et long terme. Pour appréhender ces données, il est donc important de comprendre les processus à l'œuvre ainsi que les relations qu'ils entretiennent entre eux. Le régime d'écoulement et le débit sont, de ce point de vue, des indicateurs précieux qu'il convient dès lors de prendre en compte. Ils seront donc développés dans un premier temps. Dans un second temps, un état des lieux de la situation hydroélectrique sera effectué et enfin nous mettrons l'ensemble en perspective face à toutes ces modifications

### **5.1 Régime hydrologique**

Le régime hydrologique d'une rivière, désigne « l'ensemble de ses caractéristiques hydrologiques et son mode de variation. » (Higy et al. 2009) Pour déterminer le régime, on doit mesurer la variation moyenne du cours d'eau en fonction du temps. Le débit d'un cours d'eau varie pendant l'année, voir durant la journée. Un régime hydrologique est donc caractérisé par les amplitudes du débit au cours de l'année. Lorsque celui-ci est au plus bas, on parle de « basses eaux » ou d'étiage et lorsqu'il est au plus haut on parle de « hautes eaux ». Ce débit sera intimement lié au mode d'alimentation du cours d'eau, celui-ci pouvant être de plusieurs types : fonte de glace et de neige, précipitations ou encore sources. On peut donc caractériser le régime hydrologique d'un cours d'eau en fonction de la fluctuation saisonnière du débit mais aussi en fonction de son mode d'alimentation (nature et origine des eaux). Pour représenter graphiquement le régime hydrologique du cours on utilisera le coefficient de Pardé (Canton du Valais, 2007), c'est-à-dire le quotient du débit mensuel moyen par le débit annuel moyen (SSHL, CHy, 2011). On verra par la suite, que le régime hydrologique (ou régime d'écoulement) joue un rôle déterminant dans l'utilisation des cours d'eau aussi bien pour l'hydroélectricité que pour l'approvisionnement en eau. Si l'on se base sur la classification « simple » de Pardé, dans les Alpes on distingue trois régimes hydrologiques, lesquels à leur tour, regroupent des régimes d'alimentation différents.

### **5.1.1 Le régime hydrologique simple**

Ce régime se caractérise par un maximum (période de hautes eaux) et un minimum (période de basse eau ou étiage) au cours de l'année hydrologique. Si l'on se base sur son mode d'alimentation, on distingue trois « sous régimes » :

- Le régime glaciaire

Dans les Alpes suisses, le régime glaciaire est caractérisé par la présence d'un bassin versant englacé entre 15 et 20%, un écoulement important généralement sous forme de torrent et un débit très important pendant la période estivale (fonte de la glace). On retrouve une période de hautes eaux unique entre juillet-août et une période d'étiage (avec un débit très faible) durant la période hivernale (janvier-février). Par ailleurs, l'amplitude entre les débits maximum (crue) et les débits minimum est élevée, au même titre que la variation du débit entre le jour et la nuit (durant la période estivale). Ce régime est relativement régulier d'une année à l'autre (Higy et al. 2009)

- Le régime nival

Le régime nival « pur » (par rapport au régime nival de transition) est proche de certaines caractéristiques du régime glaciaire. Son maximum (crue) a cependant lieu plus tôt, entre mai et juin, et les basses eaux ont lieu en été. Ce régime peut se subdiviser en régime nival de montagne ou nival de plaine. Le régime nival de montagne est typique des rivières de moyenne altitude dans les Alpes où une majorité des précipitations parvient sous forme de neige ;

- Le régime pluvial

Le régime pluvial se caractérise par un fort contraste entre les hautes eaux (avec des maximums en hiver) et les basses eaux en été (de juillet à septembre) et par une irrégularité interannuelle en partie due aux aléas des précipitations liquides. Enfin, ce type de régime se retrouve à basse ou moyenne altitude pour des régions tempérées sans neige (Higy et al.2009)

### **5.1.2 Le régime hydrologique mixte**

Le régime hydrologique mixte possède deux alternances par an, avec deux maximums et deux minimums. Si l'on regarde son mode d'alimentation, trois « sous régimes » ressortent ;

- Le régime nivo-glaciaire

Ce régime se caractérise par un « gros » maximum très tôt dans la période estivale (mai, juin, juillet) qui correspond à la fonte des neiges et à la fonte glaciaire. Des variations diurnes dans la fonte peuvent être importantes durant l'été tout en gardant un écoulement considérable. Enfin, les variations interannuelles peuvent être, elles aussi, importantes. (Higy et al.2009) ;

- Le régime nivo-pluvial

Ce régime possède deux maximums annuels commençant pour l'un, vers le mois d'avril pour se prolonger jusqu'en juin (correspondant à la fonte des neiges ou fonte nivale) et l'autre, plus faible, en automne correspondant aux chutes de pluies. En outre, il possède deux étiages : un étiage principal en septembre-octobre et un étiage secondaire en janvier (hiver). L'amplitude entre les coefficients mensuels est relativement faible et connaît des variations interannuelles parfois importantes (EPFL, 2012). On retrouve ce régime dans les rivières alpines d'altitude faible à moyenne ( dans le Jura ou les Préalpes suisses par exemple, RIOB, 2012) ;

- Le régime pluvio-nival

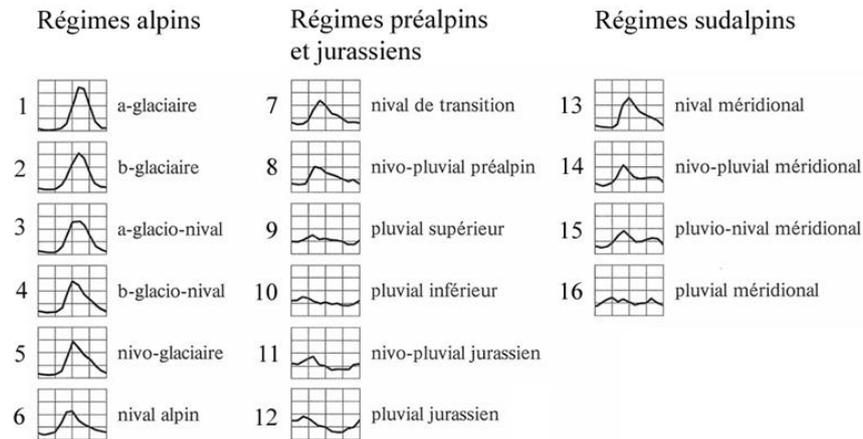
Le régime pluvio-nival se caractérise par deux périodes de hautes eaux (deux maximums) : une en automne-hiver dominée par les précipitations (pluies, tendance pluviale) et une seconde, au début du printemps avec la fonte nivale. L'amplitude entre les hautes et les basses eaux est relativement faible et est irrégulière d'une année à l'autre. (Higy et al. 2009)(EPFL, 2012). On retrouve ce régime à faible altitude dans les Alpes (entre 650 et 750 mètres d'altitude).

### **5.1.3 Le régime hydrologique complexe**

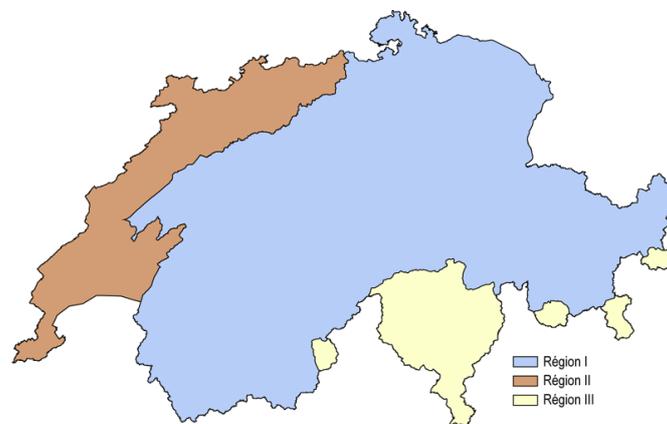
Ce régime hydrologique possède plusieurs alternances au cours de l'année (plusieurs minimums et maximums) ainsi que plusieurs modes d'alimentation (nival, pluvial, glaciaire). Ce régime se rencontre par exemple sur le Rhône en aval de Genève et est le résultat d'un ensemble de régimes hydrologiques rencontrés au sein de rivières qui font parties de son bassin versant.

Si la classification de Pardé garde, pour la Suisse, toute sa pertinence et sa validité en 1986, l'Institut de Géographie de l'Université de Berne, publiait « l'Atlas Hydrologique de la Suisse » dans lequel elle

classifiait et régionalisait les régimes hydrologiques présents sur le territoire suisse<sup>35</sup>. Ce travail, complémentaire à la classification « classique », allait se traduire par la création de trois régimes hydrologiques régionaux eux même subdivisés en seize sous régimes. Ces trois régimes régionaux sont les régimes préalpins et jurassiens (Régions I), les régimes alpins (Région II, et les régimes sudalpins (Région III) (Haller et al. 2007).



**Figure 21 : représentation graphique des 16 régimes d'écoulement en Suisse (Atlas hydrologique Suisse, 1986)**



**Figure 22 : Carte de la situation géographique des trois régimes hydrologiques régionaux (OFEV, 2012).**

Les caractéristiques générales des sous régimes sont les même que pour la classification de Pardé sauf que l'on a intégré ici des critères plus précis au niveau du degré de glaciation et de l'altitude moyenne du ou des bassin(s) versant(s).

<sup>35</sup> Pour classifier ces régimes, les chercheurs ont tenu compte d'une série de bassins versant et de rivières représentatives ainsi que des critères bien définis : régime d'écoulement, superficie des bassins versants, altitudes, surface englacée, etc.

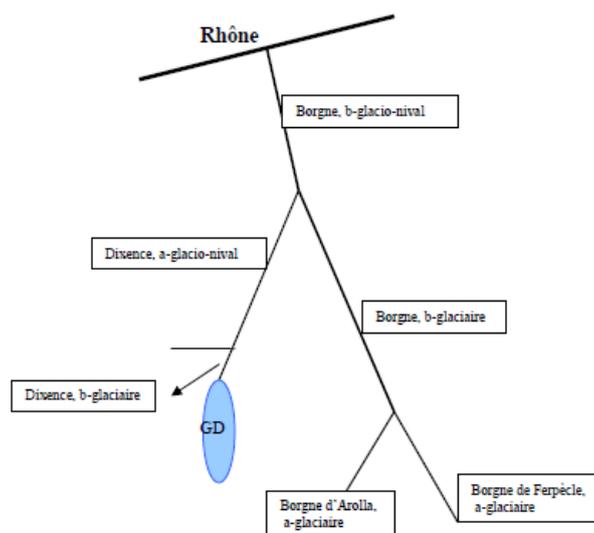
Degré de glaciation du bassin versant	Altitude moyenne du bassin versant [m s. mer]	Type
> 36%	> 2400	1
22 - 40%	> 2100	2
12 - 22%	> 2000	3
1 - 12%	> 2300	4
6 - 12%	1900 - 2300	4
1 - 6%	1900 - 2300	5
3 - 12%	1550 - 1900	5
0 - 1%	> 1900	6
0 - 3%	1550 - 1900	6

**Tableau 4: tableau reprenant les caractéristiques « degré de glaciation » et « altitude moyenne » du bassin versant pour les régimes alpins (sont concernés ici les bassins fluviaux du Rhône, du Rhin et de l’Aar) (OFEN, 2012)**

### 5.1.4 Typologie dans le Val d’Hérens

Les rapports officiels suisses utilisent cette dernière classification, raison pour laquelle nous adopterons la même démarche dans les lignes qui suivent. Comme mentionné précédemment, les régimes hydriques des cours d’eau du Val d’Hérens sont de type glaciaire à glacio nivale a-glaciaire et b-glaciaire, différenciés par la surface englacée dans le bassin versant et par son altitude moyenne.

Vu de plus près, le régime est de type a-glaciaire pour la Borgne de Ferpècle et la Borgne d’Arolla jusqu’à Arolla et devient de type b-glaciaire à partir des Haudières (confluence Borgne de Ferpècle, Borgne d’Arolla) jusqu’à la confluence avec la Dixence. En aval de la confluence, le régime devient de type a-glacio-nival. En ce qui concerne la Dixence « elle est de type b-glaciaire jusqu’à la confluence avec le torrent de Chenna puis type a-glacio-nival jusqu’à la confluence avec la Borgne ». (Canton du Valais, 2007).



**Figure 23 : Schéma des principaux cours d’eau des bassins versants de la Dixence et de la Borgne en Val d’Hérens. Sont donc repris les quatre types de régimes rencontrés ici. En bleu le barrage de la Grande Dixence (composition personnelle).**

## 5.2 Etats des lieux

Le Val d'Hérens constitue donc un terrain de choix pour l'installation d'infrastructures hydro-électriques. On y trouve vingt et une prises d'eau et trois complexes hydroélectriques, chacun avec des tailles, des capacités et des modes d'exploitations différents. Il témoigne de la réalité des Alpes suisses dans lesquelles 79 % de la distance parcourue par les rivières alpines est aménagée à des fins d'exploitation hydraulique (Canton du Valais, 2007).

### 5.2.1 Acteurs en présence et données

La consommation totale d'électricité en Suisse en 2011 s'élève à 58.599 GWh pour une production totale de 62.881 GWh. Celle-ci se répartit entre des centrales hydrauliques qui contribuent à la production totale à concurrence de 53,7% (33.795 GWh), des centrales nucléaires pour 40,7% (25.560 GWh), le solde, soit 5,6% (3.526 GWh), étant assuré par les centrales thermiques (turbines au gaz majoritairement), des éoliennes et du photovoltaïque ( OFEN, 2011).

La puissance maximale disponible en Suisse (2011) pour l'ensemble des aménagements hydroélectrique s'élève à 13.680.87 MWh (547 installations dénombrées) dont 4.641.53 MWh pour le Valais (94 installations dénombrées). La production moyenne escomptée s'élève à 35.833.54 GWh pour la Suisse et à 9.593.81 GWh pour le Valais.

Pour les deux types de centrale qui nous concernent, on dénombre 455 centrales au fil de l'eau dont 69 en Valais (deux dans le Val d'Hérens) pour une puissance installée de 3.768.02 MWh et une puissance escomptée à l'année de 16.857.64 GWh. Pour le Valais, la puissance installée est de 832,75 MWh et la puissance escomptée de 3.210.42 GWh. Les centrales à accumulation ont une puissance installée dans le Valais de 3.558,13 MWh avec une production moyenne annuelle escomptée de 5.945,86 GWh. (OFEN,2011)

Ces deux types d'hydroélectricité fournissent 95,4% de l'énergie hydroélectrique du Valais (le reste provient de centrales de type centrale pompage-turbinage<sup>36</sup>) soit 25,5% de la production hydroélectrique de la Suisse. Si l'on additionne la production des trois installations du Val d'Hérens, elles ont produit, en 2011, 1.911,2 GWh d'électricité, soit 32,1% de la production hydroélectrique

---

<sup>36</sup> Les usines de pompage-turbinage se basent sur l'utilisation de deux bassins, l'un supérieur, l'autre inférieur. Pendant les heures creuses l'eau du niveau inférieur est pompée et remontée dans la retenue supérieure pour être ensuite turbinée en période de forte consommation (c'est le cas ici en Belgique avec la centrale de Coe).

totale du Valais. On remarque donc que l'hydroélectricité du Val d'Hérens occupe une place considérable dans le Valais suisse.

## 5.2.2 Gestion du Réseau électrique

La gestion du réseau qui compte plus de 250.000 kilomètres et la distribution de l'électricité en Suisse est en grande partie gérée par les pouvoirs publics (Cantons ou communes). Sur l'ensemble du territoire, l'on trouve plus de 800 gestionnaires de réseau de distribution (Swissgrid, 2012) qui ont pour tâche principale, d'approvisionner en électricité les consommateurs finaux (entreprises, habitants, etc.)<sup>37</sup>. Le réseau électrique suisse est constitué de sept niveaux, quatre niveaux de tension et trois niveaux de transformation. Pour l'instant, le réseau de transport haute tension (niveaux 1, 2, 3) est géré par plusieurs grandes sociétés mais d'ici 2013, ce sera un opérateur unique, Swissgrid, qui en aura la gestion et la maintenance (l'équivalent d'Elia en Belgique). Pour une partie du Valais, et particulièrement la région de Sion et du Val d'Hérens, c'est la société Energie de Sion-Région SA (ESR<sup>38</sup>) qui est responsable de l'approvisionnement et de la distribution à l'ensemble des consommateurs (niveaux 4, 5,6 et 7). ESR fait partie d'un ensemble de cinquante-cinq Entreprises d'Approvisionnement en Electricité (EAE) présentes dans le canton du Valais.

## 5.2.3 Cadre législatif et administratif

La législation suisse quant à l'utilisation des ressources en eau est relativement complexe et dépend de lois fédérales et cantonales. Ainsi la « *Loi fédérale sur l'utilisation des forces hydrauliques* » (LFH, datant de 1916) et la « *Loi cantonale sur l'utilisation des forces hydrauliques*<sup>39</sup> » (LFH-VS, datant de 1990) régissent l'utilisation des ressources en eau dans le Valais (Reynard, 2010). L'ensemble des eaux publiques (eaux de surfaces et eaux souterraines) appartient aux communes, exceptées celles du Lac Léman et du Rhône qui appartiennent à l'Etat Suisse<sup>40</sup> (« *Loi sur les cours d'eau* » de 1932). Les concessions destinées à la production hydroélectrique (publiques ou privées) sont accordées par les communes concernées par le/les cours d'eau touchés. Une concession ne peut, en aucun cas, porter atteinte à l'approvisionnement en eau potable (art 20 de la LFH-VS), « aux droits de tiers et aux

---

<sup>37</sup> On notera ici, à l'instar de l'Union Européenne, que la Suisse a libéralisé son marché de l'énergie permettant à de nouveaux opérateurs de venir s'installer.

<sup>38</sup> L'actionnariat d'ESR est constitué de 20 communes avec et autour de Sion.

<sup>39</sup> Cette loi vise, je cite « *a*) l'utilisation rationnelle des forces hydrauliques se trouvant sur le territoire cantonal en assurant un approvisionnement optimal en énergie dans le canton et en sauvegardant les intérêts de l'économie et de la protection de l'environnement; *b*) la continuation de la mise en valeur des forces hydrauliques disponibles, dans l'intérêt des communes, des groupements de communes et du canton; *c*) la délimitation des compétences à l'intérieur du canton dans le respect de l'autonomie des communes. » (Canton du Valais, 1990)

<sup>40</sup> En amont du Lac Léman, le Rhône appartient à l'Office Fédérale de l'Environnement (OFEN) et en aval de Genève, ces eaux sont gérés par le Canton de Genève.

concessions antérieures » (art. 45 de la LFH) et ne peut être « contraire à l'intérêt public ou à l'utilisation rationnelle du cours d'eau » (art.4 de la LFH, art. 20 de la LFH-VS).

La création de nouvelles infrastructures hydrauliques doit en outre respecter l'ensemble de la législation sur la protection de l'environnement, de la nature et des paysages. Sont concernées ici la Loi sur la Protection de l'Environnement (1987), la Loi de la Protection de la Nature et du Paysage (LPN,1966) ou encore la Loi de sur l'Aménagement du Territoires (LAT) et la Loi sur la protection des eaux (LEaux, 1991) (Reynard, 2000, Confédération Suisse, 2012). Il y a donc un cadre juridique et législatif clair à respecter lorsque l'on souhaite utiliser l'eau à des fins de production énergétique. Cette législation permet d'encadrer et de cibler les impacts sur l'environnement tout en proposant un compromis entre utilisation des cours d'eau et protection de l'environnement. Dans un contexte de changement climatique, cet aspect législatif sera appelé à être modifié et adapté pour coller au mieux aux nouvelles réalités.

### **5.2.3.1 Redevance**

Dans le droit suisse, la force hydraulique est considérée comme un bien public. Son exploitation nécessite une autorisation (la concession) et le versement d'une participation financière, la redevance hydraulique, aux communautés ayant concédés l'utilisation de cette force hydraulique, et ce, pour toute la durée de la concession (art. 54, LFH). Cette taxe est calculée en fonction de la « puissance théorique moyenne annuelle de la centrale de production considérée<sup>41</sup> » (Wyer, 2008). La redevance hydraulique s'élève pour l'ensemble de la Suisse à 400 millions de francs par an et 110 millions pour le Valais (soit pas moins de 14% des recettes fiscales du Canton et des communes concernée (Wyer, 2008). Les recettes de cette redevance sont donc un appoint important aux budgets de certaines communautés. La redevance hydraulique joue aussi un rôle considérable dans le budget des sociétés concessionnaires. Ainsi en 2011, Grande Dixence SA a dû s'acquitter de plus de 28 millions de redevance hydraulique, ou encore 113.080 francs pour l'usine de Sauterot Leteygon (ESR, 2011). A l'heure actuelle, cette redevance s'élève à 80 francs le KWh produit. Cette redevance sera sans doute appelée à être corrigée dans les années futures en fonction de la modification des capacités de production des centrales hydroélectriques.

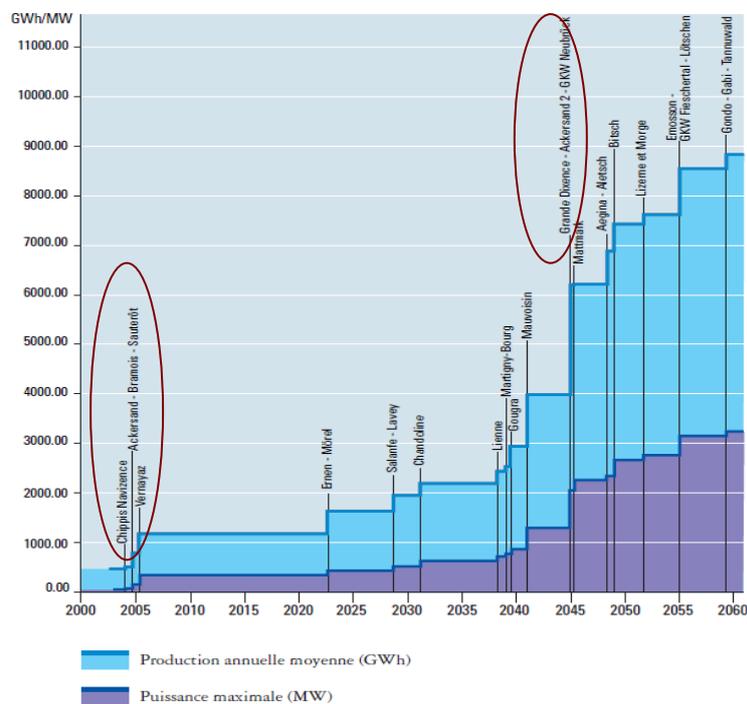
### **5.2.3.2 Droit de concession et retour de concession**

L'utilisation de la force hydraulique (et sa mise en valeur) en Valais Suisse nécessite l'octroi d'une concession autorisant l'utilisation de l'énergie de l'eau par un concessionnaire (Wyer, 2008). La durée de la concession prévue par la loi est de 80 ans maximum à partir de la mise en service (art. 49 de la

---

<sup>41</sup> La méthode de calcul est relativement complexe et se base en grande partie, pour les centrales au fil de l'eau et les centrales à accumulation, sur la hauteur de chutes et les débits utilisables. Ce qui pose des questions si l'on rencontre un modification des débits dans le contexte de changements climatiques.

LFH-VS) et donne un droit exclusif sur l'utilisation de la ressource. A la fin de la période de concession (le « retour de concession »), les installations hydrauliques reviennent dans le giron public (communes, cantons). Il en est de même pour les installations électromécaniques (turbines) sauf que celles-ci nécessitent le paiement d'une « indemnité équitable » au concessionnaire. Une fois ce processus accompli, les autorités publiques jouissent pleinement de cette force hydraulique. Aussi, les communautés disposant du droit de retour et souhaitant poursuivre l'exploitation des installations hydroélectriques ont trois possibilités : « exploiter elles-mêmes les installations hydroélectriques ; poursuivre l'exploitation en partenariat avec le concessionnaire précédent ou laisser un tiers poursuivre l'exploitation » (Wyer, 2008) ». La composante hydraulique des infrastructures représente un patrimoine considérable pour les communes puisque leur valeur est estimée à deux tiers voir trois cinquième de la valeur de l'installation complète. Elle représente donc une réelle richesse pour les régions de montagne et oblige les communautés concernées à anticiper le retour de concession et à rester vigilantes quant à l'état et l'entretien des installations durant cette période. Pour les trois complexes qui nous concernent, seul celui de Bramois-Seuterôt a bénéficié du retour de concession en 2005 et l'exploitation de celui-ci se poursuit en partenariat avec le concessionnaire précédent (Hydro-Exploitation). Pour l'usine de la Grande Dixence, le retour de concession est prévu en 2044 et pour celle de Seuterot en 2077 (OFEN, 2012).

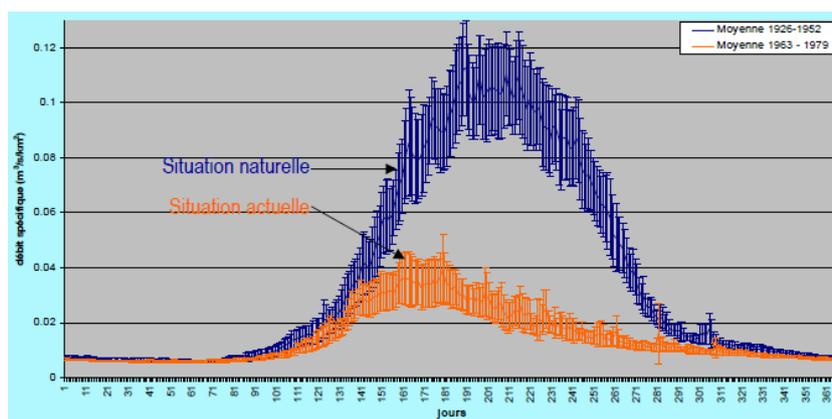


**Graphique 17: Retour de concession dans les 60 années à venir. Entourés en rouge, les usines de Bramois et de Grande Dixence. (Wyer, 2008)**

### 5.2.3.3 Débit résiduel et assainissement

La législation suisse impose des restrictions claires quant à l'utilisation du débit des cours d'eau, ainsi que des débits résiduels. Cela signifie que lorsqu'un ou des prélèvements sont opérés dans des cours d'eau à débit permanent » (Art. 31, LEaux<sup>42</sup>), il doit rester un débit résiduel. Il est calculé grâce au Q347 qui est « le débit naturel d'un cours d'eau atteint ou dépassé pendant 347 jours par an en moyenne » (OFEN, 2009).

Le débit résiduel représente l'eau qui persiste en aval d'un prélèvement effectué sur un cours d'eau naturel. Il doit permettre aux fonctions écologiques du cours d'eau d'être, en partie, préservées. Cette notion de débit résiduel interdit donc, en principe, de détourner l'ensemble des eaux d'une rivière mais oblige les utilisateurs à laisser une certaine quantité couler librement ( ProNatura, 2012). Ce débit est donc essentiel pour la faune et la flore aquatique<sup>43</sup> d'un point de vue esthétique et récréatif tout comme il est primordial pour éviter les conflits d'usage avec d'autres utilisateurs en aval (captage d'eau potable ou irrigation par exemple). Comme le dit très bien l'OFEV, « les prescriptions sur les débits résiduels constituent un compromis entre l'utilisation et la protection des eaux » (OFEV, 2012) et de préciser dans un autre rapport « Du point de vue de la protection des eaux, les quantités prélevées sont par conséquent trop élevées dans la plupart des cas<sup>44</sup> » (OFEV, 2009). Si l'on regarde l'hydrogramme ci-dessous, on constatera nettement l'influence des installations hydroélectriques sur le débit de la Borgne (au niveau de la prise d'eau de la Lulette) et la nécessité d'une législation régissant le débit résiduel minimum.



**Graphique 18 : Hydrogramme moyen annuel de la Borgne à la station de mesure de la Lulette entre 1925 et 1979. En bleu, le débit naturel de la Borgne (avant l'installation de la Grande Dixence) et en orange, le débit actuel résultant des prises d'eau (BG, 2005)**

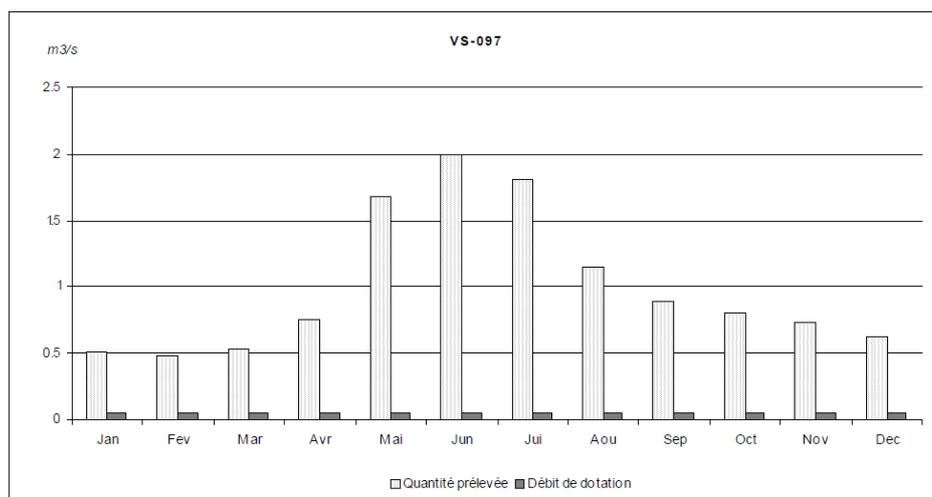
<sup>42</sup> La Loi sur la protection de Eaux (LEaux) a été soumise à une votation populaire en 1992. Elle fixe les débits résiduels minimaux pour les différents cours d'eau (BAFU, 2012).

<sup>43</sup> Viennent s'ajouter les effets néfastes rejets de STEP ainsi que les aménagements des cours d'eau.

<sup>44</sup> Selon l'OFEV « 90 pour cent des prélèvements sont importants, car ils entraînent le captage de plus de la moitié du débit minimal naturel » (OFEV, 2009)

Les prélèvements antérieurs à 1992 ne devaient pas respecter la LEaux (mais doivent se plier à de nouvelles directives d'assainissement pour fin 2012) tandis que les nouveaux prélèvements postérieurs à cette date, sont assujettis à la LEaux sur les débits résiduels. (mais peuvent être réévalués par les cantons en fonction des intérêts en présence). Enfin, la LEaux impose de faire un inventaire des prélèvements au sein des bassins versants présents dans chaque canton et propose un ensemble d'actions à mettre en œuvre pour assainir les cours d'eau concernés et cela pour fin 2012<sup>45</sup> (Bagnoud et al. 2006). En aval de la Grande Dixence, le débit résiduel de la Dixence doit être de 314.1 l/s et celui de la Borgne de 565.2 l/s au niveau de la prise d'eau de la Luette (Tribunal Fédéral Suisse, 2012). Pour la centrale de Bramois-Seuterot voici un graphe de ses prélèvements et de son débit résiduel obligatoire.

n° Carte des débits résiduels	VS-097	Q347 (l/s)	480	
Code cantonal	646.1	Droit d'utilisation	Concession	
Coordonnées, altitude	597550 / 113200	915	Fin droit d'utilisation	2005
Cours d'eau	Dixence	Remarque		
But du prélèvement	Centrale hydroélectrique			
Centrale	Bramois (groupes 1 à 4)			
n° WASTA	504000			



	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jui	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Débit amont prise (m³/s)												
Quantité prélevée (m³/s)	0.51	0.48	0.53	0.76	1.68	2.0	1.81	1.15	0.9	0.81	0.74	0.62
Débit de dotation (l/s)	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0

**Graphique 19 : graphe reprenant les informations nécessaires pour déterminer le débit résiduel après le turbinage dans la Centrale de Bramois-Seuterot. Le débit de dotation est la quantité d'eau nécessaire au maintien d'un débit résiduel déterminé après le prélèvement (Art. 4 LEaux) (Bagnoud et al.2006).**

<sup>45</sup> Ce système propose par exemple, aux sociétés d'hydroélectricité, de limiter la perte moyenne de production d'environ 2 % par an suite aux mesures d'assainissement ou à toutes autres mesures visant à améliorer la qualité du cours d'eau (crue artificielle par exemple ( Canton du Valais, 2005).

## 5.3 Typologie des centrales en présence

### 5.3.1 Les stations au fil de l'eau

Les centrales au fil de l'eau ne possèdent pas de capacité de stockage et sont donc dépendantes pour leur production électrique du débit du cours d'eau (Direction Générale de l'Energie et du Climat, 2010). Les centrales de ce type sont donc conçues pour absorber un certain débit (débit équipé) et n'ont donc pas la possibilité de stocker en quantité des masses d'eaux supplémentaires. Lors de forte pluviosité, l'eau excédentaire ne peut donc être mise à profit. Deux centrales de ce type se retrouvent sur le territoire du Val d'Hérens .

**La petite centrale de Sauterot-Leteygont**, d'une puissance de 4,7 MWh est la propriété de Leteygon SA (les actionnaires sont les communes d'Héremence et de Sion à 50% chacune) également membre d'ESR. Cet aménagement a été mis en service en 1977 et capte les eaux issue du Torrent du Louché et de la Dixence en aval du barrage de la Grande Dixence. Après être passée par la chambre de mise en charge, l'eau entre dans une conduite forcée pour se retrouver 574 mètres plus bas et alimenter une turbine avec une production pour l'année 2010-2011 de 20.716 MWh ( 20,7GWh) (avec respectivement 5919 MWh pour le semestre d'hiver et 14797 pour le semestre de printemps, (ESR, 2011). Les eaux, une fois turbinées, sont restituées dans le Dixence, juste en aval d'une des prises d'eau de la centrale de Bramois.

**La centrale de Bramois-Sauterôt** a été mise en service en 1915 pour alimenter, au départ, une aluminerie, fermée depuis. Aujourd'hui, les actionnaires sont Grande Dixence SA (29%), FMV SA (20%), la Commune d'Héremence (15.61%), la Commune de St-Martin (16.12%), la Commune de Vex (9.69%), la Commune du Mont-Noble (8.59%) et la Commune de Sion (0.99%). Dans un premier temps, les eaux de la Borgne provenant de la prise d'eau de la Luette sont partiellement turbinées dans la petite usine de Sauterot (puissance totale de 0,15 MW) et conduites par une galerie, avec les eaux de la Dixence et celles libérées par la centrale de Sauterot-Leteygon, jusqu'au bassin de compensation de Vex (par simple écoulement). Une conduite forcée amène ensuite l'eau à la centrale de Bramois, équipée elle de quatre turbines (pour une puissance totale de 27 MWh). Enfin, dans un dernier temps, les eaux restituées par la centrale de Bramois sont partiellement réutilisées par le Groupe 7 (puissance totale de 0,35 MW) avant d'être restituées dans la Borgne à hauteur de Sion. La production annuelle est de 98.5 GW (Hydro Exploitation, 2012). Cette infrastructure au fil de l'eau, possède un bassin de compensation journalière qui lui permet de se délester d'une partie de son eau en période de pointe pour ensuite être à nouveau rempli par les eaux provenant de le Borgne en périodes de plus faible demande.

### 5.3.2 La station à accumulation

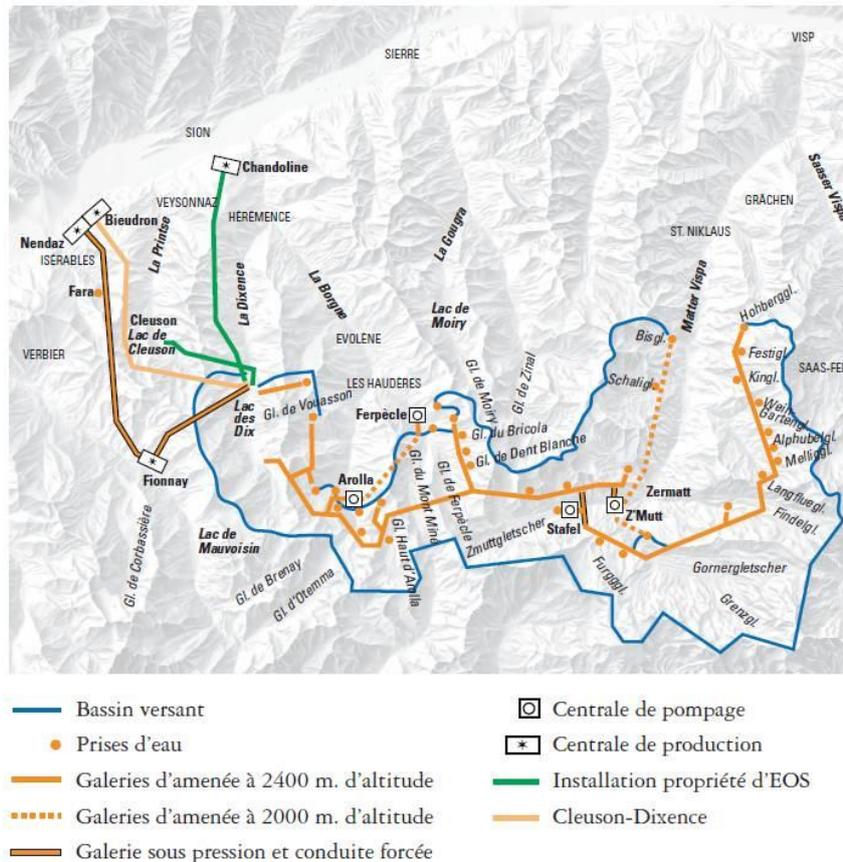
**L'installation de la Grande Dixence**, est une centrale à accumulation avec pompes d'alimentation. Son lac d'accumulation est alimenté par les torrents s'y jettent mais aussi, et surtout, par des prises d'eau situées dans d'autres bassins versants situés parfois en aval (Alpiq, 2011). L'eau est amenée par pompage via un réseau d'adduction et de canaux franchissant parfois des dénivelés importants, vers le bassin central d'accumulation ( le Lac des Dix). Ce type d'infrastructure n'est pas parfait en terme environnemental mais est un élément constitutif important du réseau électrique. Ce type de centrale permet en effet de couvrir les demandes lors de périodes de pointe (et de pomper lors de périodes creuses) tout en permettant un démarrage rapide (en cas de panne d'autres installations par exemple). Elles répondent donc en partie au problème récurrent du stockage de l'énergie (OFEN 2012).

La construction de la Grande Dixence s'inscrit dans le développement industriel de la Suisse après la seconde Guerre Mondiale. Rapidement le Val des Dix s'impose comme un projet à grand potentiel. Les travaux débutent en 1951 et se terminent en 1961. Le plus grand barrage poids au monde<sup>46</sup> (avec une contenance de 400 millions de m<sup>3</sup>)<sup>47</sup> sera pleinement opérationnel en 1965 (Burckhardt, 1972 et Grande Dixence SA, 2011). Propriété de la SA Grande Dixence, les actionnaires sont Alpiq pour 60 % et trois autres sociétés à parts égales, IWB, BKV FMB et Axpo AG, chacune avec 13%. Son actionnariat est donc en grande partie privé. A l'aide de quatre stations de pompage réparties entre le Val d'Hérens (Station de pompage d'Arolla et de Ferpècle) et le Matterhal (Station de Stafel et de Z'mutt), pas moins de 75 prises ( dans un grand bassin versant de 357 km<sup>2</sup>, avec une surface en glacé de 65%), d'une petite retenue d'accumulation sur la Printze (20 millions de m<sup>3</sup>), réparties au sein de 35 glaciers, l'eau parvient dans le lac des Dix à 2.364 mètres d'altitude. Une fois les millions de m<sup>3</sup> d'eau accumulés, l'eau est turbinée dans quatre usines réparties sur deux paliers. L'usine de Fionay située à 1486 m.Alt. avec une puissance installée de 320 MWh, turbine les eaux une première fois pour les rediriger vers l'usine de Nandaz 1000 mètres plus bas (équipée elle d'une puissance de 430 MWh). L'usine de Chandoline située à 493 mètres d'altitude (150 MWh de puissance) et celle de Bieudron située à 481 mètres d'altitude (1.200MWh de puissance), complètent l'installation avant de restituer les eaux au Rhône en contrebas.

---

<sup>46</sup> Son simple poids, 15 millions de tonne, suffit pour résister à la pression de l'eau.

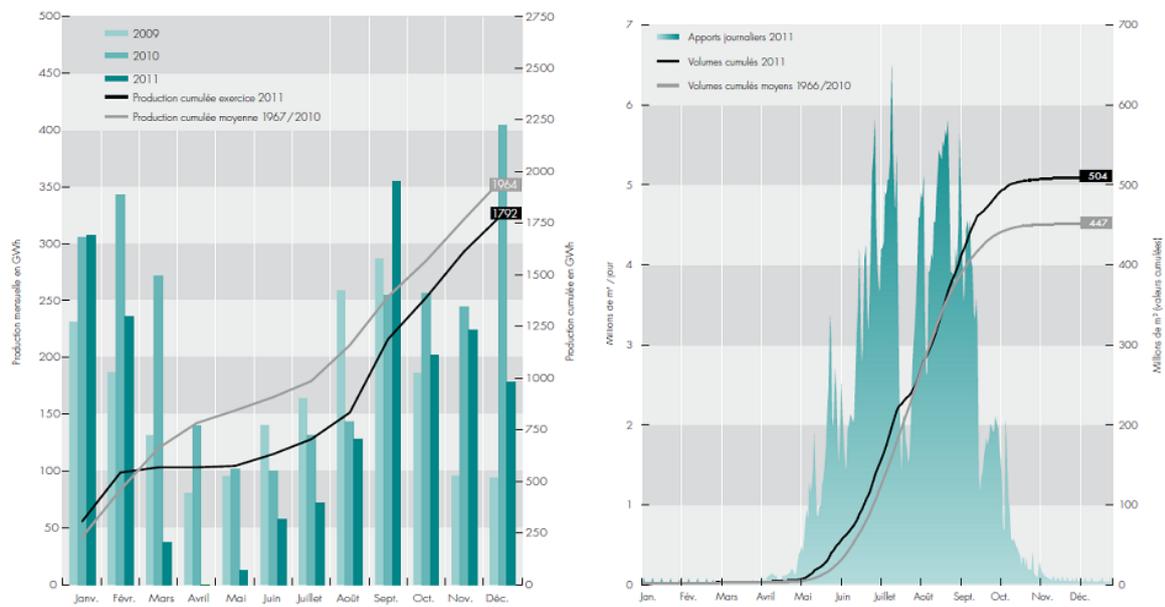
<sup>47</sup> A titre indicatif c'est l'équivalent du contenu de 160.000 piscines olympiques



**Figure 24 : Aperçu des infrastructures de la Grandes Dixence (Wyer, 2008)**

En 2011, la Grande Dixence a produit 1.792 GWh d'électricité, dont 1.166 GWh en hiver (2.695 GWh en 2010<sup>48</sup>). Durant l'année 2010-2011, 504,4 millions de mètres cubes d'eau (dont 304,5 millions par pompage) ont été amenés dans le Lac des Dix (396 GWh d'électricité ont été utilisé pour le pompage, ce qui représente 22% de la production totale, (Grande Dixence SA,2011). Pour être correct, on dira donc que la Grande Dixence a produit, en 2011, 1.396 GWh d'électricité. Notons, nous le préciserons par la suite, que la production est étroitement liée aux quantités d'eau disponible dans le lac de Dix et donc des volumes d'eau pompés dans les centrales de pompages et des prises d'eaux. Ces volumes disponibles varient au cours de l'année, en fonction des régimes hydrologiques et des conditions climatiques annuelles.

<sup>48</sup> Cette différence s'explique par la mise à l'arrêt entre mars en aout 2011 de la Grande Dixence.



**Graphique 20 ( de droite) : Volume des apports journaliers en eau dans le lac des Dix (Grande Dixence SA, 2011)**

**Graphique 21 (de gauche) : Energie livrée par les Grande Dixence, production mensuelle (Grande Dixence SA, 2011). Comme on le constate sur le présent graphique, la production est assez variable d'une année à l'autre voire sensiblement différente si l'on regarde les productions mensuelles interannuelles.**



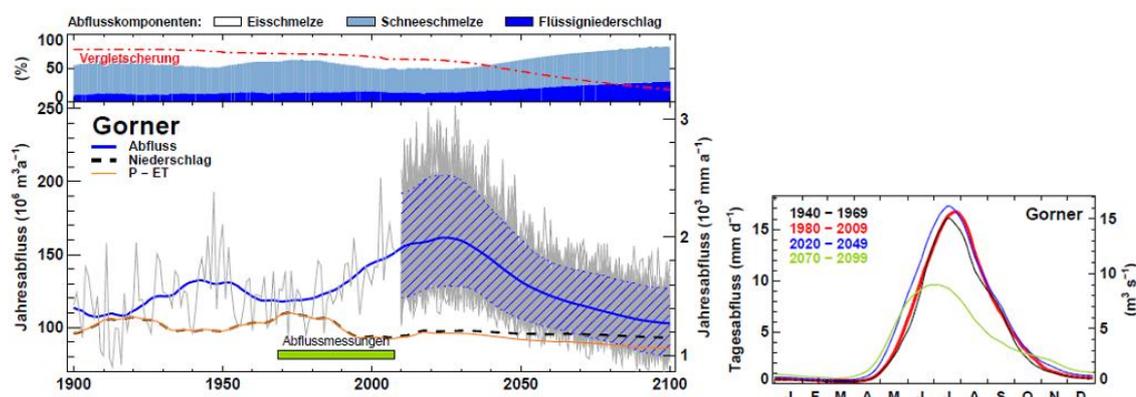
## **Chapitre 6 Hydroélectricité dans le Val d'Hérens : perspectives**

Après cet état des lieux de la situation hydroélectrique dans le Val d' Hérens, il est temps d'aborder les effets d'une fonte des glaciers sur l'efficacité des infrastructures hydroélectriques. Le débit et les régimes d'écoulement sont étroitement liés à la production hydroélectrique et davantage encore, dans le cas de bassins versants recouverts de glaciers, aux apports en eaux de type glaciaires et nivales. Les études menées sur cinquante-six bassins versants représentatifs de l'hydrologie suisse, montrent que les régimes hydrologiques se sont modifiés depuis l'apparition des premières mesures. Ainsi, les régions à fort englacement (comme le Val d'Hérens) ont connu une augmentation des débits hivernaux, printaniers et estivaux ainsi que des débits moyens annuels. Cette augmentation provient de la fonte nivale et glaciaire qui a lieu plus tôt, induisant la production d'eau de fonte en plus grande quantité.

### **6.1 Influence sur les complexes hydroélectriques du Val d'Hérens**

En ce qui concerne l'ensemble du bassin versant du Val d'Hérens (en ce compris la Dixence et la Borgne), il n'existe pas à l'heure actuelle de données prédictives quant à l'évolution du débit et du régime d'écoulement. Toute la difficulté réside dans la quantité de paramètres du bassin versant à prendre en compte et à introduire dans un modèle. Qui plus est, dans le cas du complexe de la Grande Dixence, les nombreuses prises d'eaux et les centrales de pompes complexifient encore la donne. Une série de mesures ont été effectuées sur plusieurs glaciers alimentant indirectement, via les stations de pompes ou de prises d'eau, le lac des Dix. Il s'agit des glaciers du Gorner, du Haut glacier d'Arolla et du glacier du Findel. Ces études, effectuées par l'Ecole Polytechnique de Zurich (EPFZ) pour le compte du Canton du Valais, des Forces Motrices Valaisanne ainsi que Alpiq, nous fournissent de précieuses informations. Elles représentent les premiers résultats d'une large série de mesures visant à déterminer les variations de débit et de régimes d'écoulement au sein d'autres glaciers ( sont en cours de mesures, les glaciers de Zmutt, Mont Miné, Ferpècle, Turtmann, Brunegg, Saleina, A Neuve, et du Trient (Alpiq, 2011). Sans pouvoir généraliser à l'ensemble des trente-cinq glaciers approvisionnant en eau la Grande Dixence (et dont dépendent indirectement les centrales de Bramois et de Sauterot), ces trois glaciers étudiés (ainsi que leur écoulement) nous indiquent les grandes tendances que connaîtront, à des degrés divers, les 32 autres glaciers concernés.

- Bassin versant du glacier de Gorner et de la Gornera



**Graphique 22 (gauche) : Evolution du débit et du régime d'écoulement pour le bassin versant de la Gornera (Glacier du Gorner). Dans la partie inférieure de la figure: débit annuel à la station de mesure de Gornera (prise d'eau de la Grande Dixence). La surface hachurée indique le domaine d'incertitude résultant des scénarios climatiques (voir chapitre 1, la ligne bleue représente le débit moyen lissé sur 30 ans, la ligne noire pointillée une moyenne lissée des précipitations, enfin, la fine ligne orange correspond à la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration. Dans la partie supérieure de la figure, le débit est subdivisé en parts alimentées par la fonte de la neige (en bleu clair), par la fonte de la glace (en blanc) et directement par la pluie (en bleu foncé). La ligne rouge en pointillée indique le taux d'engorgement du bassin versant (Bauder et Farinotti, 2011)**

**Graphique 23 (droite): Evolution du régime d'écoulement dans le bassin versant de la Gornera (glacier du Gorner) sur des périodes de 30 ans entre 1940 et 2099 (Bauder et Forinotti, 2011)**

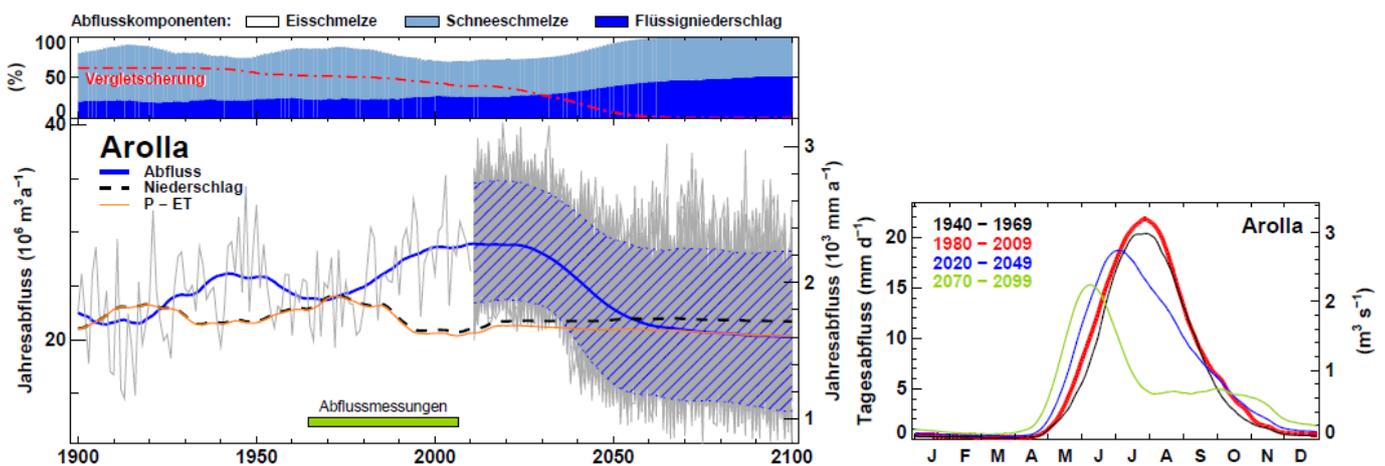
On distingue clairement une augmentation du débit moyen entamé à partir des années 1960 et ce jusqu'à aujourd'hui. Jusqu'en 2025, l'écoulement du glacier augmentera pour atteindre son optimum aux environs de 2030. Par rapport à la période de référence (en vert, 1980-2009), le débit augmenterait de 20% (Bauder et Farinotti, 2011). Dans le même temps, la contribution de l'eau de fonte au débit (plus de 50%) atteint aussi son maximum entre 2025 et 2030 et commence à baisser par la suite. Cette contribution diminuerait de 23% en 2070 par rapport à la période de référence. En outre, les scénarios climatiques prévoient une baisse des précipitations de 5% en 2100 (par rapport à la période de référence). L'évapotranspiration augmente mais dans des proportions faibles et sans impact significatif sur l'écoulement (Bauder et Farinotti, 2011). Comme l'illustre la figure de droite (à mettre en relation avec le graphe de gauche), l'augmentation des températures et la modification de la nature des précipitations vont entraîner une modification importante dans le distribution saisonnières des débits.

Pour la période 2020-2049, on note un léger glissement du pic du débit plus tôt dans la saison estivale, au même titre qu'une fonte précoce. Pour la période 2070-2099, on a une baisse significative du débit estival pour les mois de juillet-août-septembre (de l'ordre de 40 à 50% par rapport à la période de référence). Le pic de hautes eaux se situera fin juin-début juillet et une légère augmentation de l'écoulement en novembre ainsi qu'en avril et mai est constatée. La période d'étiage ne change pas significativement, elle est

légèrement décalée mais reste entre mars et avril. On notera qu'entre 2040 et 2060, le glacier de Gorner pourrait perdre 50% de son volume de glace par rapport à la période de référence et à la fin du siècle il ne devrait persister que 20 à 25% de ce volume de glace par rapport à la période de référence (Bauder et Farinotti 2011). Enfin, sous l'effet de la hausse des températures, la ligne d'équilibre pourrait monter de plus de 700 mètres passant de 3.300 mètres (avec une marge de 190) pour la période 1980-2009 à 3.980 mètres (avec une marge de 270 mètres) pour la période 2070-2099).

Au regard de cette évolution, on passera d'un régime d'écoulement à dominance a-glaciaire à un régime d'écoulement b-glaciaire pour la classification suisse. Il est important de préciser que cette classification sera appelée à être modifiée dans les prochaines décennies puisque les caractéristiques propre à chaque régime auront profondément été modifiées. La baisse de l'englacement diminuera de manière conséquente l'amplitude des débits entre les saisons.

- Bassin versant du glacier d'Arolla



**Graphique 24 ( gauche): Evolution de l'écoulement et des précipitations pour le bassin versant du Haut Glacier d' Arolla entre 1900 et 2100. Dans la partie inférieure de la figure: débit annuel à la station de mesure de Findelen (Grande Dixence). La surface hachurée indique le domaine d'incertitude résultant des scénarios climatiques (voir chapitre 1, la ligne bleue représente le débit moyennisé sur 30 ans, la ligne noire pointillée une moyenne lissée des précipitations, enfin, la fine ligne orange correspond à la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration. Dans la partie supérieure de la figure, le débit est subdivisé en parts alimentées par la fonte de la neige (en bleu clair), par la fonte de la glace ( en blanc) et directement par la pluie (en bleu foncé). La ligne rouge en pointillée indique le taux d'englacement du bassin versant (Bauder et Farinotti. 2011)**

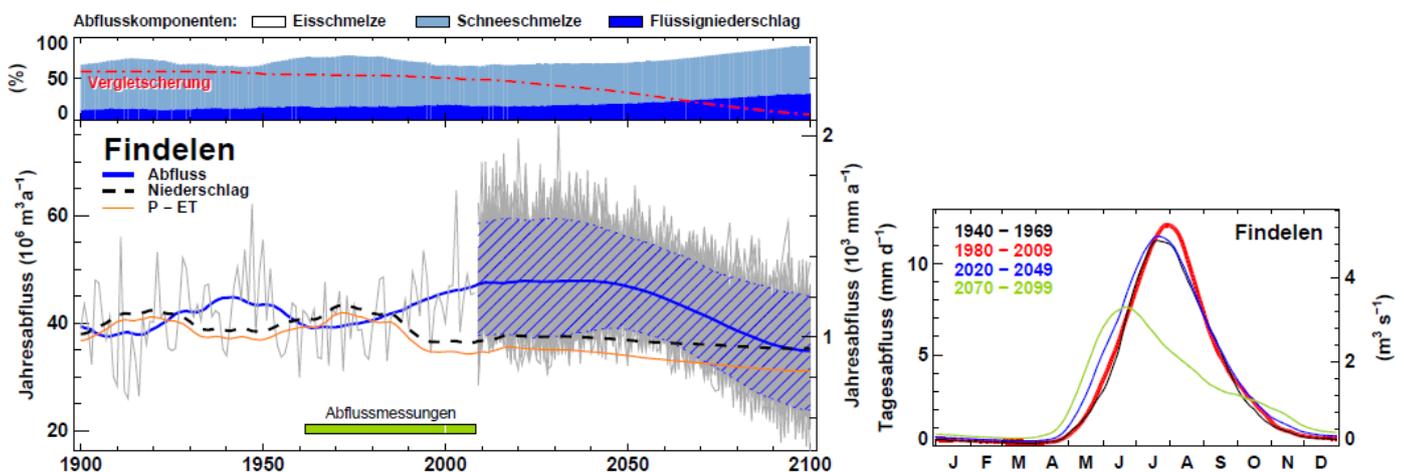
**Graphique 25 (droite): Evolution du Régime d'écoulement dans le bassin versant du Haut Glacier d'Arolla sur des périodes de 30 ans entre 1940 et 2099 (Bauder et Farinotti. 2011)**

L'augmentation de débit annuel moyen entamée à partir des années 1970 se poursuivra jusqu'en 2025 (optimum) avant de connaître une diminution importante entre 2025 et 2070 (baisse du débit moyen estimée à 40 % par rapport à la période de référence). La contribution de l'eau de fonte au débit ne

cesse de diminuer et devient quasiment nulle à partir de 2060 signifiant la disparition quasi-totale du glacier (Bauder, 2011). Les apports nivaux et pluviaux correspondront à la totalité du débit de la Borgne d’Arolla ( en extrapolant ces mesures au Bas Glaciers d’Arolla et au glacier de Tsijore Nouve). A partir de 2085 les apports nivaux et pluviaux seront de l’ordre de 50% chacun. Pour la période 2070-2099, les modifications du débit sont importantes lors de la période estivale, on note une baisse de 75% en août et de 45% en septembre des volumes d’eau écoulés. On a un glissement du pic saisonnier de juillet à juin et une augmentation du débit en avril et mai (s’expliquant par la fonte nivale précoce au printemps), il en est de même en novembre avec une augmentation des précipitations liquides et non plus solide. Pour le mois d’août la baisse du débit sera de l’ordre de 70 à 80% par rapport à la période de référence. L’évapotranspiration correspondra à plus ou moins 5% des eaux de ruissellement.

A partir de 2070, la composante glaciaire du bassin versant aura complètement disparu (le glacier avait une superficie de 12.7 km<sup>2</sup> en 2009). On quitte donc le régime a-glaciaire pour s’orienter vers un régime a-glacio-nival (2020-2049) suivi d’un régime de type nival alpin à la fin du siècle.

- Bassin versant du glacier de Findel



**Graphique 26 (gauche): Evolution du débit et du régime d’écoulement pour le bassin versant de du glacier de Findel. Dans la partie inférieure de la figure: débit annuel à la station de mesure de Findelen (Grande Dixence). La surface hachurée indique le domaine d’incertitude résultant des scénarios climatiques (voir chapitre 1), la ligne bleue représente le débit moyen lissé sur 30 ans, la ligne noire pointillée une moyenne lissée des précipitations enfin, la fine ligne orange correspond à la différence entre les précipitations et l’évapotranspiration. Dans la partie supérieure de la figure : le débit est subdivisé en parts alimentées par la fonte de la neige (en bleu clair), par la fonte de la glace ( en blanc) et directement par la pluie (en bleu foncé). La ligne rouge en pointillée indique le taux d’englacement du bassin versant (Bauder et Farinotti, 2011)**

**Graphique 27 (droite): Evolution du Régime d’écoulement dans le bassin versant du glacier de Findel sur des périodes de 30 ans entre 1940 et 2099 (Bauder et Farinotti, 2011)**

L'augmentation du débit entamé à partir des années 1970 se poursuivra jusqu'en 2020 (optimum) où il connaîtra un plafond durant vingt ans. Cette augmentation du débit sera de l'ordre de 9% par rapport à la période de référence. A partir de 2040 la diminution sera lente mais progressive. A la fin du siècle la baisse du débit sera de l'ordre de 20% par rapport à la période de référence. La contribution glaciaire au débit est de l'ordre de 25% en 2050 et atteindra 10% à la fin du siècle (Dupraz, 2011). La composante nivale dans le débit représentera environ 55% en 2050 et 20 % pour la composante pluviale. Les modèles laissent présager une baisse du débit pour la période 2070-2099 de l'ordre de 40 à 55% par rapport à la période de référence. C'est à partir de 2050 que le débit de pointe diminuera de façon importante et entamera un glissement de fin juillet début août vers la mi-juin Cette diminution sera de l'ordre de 40% par rapport à la période de référence. Les précipitations annuelles devraient connaître une baisse de l'ordre de 7% d'ici la fin du siècle (Bauder, 2011). Sur la même période l'évapotranspiration accentuera à la baisse, l'écoulement des eaux de ruissellement ( courbe orange)

Le volume de glace du glacier de Findelen diminuera de 50% durant la période 2035-2060 par rapport à la période de référence. D'ici la fin du siècle le glacier pourrait perdre près de 90% de son volume par rapport à la période de référence (Bauder, 2011).

Enfin, sous l'effet de la hausse des température, la ligne d'équilibre pourrait monter de plus de 700 mètres ( passant de 3370 mètres (avec une marge de +-150) pour la période 1980-2009 à 3960 mètres (avec une marge +- de 170 mètres) pour la période 2070-2099). Dans ce cas-ci également, on passe d'un régime a-glaciaire (période de référence) vers un régime b-glacio-nival pour la période 2070-2099.

Pour ces trois exemples, représentatifs des glaciers en présence pour le complexe de Grande Dixence, on constate les mêmes tendances même si les ordres de grandeurs sont quelque peu différents. Ces différences s'expliquent en grande partie par les caractéristiques propres à chaque glacier dont la surface d'englacement et l'altitude respective pour la zone d'accumulation, diffèrent. Par ailleurs, des données géomorphologiques tendent à expliquer le comportement de ces glaciers et leur régime d'écoulement (Bauder, 2011).

Néanmoins, on note une réduction généralisée des trois glaciers à la fin du siècle voire une disparition totale pour le Haut glacier d'Arolla suite à l'augmentation des températures et au retrait glaciaire. Le régime d'écoulement saisonnier est profondément modifié, induisant une baisse drastique de la composante glaciaire (Arnell et al.1999). Les changements sont particulièrement prononcés durant la période estivale (baisse ou absence de fonte glaciaire), au printemps, (fonte nivale précoce) et dans une moindre mesure, à l'automne (augmentation de l'écoulement). Les débits dans ces trois bassins versants atteindront en 2100 des niveaux inférieurs à ceux relevés début du XXème siècle (SSHL-

CHy, 2011)). La période estivale durant laquelle la fonte glaciaire est normalement maximale et la fin de période printanière durant laquelle la fonte nivale est maximale sont donc grandement modifiées.

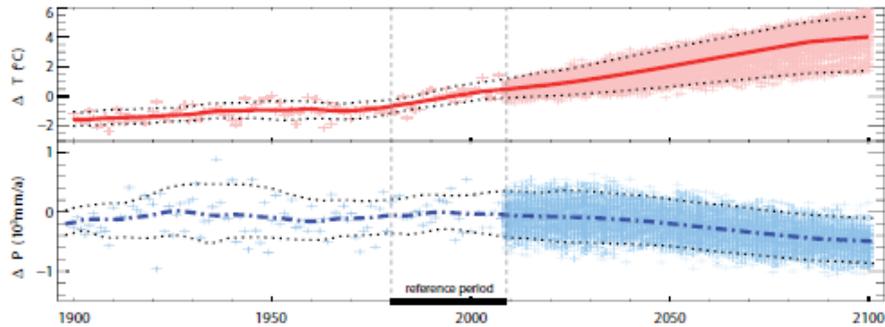
En guise de synthèse, pour le glacier Gorner, le débit maximal annuel a lieu au environ de 2025 avec une augmentation de l'écoulement de 20% par rapport à la période de référence mais baissera de 20 à 25% d'ici la fin du siècle. Pour le glacier de Findelen dont le débit maximal se situera entre 2020 et 2040, on note une augmentation de 8% du débit par rapport à la période de référence mais une baisse de 20% d'ici la fin du siècle (par rapport à la période de référence). Pour le glacier d'Arolla, le débit maximal est aussi annoncé pour 2025 (avec une augmentation de l'ordre de 5 à 10% par rapport à la période de référence). Entre 2025 et 2070 on notera une baisse de l'écoulement de l'ordre de 30 à 40% (Bauder, 2011). A partir de 2050, le bassin versant devient libre de glace et l'évapotranspiration augmente légèrement. On a donc une augmentation du débit entre 8 et 20% d'ici 2030-2040 pour les glaciers observés ici et une diminution du débit comprise entre 20 et 40% autour des années 2080.

Les différences entre les bassins versants, selon leurs altitudes et leurs taux de glaciation sont tout de même importantes. Pour les zones de haute altitude à fort englacement, les débits annuels augmentent fortement dû à la fonte plus importante des glaciers. Dans des bassins versant à plus basse altitude et moyennement englacés (Arolla par exemple) on note une augmentation transitoire variable du débit annuel, les débits annuels diminuent ensuite rapidement dès 2020-2030. (Pralong et al. 2011 ; Fankhauser et al. 2011). A moyen terme la tendance est positive pour les glaciers du Gorner et de Findelen mais négative pour Arolla. A long terme, la tendance est négative pour les trois glaciers.

## **6.2 Influence de différents facteurs climatiques**

### **6.2.1 Température**

La modélisation des températures effectuée pour les études ci-dessous, s'est basée sur les résultats du projet Européen ENSEMBLES (Mitchell et al. 2009) en utilisant des MCG et des MCR, tout en partant du scénario d'émission SRES A1B (Voir chapitre 2), avec comme référence la période 1980-2009.



**Graphique 28:** Graphe représentant en haut, l'évolution moyenne des températures par rapport à la période de référence et en bas, la somme des précipitations annuelles. Les croix rouges et bleues représentent les résultats des différents modèles. La ligne rouge représente l'évolution lissée des températures et la ligne bleue en pointillés représente l'évolution lissée des précipitations. Dans le cas des températures, on se trouve dans un intervalle probable de 1.7 à 4.4 c° pour 2090-2099, avec une valeur probable de 2.8 c° d'augmentation à l'horizon 2090-2099. (Bauder et al, 2011)

On constate une très nette corrélation entre l'augmentation des températures à l'horizon 2100 et la diminution drastique de l'englacement des glaciers concernés. Par ailleurs l'augmentation puis la diminution des débits sont étroitement corrélées à l'augmentation des températures.

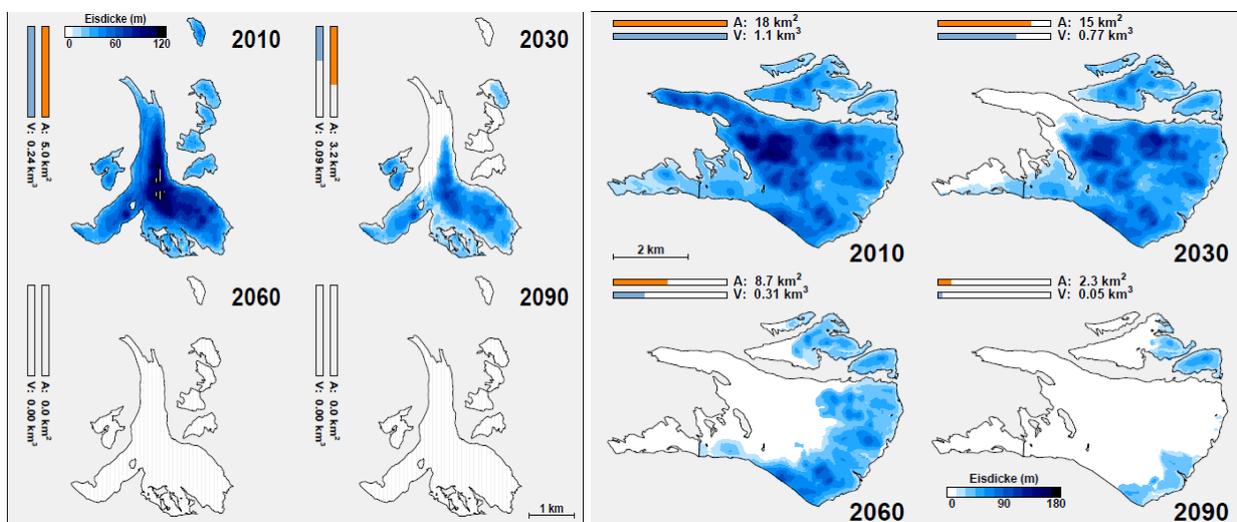
## 6.2.2 Précipitations

Dans la mesure où l'on assistera à une remontée de la limite pluie-neige due à la hausse des températures, une quantité moindre de neige sera déposée sur et aux abords des glaciers, diminuant le rôle « tampon » qu'elle peut jouer (Etchevers et al. 2002). Cela signifie que la part de la pluie dans les précipitations augmentera (au même titre que sa part dans les débits totaux). Dans l'ensemble des cas, on assiste à un moment de rupture aux environs de 2025-2030. Les débits commencent à diminuer, la part de l'eau de fonte glaciaire dans l'écoulement baisse elle aussi, laissant les eaux de fonte nivale et les eaux pluviales représenter la quasi-totalité de l'écoulement. L'enneigement (épaisseur et surface enneigée) des bassins versants concernés devient donc la source principale d'eau dans l'évolution des débits à la fin du siècle (Bavay et al. 2009). Parallèlement, la quantité de précipitations connaît une légère diminution à l'horizon 2100, expliquant en partie des journées plus sèches durant les mois d'été. (voir chapitre 1)

## 6.2.3 Des glaciers

La hausse des températures ainsi que certaines rétroactions, auront des répercussions sur la fonte glaciaire, particulièrement lors de la période estivale, où la fonte s'intensifiera à moyen terme et de manière transitoire. L'équilibre glaciaire sera donc complètement bouleversé, avec une remontée

importante de la ligne d'équilibre des glaciers provoquant une réduction constante de la zone d'accumulation (jusqu'à disparition dans le cas du Haut Glacier d'Arolla). A l'horizon 2090, la surface des glaciers diminuera de manière sensible laissant une place minime (voir nulle) à l'eau de fonte glaciaire dans le débit des cours d'eau concernés (Dupraz, 2011). Le rôle de réservoir ou de stock d'eau que représentent les glaciers concernés deviendra minime (Braun, 2005). Il existe aussi un moment de rupture au niveau de l'accélération de la fonte glaciaire, situé lui aussi aux alentours de 2025-2030, qui explique la baisse des débits annuels. En effet, avec la remontée en altitude de la ligne d'équilibre due à l'augmentation des températures, ce sont des volumes de glaces importants qui vont fondre faisant augmenter dans un premier temps les débits des rivières pour ensuite diminuer son apport dans l'écoulement.



**Figure 25 : Evolution de la surface, des volumes et de l'épaisseur de glace pour les bassins versants du Haut Glacier d'Arolla (à gauche) et du glacier de Findel selon les simulations établies par le programme ENSEMBLE (Bauder et al. 2011)**

Cette répartition des volumes de glace au sein des complexes glaciaires est variable d'un glacier à l'autre en fonction des différentes données géomorphologiques. Comme le montre les illustrations ci-dessus, le Haut glacier d'Arolla (à gauche) aura perdu 62% de son volume de glace en 2030 alors que celui de Findel ne perdra que 30% par rapport à 2010, année de référence. L'altitude à laquelle se situe les volumes de glaces les plus importants va donc avoir une influence prépondérante sur l'évolution des courbes de débits (Huss et al 2010) lors des quarante prochaines années (marquée par une fonte particulièrement importante).

Cette série de mesure vient compléter un projet de recherche, « Klimaänderung und Wasserkraftnutzung » ( « Les changements climatiques et l'utilisation de l'hydroélectricité ») dirigé par la Faculté de Géographie de l'Université de Berne (GIUB) et l'Institut Fédéral de Recherche sur la Forêt, la Neige et le Paysage. Son but: comprendre les effets des changements climatiques sur la force

hydraulique. Mener sur plus de vingt-cinq bassins versants bien définis, les résultats, établis dans douze rapports techniques, sont relativement corroborés même si les changements diffèrent d'un glacier à un autre.

Types de régimes d'écoulement	Rhone – Gletsch	Kraftwerk Göschenalp	Simme – Oberried	Kraftwerk Mattmark	Kraftwerk Gougri	Hinterrhein – Hinterrhein	Landquart – Klosters	Kraftwerk Oberhasli	Döschmabach – Davos	Mönchbach – Trittwald	Stützbach – Davos	Plessaur – Chur	Lötsch – Staurmauer	Taschnasbach – Gräsch	Minster – Euthal	Simme – Oberwil	Sitter – Appenzell	Sense – Thörishaus	Glätt – Herisau	Broye – Payerne	Töss – Nellenbach	Ergolz – Liestal	Birse – Moutier	Riale di Calneggla – Caviggno	Cassarate – Pregassona
a-glaciaire	HK	K																							
b-glaciaire	S1																								
a-glacio-nival			S1																						
b-glacio-nival		S1		S1		K	HK	K	H																
nivo-glaciaire				S1	S1			S1	K	K	K														
nival alpin		S2		S2				S2	S1	S1	S1	HK	K	H											
nival de transition					S2							S1		K	S1	H	HK	HK	S1						
nivo-pluvial préalpin															K	S1		HK	S1						
pluvial supérieur																				H					
pluvial inférieur																					H	HK			
nivo-pluvial jurassien																							K	H	
pluvial jurassien																								H	
nival méridional																									HK
nivo-pluvial méridional																									S1
pluvio-nival méridional																									HK
pluvial méridional																									S1

**Tableau 3: Vue d'ensemble des changements temporels de régime d'écoulement des bassins versants considérés pour l'ensemble des rapports techniques du projet « Les effets du changement climatique sur l'utilisation de la force hydraulique » (SSHL -CHy, 2011). En bleu, sont mis en évidence les bassins versants qui comportent un/ des changements de régime. On voit bien, dans les quatre premiers cas (les plus proche par leur régime d'écoulement à ceux rencontrés ci-dessus dans le Val d'Hérens) qu'il y a une modification du régime d'écoulement. Ce tableau nous montre bien que les régimes influencés par la fonte nivale sont tout autant concernés et se déplacent aussi d'une à deux places sur cette échelle.**

Le rapport de synthèse « Les effets des changements climatiques sur l'utilisation de la force hydraulique » qui porte sur plusieurs bassins versants englacés, nous donne quant à lui, les résultats suivants (SSHL-CHy, 2011) :

Les régions englacées du sud du Valais, connaîtront une diminution de 6 à 9% de leur débit moyen annuel en 2035, et de 10 à 12% pour 2085 (Pralong et al. 2011; Fankhauser et al. 2011). Dans la région de l'Oberhasli (Oberland Bernois) où les Forces Motrices d'Oberhasli exploitent la force hydraulique, une diminutions de 3% en 2035 et 7% en 2085 (en moyenne) du débit moyen annuel est programmée (Pralong et al. 2011). Pour le lac de Göschenalp, on prévoit une augmentation de 6% à 23% du débit pour les deux périodes selon le modèle hydrologique utilisé (Matériaux pour l'hydrologie de la Suisse, 2011). Pour la région du glacier du Rhône (Rhône à Gletsch) le modèle utilisé prévoit une augmentation de 13% pour la période 2035 (Bauder et al. 2010) puis une baisse drastique de son débit en 2085. Par rapport à une étude réalisée en 2006, sur onze bassins versants des

Alpes suisses<sup>49</sup> et deux scénarios climatiques (B2 et A2<sup>50</sup>, voir chapitre 2), et, qui prévoit une hausse du débit du Rhône à Gletsch de 12% pour la période 2020-249 et une baisse de 20% à 23% (scénarios B2 et A2) pour la période 2070-2099, on se trouve dans les mêmes proportions (Horton et al. 2006).

#### **6.2.4 Conclusion provisoire**

Il n'y a pas de conclusions définitives à tirer pour le Val d'Hérens. Les grandes tendances nous permettent d'avoir une idée plus ou moins claire de l'avenir, mais la complexité des infrastructures de Grandes Dixence nous empêche d'avoir des données plus exactes. La publication, prévue pour 2013, de nouvelles mesures sur d'autres bassins glaciaires viendra apporter de nouveaux éléments. On notera qu'à cela s'ajoute une certaine inconnue dans l'évolution exactes des modèles qui doivent encore être précisés grâce à de nouveaux Modèles Climatiques Régionaux. C'est pourquoi, des données générales établies à l'échelle de la Suisse seront utilisées pour tenter de déterminer l'impact de la fonte des glaciers sur la production d'électricité et cela de la manière la plus exacte possible.

### **6.3 Influence sur la production**

Dans l'ensemble, les résultats issus des études citées ci-dessus, montrent que les conditions pour la production d'énergie hydroélectrique se sont améliorées au fil du temps et ce, jusqu'à aujourd'hui. Selon des analyses menées sur différents cours d'eau Suisse (de petites et moyennes tailles), il ressort que les volumes annuels moyens n'ont pas significativement changés durant ces 50 dernières années excepté dans les cours d'eau au bassin versant englacé dans lesquels la disponibilité en eau est plus importante (les modifications climatiques, des précipitations plus importantes en hiver et plus faibles en été ont contribué à une plus grande régularité des débits durant les différentes saisons (Hanggi et al., 2012).

Pour avoir une production d'électricité optimale au sein d'un aménagement hydroélectrique, il faut tenir compte du « débit de captage » qui va dépendre du « dimensionnement des captages, du régime d'écoulement du cours d'eau ainsi que du débit résiduel minimum à respecter » (SSHL -CHy, 2011). Dans les zone de hautes altitudes, les débits de pointe sont plus précoces au printemps, ce qui provoquera un affaiblissement des débits en été et une augmentation en hiver avec, à long terme, une diminution des débits annuels moyens.

---

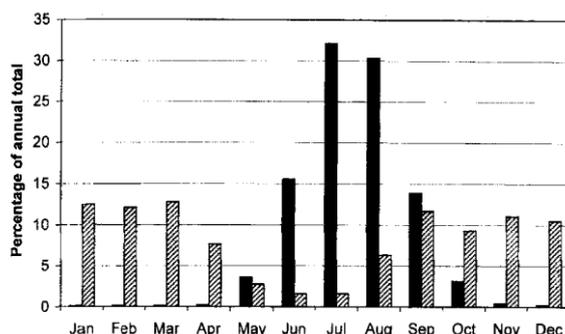
<sup>49</sup> 11 bassins versant variés présentant des surfaces englacées entre 0 et 50%, des altitudes moyennes entre 1340 et 2940 mètres d'altitude et 7 types de régimes hydrologiques

<sup>50</sup> B2 propose un réchauffement moyen global de +2.4°C à +2.8°C, et le scenario A2 une augmentation entre +3.0°C et +3.6°C des températures à l'horizon 2070-2099

Le débit de captage augmentera dans les prochaines années en dépit d'un affaiblissement du débit annuel moyen. Les centrales au fil de l'eau (Bramois-Sauterot et Sauterot pour le Val d'Hérens), dans l'impossibilité de stocker l'eau, connaîtront une production électrique en augmentation, en raison d'un débit de captage plus régulier sur l'année.

Selon les chiffres fournis par l'Office Fédéral de l'Environnement en 2007 (OFEN, 2012), c'est à une perte de production de l'ordre de 7% en 2035 pour l'exploitation de la force hydraulique qu'il faut s'attendre. Néanmoins, le projet de recherche mené par l'Université de Berne, projette lui, une hausse de la production de 1,9% (700GWh/an) pour 2050 (OFEN 2012). Si l'on se base sur une publication réalisée en 2000 « Modelling the Potential Effects of Climate Change on the Grande Dixence Hydro-Electricity Scheme, Switzerland », Westaway, 2000), les chiffres sont nettement plus nuancés.

En ce qui concerne la Grande Dixence, rappelons que 90% de l'eau de fonte parvient dans le lac des Dix durant les mois d'été (voir graphe) Pour modéliser l'impact de la fonte des glaciers sur la production d'hydroélectricité, Westaway s'est basé sur les variations du volume d'eau dans la retenue. Des éléments tels que l'écoulement, la température, ou encore l'évaporation ont été introduits dans son modèle prédictif pour la période 2031-2060 à l'aide de données provenant d'un modèle climatique global (Global Circulation Model). Par ailleurs, des données non-climatiques, telles que l'évolution démographique, le rendement des turbines ou encore la surface de la retenue, ont aussi été intégrées<sup>51</sup>.

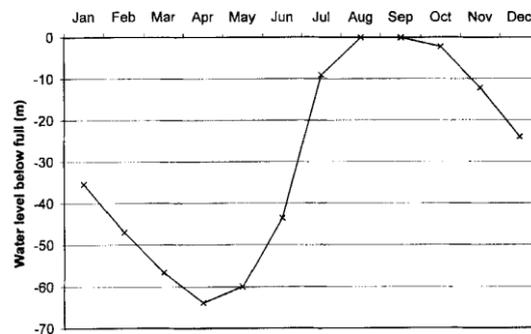


**Graphique 29 : Distribution des arrivées d'eau (en noir) par rapport à la production hydroélectrique (en hachuré) (Westaway, 2000).**

Que ressort-il de ces données? Les entrées d'eau dans le lac se concentrent entre juin et septembre, le reste de l'année les arrivées sont négligeables. Les sorties d'eau pour le turbinage se répartissent sur l'ensemble de l'année avec des maximums durant les mois d'hiver et un minimum durant l'été. Sur la période de mesure (1982-1996) le lac des Dix a toujours été rempli, en moyenne, à son maximum

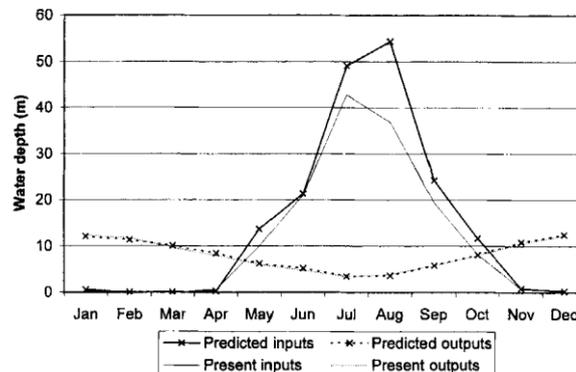
<sup>51</sup> Ces éléments montrent que des aspects non climatiques, peuvent aussi intervenir dans la sensibilité de l'infrastructure hydraulique.

entre août et septembre. Par contre, pour les autres mois, le niveau minimum du réservoir a diminué, passant de -65 mètres à -70 mètres ( par rapport au niveau de remplissage maximum).



**Graphique 30: Niveau moyen mensuel du lac des Dix pour la période 1982-1996 (Westaway, 2000)**

On note une augmentation significative de plus de 35% des apports d'eau annuel durant l'été (en tenant compte des modifications liées aux ruissellements, aux précipitations, etc), tandis que dans le même temps, les sorties d'eau annuelles pour les turbinages n'augmentent que de 2%. Cela signifie un apport d'eau supplémentaire lorsque le barrage est déjà à son maximum durant les mois d'été, avec une opportunité de turbinage supplémentaire (figure ci-dessous).



**Graphique 31: Prédiction des entrées et sorties dans le lac des Dix selon le modèle HadCM2. ((Westaway, 2000)**

Il ressort donc, en intégrant l'ensemble des paramètres (une augmentation de la température moyenne de 1.4 C° et une augmentation des précipitations annuelles de 2,6%) que la production annuelle de Grande Dixence pourrait théoriquement augmenter de 25,6% (entre 2031 et 2090 par rapport à la période de référence 1961-1990 (SSHL-CHy, 2011; Westaway, 2000). On rencontre ici la limite de ce modèle, puisqu'il est établi à partir de nombreuses constantes physiques, mais aussi des constantes extrapolées à partir des données non-climatiques. Nous savons aujourd'hui que les données utilisées sont sous-évaluées et ces hypothèses, aussi juste soient-elles, devront être revues sur une échelle

temporelle plus courte (la fonte des glaciers liée à celle de la hausse des températures étant par exemple plus rapide que celle programmée en 2000) avec davantage de précision (fournie par des MCR plus précis par exemple). Cela nous donne malgré tout, une évaluation et une estimation de cette évolution globale.

Si l'on se réfère à l'étude menée par l'Université de Berne ainsi qu'aux données analysées plus haut, on peut réaffirmer que l'altitude, le degré d'englacement ainsi que l'évolution des précipitations influenceront la production hydroélectrique de façon importante vers la fin du siècle, même s'il est délicat de faire des prévisions précises. Le rapport de synthèse « Les effets du changement climatique sur l'utilisation de la force hydraulique » précise encore : « Jusque dans l'avenir proche (2035), seuls de petits changements sont attendus (Hingray et al. 2007). Ils sont plutôt légèrement négatifs au sud et à l'est du Valais, mais il faut compter ici avec des incertitudes de  $\pm 10\%$ . Par contre, dans les régions situées à plus basse altitude (Préalpes centrales et orientales), les changements s'inscrivent entre 0 et 9% dans le domaine positif. Dans l'avenir lointain (2085), les tendances pour les régions de haute altitude du sud et de l'est du Valais sont négatives. Il faut compter avec des pertes moyennes de production de 4 à 8%, mais même dans des cas extrêmes, les changements ou pertes calculés n'atteignent guère plus de 20% »

#### **6.4 Influence sur les débits résiduels et les centrales au fil de l'eau du Val d'Hérens**

Comme nous l'avons vu précédemment, c'est la Loi sur la protection des eaux (LEaux) de 1991 qui régit et fixe les débits résiduels minimaux et fixe certaines exceptions. Lors de la révision de LEaux en 2011, des nouvelles exceptions (octroyées par les cantons) ont été autorisées, permettant de diminuer quelque peu les pertes de production inhérentes aux débits résiduels minimaux. En 2003, le Conseil fédéral Suisse estimait que la disposition relative aux débits résiduels entraînerait un manque à gagner de production de 1.800 GWh par an jusqu'en 2070. En 2011 l'OFEN publiait une fiche technique et confirmait ces informations tout en précisant que l'octroi de dérogations de 1991 et 2011 (gain de 200 GWh/an pour les deux) permettrait de compenser une perte de production de 1.400 GWh/an en 2050. On peut sans aucun doute affirmer qu'il y aura à l'avenir des tensions entre les défenseurs de l'environnement (WWF, 2011) soucieux de respecter un débit minimum en tout temps pour la faune et la flore, et les producteurs d'hydroélectricité désireux de minimiser la baisse des débits et leurs impacts sur la production d'électricité (mais aussi de rentabiliser les infrastructures hydrauliques). Il s'agira avant tout d'un choix politique et économique que les gestionnaires publics devront anticiper, notamment avec les retours de concessions, dans une perspective de gestion intégrée des bassins versants.

Etant donné l'étroite dépendance des stations au fil de l'eau du Val d'Hérens à l'égard de Grande Dixence, il y a fort à parier que les débits résiduels ne changeront pas significativement. Néanmoins, en ce qui concerne la centrale de Sauterot, qui bénéficie de prise d'eau complémentaire sur plusieurs torrents, elle pourra voir sa production annuelle augmenter grâce à un débit moyen annuel plus régulier au niveau de ses captages (une partie des apports dépendant d'un régime nival amené à être revu avec les modifications climatiques). La centrale de Bramois-Sauterot, dépend elle plus largement des débits résiduels issus de Grande Dixence, même si elle aussi bénéficiera des apports d'eau complémentaires plus réguliers provenant des torrents (grâce à la fonte nival précoce et à l'augmentation des précipitations en hiver notamment) se jetant dans la Borgne et la Dixence, augmentant le débits annuel moyen. On devrait dès lors, avoir une augmentation de la production à moyen terme.

## **6.5 Influence sur les installation et les apports en sédiments**

Les changements climatiques, comme nous l'avons vu, auront une influence sur les débits et les régimes d'écoulement. Ce dont on parle moins souvent ce sont des impacts possibles sur les infrastructures d'une modification du charriage, c'est-à-dire des sédiments, alluvions ou autres matières en suspension présents dans l'eau. Le transport de sédiments peut endommager les infrastructures (photo en annexe 3) et générer un alluvionnement des retenues d'eau.

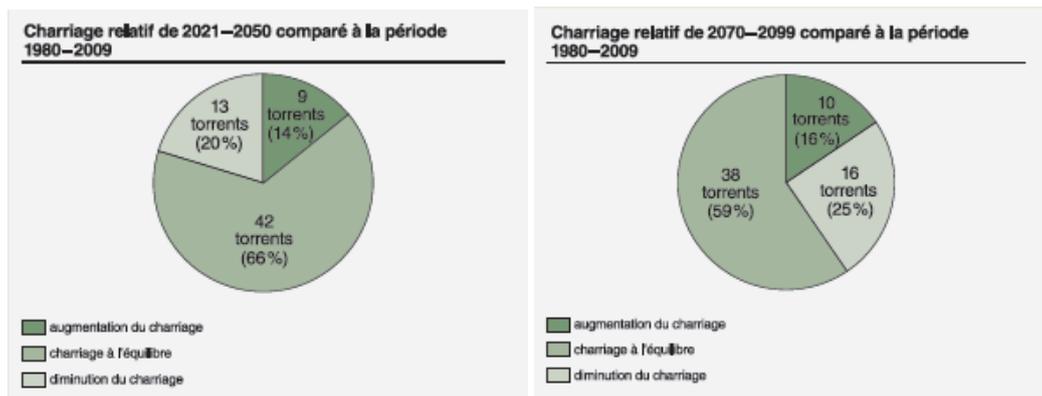
Ces matières en suspension majoritairement diluées dans des eaux d'origine glaciaires<sup>52</sup> et nivales, dans une moindre mesure, proviennent du frottement du glacier sur son substrat rocheux, de l'abrasion de la roche par les torrents en été ou encore de l'érosion des moraines résultant du retrait glaciaire. Les particules en suspension transitant dans les retenues d'eau, se décantent petit à petit donnant aux lacs glaciaires leur couleur verte (on parle aussi de lait glaciaire). Les barrages agissent comme une barrière face au transport de matières solides ce qui rend l'alluvionnement des retenues inévitable provoquant lentement une diminution du volume d'eau exploitable (environ 1% de perte de volume par année, (Zapa, 2011).

Soixante-cinq torrents dont trente-six captés par la Grande Dixence, ont été étudiés par le projet « Les effets du changement climatique sur l'utilisation de la force hydraulique ». Ce qui ressort comme résultat c'est que la diminution des débits moyens liés au changement climatique entraînera pour près de la moitié des torrents étudiés, « une réduction du volume solide transporté par charriage, particulièrement pendant la période de 2070 à 2099 » (SSHL-CHy, 2011). En outre, on note des changements dans la répartition saisonnière du transport des matières solides: aujourd'hui, les

---

<sup>52</sup> Lorsque les eaux du glacier se chargent en particules, on parle parfois de « farine glaciaire », terme qui s'explique par l'aspect « laiteux » de l'eau

matériaux sont charriés essentiellement entre juillet et août. A l'avenir, le pic se déplacera plutôt vers le début de l'été, suivant par-là la modification du régime d'écoulement. Les bassins versants concernés par un pic de charriage au printemps, verront ce dernier se déplacer vers l'hiver (Glasey et al. 2010 ). Lors d'épisode de fortes précipitations, il faudra s'attendre à un transport massif de sédiments (photo en annexe 4).



**Graphique 32 (gauche): Changements du transport solide par charriage dans les soixante quatre torrents étudiés pendant la période 2021 – 2050 par rapport à la période de référence 1980 – 2009. « Les chiffres et les pourcents indiquent le nombre de torrents. Davantage de transport solide par charriage correspond à plus de 120 % des quantités charriées, moins de transport à moins de 80 % (par rapport à la période de référence). Un transport égal signifie que les quantités charriées sont entre 80 % et 120 % de celles de la période de référence ». (Matériaux pour l'hydrologie de la Suisse, 2011).**

**Graphique 33 (droite): Changements du transport solide par charriage dans 64 torrents étudiés pendant la période 2070 – 2099 par rapport à la période de référence 1980 – 2009. « Les chiffres indiquent le nombre de torrents. Davantage de transport solide par charriage correspond à + de 120 % des quantités charriées de la période de référence, moins de transport à - de 80 % de la période de référence. Un transport égal signifie que les quantités charriées sont entre 80 % et 120 % de celles de la période de référence ». (SSHL-CHy, 2011).**

Par conséquent, d'ici la fin du siècle on assistera plutôt à une diminution ou un équilibre des volumes charriés parallèlement à la diminution des débits (Collins et al.2007). S'ajoute à cela des incertitudes quant à l'évolution des conditions locales ainsi que des précipitations à venir. Il est donc difficile de prévoir l'évolution exacte du transport de matériaux<sup>53</sup>.

<sup>53</sup> On notera que la modification de la végétation (rôle protecteur dans les processus d'érosion) ainsi que la fonte du permafrost pourra augmenter la quantité et les types de matériaux charriables à l'avenir.

## 6.6 Possibilités d'adaptation

L'utilisation et l'exploitation de la force hydraulique représentent une importance majeure dans la production électrique de la Suisse<sup>54</sup>. Comme nous l'avons vu, cette exploitation et la production qui y est liée, sont dépendantes et étroitement liées aux régimes d'écoulements et à la modification des conditions climatiques. Au regard des différents impacts possibles et probables, il s'agit de trouver des solutions novatrices pour minimiser voire mettre à profit ces changements. Voici quelques éléments de réponse.

Pour mieux comprendre, appréhender et préciser les impacts potentiels de la fonte des glaciers, il s'agira d'affiner les scénarios climatiques à l'échelle locale et de prendre en compte les nombreux effets qui en découlent (couverture de certains glaciers par des débris, effets de glissement des glaciers, fonte du permafrost, etc.) (Guyer et al. 2007) Il faudra aussi pouvoir, à l'avenir, tenir compte des nouveaux risques potentiels liés à ces changements morphologiques au niveau de la sécurité des installations hydroélectriques. Une surveillance renforcée des barrages sera sans aucun doute nécessaire (OFEN, 2012). D'un point de vue global, l'évaluation des demandes en électricité à moyen ou long terme est difficile à évaluer d'autant plus que l'évolution des conditions climatiques jouera une grande influence. Des étés caniculaires entraîneront probablement une demande accrue en climatisation tandis que des hivers plus doux influenceront la demande à la baisse pour les chauffages domestiques électriques (OFEN, 2012). Il s'agit donc pour les autorités publiques de mettre en place des mesures politiques visant une utilisation rationnelle de l'énergie dans la société suisse. Par rapport au débit résiduel, les changements prévus dans les régimes d'écoulements (modification du Q347) nécessiteront à moyen terme une révision de la législation en vigueur pour la dotation de débits résiduels dans les cours d'eau (LEaux ; OFEN 2012). Dans le même ordre d'idée, les procédures liées à l'octroi de concessions (ou le renouvellement de celle-ci) devront intégrer la modification de ces paramètres et mettre en place des plans de gestion permettant de garantir un équilibre entre l'ensemble des acteurs des bassins versant concernés.

Par rapport à la modification des apports en sédiments, il s'agira de renforcer les équipements en présence, notamment les conduites d'eau et les turbines. Afin de maintenir un écoulement le plus normal possible des matières en suspension et d'éviter un alluvionnement, il pourra être envisageable d'effectuer un brassage des eaux avant le turbinage. La mise en place de nouveaux bassins de décantation en aval des prises d'eaux devra aussi être envisagée. Par ailleurs, les purges, destinées à éliminer les sédiments des retenues (effectuées une fois par an pour les bassins de compensation de Z'Mutt et Ferpècle en été) et provoquant un apport massif en sédiment dans l'environnement, devront

---

<sup>54</sup> Il est à noter que la Suisse a décidé de sortir du nucléaire d'ici 2034. L'hydroélectricité prendra donc une importance grandissante à terme.

elles aussi être adaptées aux nouvelles données climatiques. Les exploitants d'ouvrages devront donc tenir compte, dans un premier temps, d'une usure accrue et de coûts supplémentaires destinés à l'entretien des infrastructures. (Wyer, 2008). Face à ces constats, des travaux complémentaires pourront, en outre, être entrepris pour redimensionner les capacités de production afin de correspondre au mieux aux nouveaux paramètres en présence (débits, demande en énergie). Le rehaussement de certains ouvrages pourra peut-être être envisagé comme c'est le cas pour le barrage de Grimsel pour permettre une plus grande capacité de stockage. A cela s'ajoute, la question du renforcement des retenues en cas de contenance supplémentaire dans les lacs de retenues. Pour le cas de Grande Dixence, on citera le projet d'installation d'une nouvelle centrale de pompage dans la plaine du Rhône jusqu'au lac des Dix, permettant d'augmenter l'efficacité du barrage dans sa fonction d'apport de pointe (Grande Dixence SA, 2011).

On le voit, l'adaptation de la production hydroélectrique couvre un large spectre, que ce soit en terme de nouvelles connaissances ou de nouveaux travaux à entreprendre. Il ne faut néanmoins pas oublier que l'adaptation face au changement climatique, concernera l'entièreté de la société et doit s'inscrire dans une vision globale. On ne peut donc pas cloisonner uniquement de manière sectorielle les nouveaux efforts à fournir.

## Conclusion

L'objectif essentiel du présent mémoire, à l'aide d'un exemple dans le Val d'Hérens en Suisse, a été d'illustrer les impacts de la fonte des glaciers alpins sur les services écosystémiques liés à l'eau. Cette illustration s'est accompagnée d'une mise en perspective de l'évolution des glaciers à travers le temps, l'espace et les différents territoires du Val d'Hérens.

Si la fonte des glaciers dans les Alpes et le retrait qui y est lié illustrent bien une réalité concrète, celle d'un changement climatique à l'œuvre, le questionnement quant aux conséquences d'avenir de ces phénomènes reste ouvert. Cette fonte ne représente pourtant qu'une partie des processus enclenchés dans les régions de montagne et susceptibles d'influencer les bénéfices qu'en retirent les habitants.

Nous avons donc cherché, dans un premier temps, à mettre en évidence la variabilité naturelle et anthropique du climat. La diminution quasi généralisée des bilans de masse ces trente dernières années, nous indique clairement la présence de changement dans les paramètres atmosphériques. L'augmentation de la température et les variations des flux d'énergie à la surface des glaciers, expliquent en grande partie cette évolution. Par ailleurs, des données telles que l'exposition et l'altitude sont également à prendre en compte. Ainsi, si les tendances sont évidentes à l'échelle des Alpes, on retrouve un grand nombre de contextes régionaux et locaux différents. C'est pourquoi l'étude du Val d'Hérens en Suisse, permet de mettre en évidence ces possibles effets sur une aire bien délimitée.

Les prévisions climatiques nous indiquent une modification importante de la température de l'ordre de 3°C à l'horizon 2085. Cette hausse de température engendrera une élévation de la limite pluie-neige avec des conséquences sur la qualité et la quantité de l'enneigement en montagne. Les précipitations connaîtront une redistribution saisonnière, mais sans connaître de grands changements au niveau des quantités. Les hivers seront plus humides et les étés plus secs, marqués par des épisodes extrêmes (sécheresses ou pluies intenses). Les effets des changements climatiques sur les précipitations modifieront les régimes hydrologiques des rivières alpines, régimes essentiels à l'ensemble des utilisateurs d'un bassin versant. A court et moyen terme, les débits augmenteront dans les zones fortement englacées induisant un écoulement supplémentaire. A plus long terme le régime glaciaire et glacio-nival, caractéristique des régions à fort englacement comme le Val d'Hérens, auront quasiment disparu laissant place à un régime nivo-pluvial. On assistera à une modification saisonnière des débits, les étiages auront lieu à la fin de l'été et non plus en hiver et la disponibilité en eau sera soumise, globalement, à de plus fortes variations.

La notion de service écosystémique, établie officiellement par le Millinium Ecosystem Assessment (MEA) puis utilisée dans la Classification Internationale Commune des Services Ecosystémiques (CICES) ou dans la Classification de l'Office Fédérale Suisse de l'Environnement (FECS), nous a permis de montrer l'importance de l'eau et des services qui y sont liés. Ces services, et l'ensemble des composantes biotiques et abiotiques des régions alpines, nous donnent l'opportunité de montrer à la fois la vulnérabilité et l'interdépendance de ceux-ci avec le bien être-humain. Ce concept nous montre également que l'évolution du climat et des glaciers ne peut être envisagée indépendamment des contextes locaux. Le changement climatique fait peser de fortes contraintes sur la ressource en eau, qui plus est dans un contexte où les attentes de la société à l'égard des services rendus par l'eau augmentent.

A regarder les écosystèmes alpins de plus près, on constate qu'ils ne font pas exception à la règle. Les glaciers des Alpes, témoins des changements globaux, nous rappellent bien l'urgence climatique. Il est donc primordial de cerner les menaces pesant sur les services écosystémiques fournis par les glaciers et ceux découlant de leur fonte, afin d'adapter les politiques publiques. Dans une grande partie des Alpes, les glaciers sont une source importante d'eau et toute modification sur la quantité et la qualité de l'eau aura une influence sur de nombreuses personnes. Le cas du Val d'Hérens, avec les interactions qui s'y déroulent au sein du triangle Glaciers-Eau-Habitants, en est un bon exemple.

Le cas du Val d'Hérens, en raison de sa délimitation précise, de la présence de plusieurs glaciers et d'un important complexe hydroélectrique, explique le choix de celui-ci comme étude de cas. La gamme de services écosystémiques remplis par les glaciers alpins, est appelée à se modifier, et la gestion de l'eau pour les infrastructures hydroélectriques en est un bon exemple. En effet, une partie de l'économie alpine et son versant énergétique sont liés à l'hydroélectricité. Avec 30% de son électricité d'origine hydraulique, la Suisse est fortement dépendante des apports en eau pour son approvisionnement énergétique.

La fonte des glaciers alpins, imputable au réchauffement climatique provoquera, à court et moyen terme, des effets bénéfiques au niveau de la production hydroélectrique pour certaines installations tributaires d'un apport d'eau glaciaire. L'augmentation de la disponibilité en eau de fonte provoquera une augmentation du débit, tout profit pour les centrales à accumulation, telle la Grande Dixence, capable de stocker d'importantes quantités d'eau. Par contre, les centrales dont les apports en eau proviennent de glaciers situés à des altitudes plus faibles et sujets à une fonte plus rapide, connaîtront une baisse de production. Cette modification dans la quantité d'eau de fonte, ne sera pas sans impacts sur les apports en sédiments puisqu'ils connaîtront une modification à la hausse dans un premier temps, pouvant provoquer des dommages aux infrastructures (alluvionnement et usure notamment). A la fin du siècle on devrait plutôt assister à un équilibre dans les volumes de particules charriées.

A long terme, c'est l'ensemble des installations qui pâtiront de la fonte quasi-totale des glaciers des Alpes, les apports en eau nécessaire au turbinage seront nettement plus faibles, particulièrement durant la période estivale. Elles devront faire face aux épisodes extrêmes, telles des fortes pluies, et adapter leur période de production en conséquence. A travers les modifications de production évoquées, se posera la question des concessions hydrauliques donnant le droit d'exploitation de la ressource ainsi que du statut juridique de l'eau. Les communes, en partie dépendantes des revenus des ouvrages hydroélectrique via des redevances et la ventes d'électricité, devront faire face à une baisse de leurs marges financières, Se posera alors la question des nouveaux investissements nécessaires au maintien d'une hydroélectricité performante lors du retour de concession dans le giron publique. Il en sera de même pour les producteurs hydroélectriques à plus long terme, même s'il faut garder à l'esprit qu'une grande partie des infrastructures sera amortie, permettant de garder une rentabilité intéressante.

Dans les conditions actuelles il difficile de déterminer de manière exacte la vitesse à laquelle les réserves d'eau sous forme de glace diminueront, a fortiori si l'on y ajoute la complexe question de la distribution des précipitations. Ceci appelle à préciser et à approfondir les modèles actuellement disponibles. La multiplication des observations et des recherches permettra à l'avenir d'avoir des modèles sous régionaux optimum. Cette évolution des modèles dépendra étroitement des simulations établis par des organes tel que le GIEC. Ces éléments sont donc essentiels pour quantifier et planifier à temps de nouvelles possibilités d'adaptation afin de faire face à ces nouvelles données.

La fourniture des services écosystémiques dans les régions alpines est appelée à évoluer. Si les impacts sur l'hydroélectricité ne sont pas dramatiques, la fonte des glaciers alpins posera de nouvelles questions et problématiques sur le fragile équilibre qui règne en montagne, qu'ils s'agissent des risques naturels, des écroulement rocheux, de la fonte du permafrost, ou encore des enjeux esthétiques, culturels et touristiques. Les régions alpines aux paysages englacés, faisant la beauté et l'identité des Alpes, seront profondément atteintes par les disparitions annoncées des glaciers. La question de l'eau potable, peu abordée dans le présent travail, posera de nouveaux défis. Si au travers des entretiens effectués, la problématique n'a pas semblé inquiétante dans le Val d'Hérens, la possible pénurie d'eau et la pression croissante sur la ressource que connaîtront certaines régions, seront sans doute source de conflits d'usage. Enfin, une gestion intégrée et un monitoring de la ressource en eau pour les vallées alpines à fort enjeux, comme l'est le Val d'Hérens, pourra être une réelle solution pour appréhender au mieux les changements qui nous attendent.

## Bibliographie

ABEGG B, KORNER U. (1997). "Impacts of Climate Change on Winter Tourism in the Swiss Alps", in *Journal of sustainable Tourism*, vol. 5, pp. 46-57.

ADAM J., BARNETT T., LETTENMAIER D. (2005). "Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions", in *Nature*, vol. 438, pp. 303 - 309.

ADAMS W., VIRA B. (2009). "Ecosystem services and conservation strategy: beware the silver bullet", in *Conservation Letters* 2, pp. 158–16.

ADAPTALP. (2011). *Climate adaptation and natural hazard management in the Alpine Space, Final Report*, 96 p. En ligne. [http://www.adaptalp.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=417&Itemid=134](http://www.adaptalp.org/index.php?option=com_content&view=article&id=417&Itemid=134). Consulté le 08 juillet 2012

AGENCE EUROPEENNE POUR L'ENVIRONNEMENT. (2009). *Changement climatique régional et adaptation, Les Alpes face au changement des ressources en eau*, 148 p. En ligne. [http://www.riob.org/IMG/pdf/EEA\\_Report\\_8-2009\\_Alps.pdf](http://www.riob.org/IMG/pdf/EEA_Report_8-2009_Alps.pdf). Consulté le 1 septembre 2011.

ANTONA M., BARNAUD C., MARZIN J. (2011). "Vers une mise en débat des incertitudes associées à la notion de service écosystémique", vol.11, n°1, in *VertigO*. En ligne. <http://vertigo.revues.org/10905>. Consulté le 20 juillet 2011.

ARAUJO M.B., ARNELL N.W., BONDEAU A., BUGMANN H., CARTER T.R., CRAMER W., DE LA VEGA-LEINERT A-C., ERHARD M., EWERT F., GLENDINING M., GRACIA C.A., HOUSE J.J., KANKAANPAA S., KLEIN R.J.T, LAVOREL S., LEEMANS R., LINDNER M., METZGER M.J., PRENTICE I.C., MEYER J., MITCHELL T.D., REGINSTER I., ROUNSEVELL M., SABATE S., SCHROTER D., SITCH S., SMITH B., SMITH J., SMITH P., SYKES M.T., THONICKE K., THULLER W., TUCK G., ZAEHLE S., ZIERL B. (2005). "Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe", in *Science*, vol. 310, pp. 1333-1337.

ARNAUD-FASSETT,G.,LAGANIER, R. (2009), *Les géographies de l'eau : processus, dynamique et gestion de l'hydrosystème*, Paris : L'Harmattan, 298 p.

ARNELL, N. (1999) . "The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective", in *Global Environmental Change*, vol. 1, issue 1, 19 p.

AUFFRAY A, BRISSON A., DZIAK V., MALOISEL V., MARTINONI-LAPIERRE S., TAMBURINI A. (2010). *Climat de la région Rhône Alpes*, Météo France, 47 p. En ligne. [http://srcae.rhonealpes.fr/static/cms\\_page\\_media/24/rapport-climat-final.pdf](http://srcae.rhonealpes.fr/static/cms_page_media/24/rapport-climat-final.pdf). Consulté le 3 juin 2012.

BADRÉ M., PRIME J-L., RIBIEREN G. (2009). *Neige de culture. Etat des lieux et impacts environnementaux, Note socio-économique*. Paris : Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, 162 p.

BAGNOUD N., BERNARD-PEYRE S., BOURGEOIS M., JOOS B., ZURWERRA A. (2006). *Etat du Valais. Etude d'assainissement (selon les exigences de l'art. 80 al. 1 & 2 LEaux) et étude liée aux purges et vidanges répétitives. Borgne, Dixence, Printse. Bassin versant: Borgne*, Sion : Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils, 107 p.

BAGNOUD N., BERNARD-PEYRE S., BOURGEOIS M., JOOS B., ZURWERRA A. (2006). *Etat du Valais. Etude d'assainissement (selon les exigences de l'art. 80 al. 1 & 2 LEaux) et étude liée aux purges et vidanges répétitives. Borgne, Dixence, Printse. Bassin versant: Dixence*, Sion : Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils, 87 p.

BARDA A., LANG M., RENARD B. (2011). *Tendances observées sur les régimes hydrologiques de l'arc, Colloque SHF : «Eaux en montagne», Lyon, 16-17 mars 2011*. En ligne. <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/61/75/77/PDF/LY2011-PUB00032836.pdf>. Consulté le 8 juillet 2012.

BARNAUD G., FUSTEC E. (2007). *Conserver les zones humides : pourquoi ? comment ?*, Versailles : Quae éditions, 295 p.

BAUDER A., FARINOTTI D., HUSS M., FUNK M. (2009). "An estimate of the glacier ice volume in the Swiss Alps", in *Global and Planetary Change*, n°68, pp. 225–231.

BAUDER A., FARINOTTI D., JOUVET G., HUSS M. (2010). "Future high-mountain hydrology: a new parameterization of glacier retreat", in : *Hydrology and Earth System Sciences*, n° 7, pp. 345–387. En ligne. <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/14/815/2010/hess-14-815-2010.pdf> . Consulté le 16 juillet 2012.

BAUDER A., FARINOTTI D. (2011). *Gletscher- und Abflussentwicklung in den Einzugsgebieten Gornergletscher, Findelengletscher und Haut Glacier d'Arolla*, Zurich : Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zurich, 56 p.

BAUDER A., BOES R., FARINOTTI D., JOUVET G., HUSS M., WIDMER F. (2011). *Future glacier evolution and impact on the runoff regime in the catchments of Alpine reservoirs: the Aletsch area, Switzerland*, 11 p. En ligne. <http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/b11669-58>. Consulté le 21 juillet 2012.

BAULER T. (2010). *Cours : Economie de l'environnement*, Université Libre de Bruxelles.

BAVAY M., JONAS T., LEHNING M., LÖWE H. (2009). "Simulations of future snow cover and discharge in Alpine headwater catchments", in *Hydrological Processes*, vol. 23, issue 1, pp. 95–108.

BENISTON M. (2009). *Changements climatiques et impacts. De l'échelle globale à l'échelle locale*, Lausanne : Presse polytechniques et universitaire romandes, 243 p.

BENISTON M. (2002). *Climatic Change: Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management*, Advances in Global Change Research, Dordrecht et Boston : Kluwer Academic Publisher, 503 p.

BENISTON M., GOYETTE S., KELLER F. (2003). "Snow pack in the Swiss Alps under changing climatic conditions: an empirical approach for climate impacts studies", in *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 74, issue 1-2, pp. 19-31.

BENISTON M., GOYETTE S., KELLER F., KOFFI B. (2003). "Estimates of snow accumulation and volume in the Swiss Alps under changing climatic conditions", in *Theoretical and applied climatology*, 16 p. En ligne. <http://www.unige.ch/climate/Publications/Beniston/TAC.2003B.pdf>. Consulté le 01 juin 2012.

BENISTON M. (2005). « Changement climatique et impacts possibles dans la région alpine », in *Revue de géographie alpine*, Vol.93, n°93-2, 13-24 pp.

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.

BENISTON M. (2010). "Impacts of climatic change on water and associated economic activities in the Swiss Alps", in *Journal of Hydrology*, 6 p. En ligne. <http://www.unige.ch/climate/Publications/Beniston/JHydro2010.pdf>. Consulté le 15 mai 2012.

BENISTON, M., STOFFEL, M., HILL, M. (2011). "Impacts of climatic change on water and natural hazards in the Alps: can current water governance cope with future challenges? Examples from the European "ACQWA" project", in *Environmental Science and Policy*, n°14, pp.734-743 .

BENNETT E., GARRY P., LINE G. (2009). "Understanding relationships among multiple ecosystem services", in *Ecology Letters*, vol. 12, issue 12, pp. 1394–1404.

BERGKAMP G, DE GROOT D, PIERROT-MAITRE D, SMITH, M. (2006). *Pay - establishing payments for watershed services*, World Conservation Union, 115 p. En ligne. <http://data.iucn.org/dbtw-wpd/edocs/2006-054.pdf>. Consulté le 9 novembre 2011

BEZINGE A. (2000). "Le recul du glacier de Ferpècle (Val d'Hérens, Suisse). Historique et phénomènes récents", in *Revue de géographie alpine*, vol.88, n°4, pp.74-81.

BIDALOT Y.(2006). *Impacts du changement climatique sur les milieux montagnards*, Mémoire – Examen final - Accompagnateur en moyenne montagne, 43 p. En ligne. [http://www.rac-f.org/IMG/pdf/impact\\_version\\_internet.pdf](http://www.rac-f.org/IMG/pdf/impact_version_internet.pdf). Consulté le 14 juin 2012.

BINNING C., CORK S., PARRY R., SHELTON D. (2001). *Natural Assets: An Inventory of Ecosystem Goods and Services in the Goulburn Broken Catchment*, CSIRO Sustainable Ecosystems, Canberra, 137 p. En ligne. [http://www.ecosystemservicesproject.org/html/publications/docs/Natural\\_Assets\\_LR.pdf](http://www.ecosystemservicesproject.org/html/publications/docs/Natural_Assets_LR.pdf). Consulté le 17 juillet 2012.

BISHOP J., GUNDIMEDA H., KUMAR P., NESSHÖVER C., NEUVILLE A., SCHRÖTER-SCHLAACK C., SIMMONS B., SUKHDEV P., TEN BRINK P., WITTMER H. (2010). *TEEB. L'Économie des écosystèmes et de la biodiversité : Intégration de l'Économie de la nature. Une synthèse de l'approche, des conclusions et des recommandations de la TEEB*, TEEB, 46 p. En ligne. [http://www.teebweb.org/Portals/25/TEEB%20Synthesis/Synthesis%20report\\_French.pdf](http://www.teebweb.org/Portals/25/TEEB%20Synthesis/Synthesis%20report_French.pdf). Consulté le 13 juillet 2012.

BLANCHER P., MARESCA B., MORDRET X., UGHETTO A.L. (2011). "Évaluation des services rendus par les écosystèmes en France", in *Développement durable et territoires*, vol.2, n°3. En ligne. <http://developpementdurable.revues.org/9053>. Consulté le 06 juin 2012.

BLATTERS H., FUNK M., HUSS M., JOUVET G. (2011). "Modelling the retreat of Grosser Aletschgletscher, Switzerland, in a changing climate", in *Journal of Glaciology*, vol. 57, n° 206, pp. 1033-1045.

BOHM R., CASTY C., ESPER J., LUTERBACHER J., WANNER H. (2005). "Température and precipitation variability in the European Alps since 1500", in *International journal of climatology*. pp. 1855–1880. En ligne. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.1216/pdf>. Consulté le 03 juin 2012.

BOISSET G. (2008), *Les systèmes de paiements pour services environnementaux (PSE) et l'eau : des opportunités pour aider les agriculteurs ?*, Paris : AgroParisTech Engref, 21. En ligne. <http://www.agroparistech.fr/IMG/pdf/mtp-synth08-Boisset.pdf>. Consulté le 05 juillet 2012.

BONNIN M., PESCHE D., HRABANSKI M., MERAL P. (2011). *Services écosystémiques et Paiements pour services environnementaux : les deux faces d'une même logique ?*, Service environnementaux et usages de l'espace rurale, 26 p. En ligne. [www.serena-anr.org/IMG/.../WP\\_Serena\\_2011\\_01\\_Pesche\\_et\\_al.pdf](http://www.serena-anr.org/IMG/.../WP_Serena_2011_01_Pesche_et_al.pdf). Consulté le 9 juillet 2012

BRAUN L.N., HOCK R., JANSSON P. (2005) "Modelling the Response of Mountain Glacier Discharge to Climate Warming", in *Springer*, vol. 6, issue 4, pp. 243-252.

BURCKHARDT R. (réal.).(1972). *Plus qu'un barrage*. Film en ligne. Archives de la Radio Télévision suisse, 2012. 35 mn. <http://www.rts.ch/archives/tv/culture/dimensions/3437117-plus-qu-un-barrage.html>. Consulter le 20 juillet 2012.

BRUGMANN, H., HUBER, U., REASONER, MEL A. (2005) *Global Change and Mountains Regions. The Mountains Research Initiative*, Stockholm : IGBP Report 49, 650 p. BURNS E., JOHNSTON K.M., POST C., SCHMITZ O. J. (2003). "Ecosystem responses to global climate change: Moving beyond color mapping", in *BioScience*, vol. 53, pp. 1199-1205.

CH2011. (2011). *Swiss Climate Change Scenarios CH2011*, Zurich : C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC , 88 pp. En ligne. <http://www.ch2011.ch/pdf/CH2011reportLOW.pdf>. Consulté le 16 juillet 2012.

CANTON DU VALAIS. (2001). *Plan directeur cantonal - Fiche de coordination D.10, Installations d'enneigement*. 6 p. En ligne. [http://www.vs.ch/Data/sat/data/doc/fr/D.10\\_fr.pdf](http://www.vs.ch/Data/sat/data/doc/fr/D.10_fr.pdf). Consulté le 05 aout 2012.

CANTON DU VALAIS. (2002). *Plan directeur cantonal - Fiche de coordination G6/2, Approvisionnement en eau potable*, 4p. En ligne. [http://www.vs.ch/Data/sat/data/doc/fr/G.6.2\\_fr.pdf](http://www.vs.ch/Data/sat/data/doc/fr/G.6.2_fr.pdf) . Consulté le 05 aout 2012.

CANTON DU VALAIS. (2004). *Développement rural Val d'Hérens Description générale du projet*, 21 p. En ligne. [http://www.vs.ch/Press/DS\\_3/CP-2005-01-18-6852/fr/Description%20du%20projet.doc](http://www.vs.ch/Press/DS_3/CP-2005-01-18-6852/fr/Description%20du%20projet.doc). Consulté le 11 juin 2012.

CANTON DU VALAIS. (2006). *Protection des eaux souterraines. Notices explicative*. 2p. En ligne. [http://www.vs.ch/NavigData/DS\\_65/M22569/fr/Zones%20et%20secteurs%20de%20protection%20de%20eaux%20souterraines%20Notice%20explicative\\_fr.pdf](http://www.vs.ch/NavigData/DS_65/M22569/fr/Zones%20et%20secteurs%20de%20protection%20de%20eaux%20souterraines%20Notice%20explicative_fr.pdf). Consulté le 7 aout 2012.

CANTON DU VALAIS. (2007). *Qualité des cours d'eau en Valais*, 155 p. En ligne. [www.vs.ch/Press/DS\\_3/PU-2007-02.../Bilan-Eaux-VS\\_2007.pdf](http://www.vs.ch/Press/DS_3/PU-2007-02.../Bilan-Eaux-VS_2007.pdf). Consulté le 04 aout 2012.

CANTON DU VALAIS. (2010). *Délimitation des zones de protection des eaux souterraines*. 2 p. En ligne. <http://www.vs.ch/Navig/navig.asp?MenuID=22569&RefMenuID=0&RefServiceID=0>. Consulté le 05 aout 2012.

CANTON DU VALAIS. (2011). *Stratégie Forces hydrauliques Canton du Valais. Objectifs, lignes directrices et mesures. Rapport final du groupe de travail Forces hydrauliques à l'attention du Conseil d'Etat du Valais*. Sion : Canton du Valais, 106 p.

CHAIX C., GALLEE H. (2011). *Climate changes over the Alps and their impact on alpine tourism*, Université de Savoie, Institut de la Montagne, 29 p. En ligne. [http://www.institutmontagne.org/nuxeo/nxfile/default/8de00231-6128-4f33-9552-f9f3e1eede96/file:content/ClimAlpTour\\_project\\_Climate\\_studies\\_2011.pdf](http://www.institutmontagne.org/nuxeo/nxfile/default/8de00231-6128-4f33-9552-f9f3e1eede96/file:content/ClimAlpTour_project_Climate_studies_2011.pdf). Consulté le 1 juillet 2012.

CHRISTIAN, V., FRANCOU, B., SIX, D., WAGNON, P. (2007). *Glaciers, forces et fragilités*, Grenoble: Glenat, 152 p.

COLLINS D. (2007). "Changes in quantity and variability of runoff from Alpine basins with climatic fluctuation and glacier decline", in *International Association of Hydrological Sciences*, vol. 318, pp. 75-85.

CONFEDERATION SUISSE, LES AUTORITES FEDERALES DE LA CONFEDERATION SUISSE (2012). *Loi fédérale du 22 décembre 1916 sur l'utilisation des forces hydrauliques (Loi sur les forces hydrauliques, LFH)*, 30 p. En ligne. <http://www.admin.ch/ch/f/rs/7/721.80.fr.pdf>. Consulté le 4 juillet 2012.

CONVENTION ALPINE. (2009). *Vers la décarbonisation des alpes, Politiques et stratégies nationales, initiatives régionales et actions locales*. 98 p. En ligne [http://www.alpconv.org/documents/Permanent\\_Secretariat/web/AS6/Broschuere\\_FRA.pdf](http://www.alpconv.org/documents/Permanent_Secretariat/web/AS6/Broschuere_FRA.pdf). Consulté le 12 mai 2012.

CONVENTION ALPINE. (2009). *L'eau et la gestion des ressources en eau. Rapport sur l'état des Alpes. Convention Alpine. Signaux alpins – Édition spéciale 2*, Bolzano-Bozen : Secrétariat permanent de la Convention alpine, 67 p.

COMMUNES DE LA VALLEE DE SAAS (2011). *Résumé du rapport final, Adaptation au changement climatique dans le domaine Montagnard Étude du cas de la vallée de Saas*. 18 p. En ligne. [http://www.preventionweb.net/files/20642\\_econcept2011adaptationchangementcli.pdf](http://www.preventionweb.net/files/20642_econcept2011adaptationchangementcli.pdf). Consulté le 15 juillet 2012.

CORDONNIER T., COURBAUD B., KUNSTLER G., MORIN X. (2010). "Quel futur pour les services écosystémiques de la forêt alpine dans un contexte de changement climatique ? ", in *Revue de géographie alpine*, vol.98/4, 11 p. En ligne. <http://rga.revues.org/1308>. Consulté le 16 juin 2012.

COSTANZA R., D'ARGE R., DE GROOT R., FARBER S., GRASSO M., HANNON B., LIMBURG K., NAEEM S., O'NEILL R.V., PARUELO J., RASKIN R.G., SUTTON P., VAN DEN BELT M. (1997). "The value of the world's ecosystem services and natural capital, in *Nature*, vol. 387, pp. 253-260.

COUTERRAND S. (2008). *Régime thermique des glaciers et dynamique glaciaire*, 3 p. En ligne. [http://www.glaciers-climat.com/images/pdf/Regime\\_thermique\\_des\\_glaciers\\_et\\_dynamique\\_glaciaire.pdf](http://www.glaciers-climat.com/images/pdf/Regime_thermique_des_glaciers_et_dynamique_glaciaire.pdf). Consulté le 25 mai 2012.

COUTERRAND S. (2010) « Etude géomorphologique des flux glaciaires dans les Alpes nord-occidentales au Pléistocène récent, du maximum de la dernière glaciation aux premières étapes de la déglaciation ». Thèse de doctorat en ligne. Le Bourget du Lac : Université de Savoie. 471 p. [http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/51/96/97/PDF/These\\_S\\_Coutterand.pdf](http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/51/96/97/PDF/These_S_Coutterand.pdf). Consulté le 27 mai 2012.

CREDOC, MINISTERE DE L'ÉCOLOGIE, DE L'ÉNERGIE, DU DEVELOPPEMENT DURABLE ET DE LA MER EN CHARGE DES TECHNOLOGIES VERTES ET DE NEGOCIATIONS SUR LE CLIMAT. (2009). *Evaluation des services rendus par les écosystèmes en France. Etude exploratoire*. 9 p. En ligne [http://www.developpementdurable.gouv.fr/IMG/DGALN\\_Synthese\\_Rapport\\_Final\\_MEA20100204.pdf](http://www.developpementdurable.gouv.fr/IMG/DGALN_Synthese_Rapport_Final_MEA20100204.pdf). Consulté le 17 juin 2012.

DAILY G. (1997). *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*, Washington, DC. : Island Press, 412 p.

DEBARBIEUX B., DEL BIAGGIO C., PETITE M. (2008). « Spatialités et territorialités du tourisme », in *Civilisations*. En ligne. <http://civilisations.revues.org/index1085.html>. Consulté le 12 juin 2012.

DELESTRADE A., LOISON A., YOCCOZ N.G. (2010). « Impact des changements climatiques sur les écosystèmes alpins : comment les mettre en évidence et les prévoir ? », in *Revue de géographie alpine*, 11 p. En ligne. <http://rga.revues.org/index1279.html>. Consulté le 02 septembre 2011.

DUPONT C., WIEGANDT E. (2007). *Interreg III. Le Haut Rhône et son Bassin Versant Montagneux : Pour une Gestion Intégrée de Territoires Transfrontaliers. 3ème Volet : Utilisation et Gestion des Ressources en Eau*, 85 p. En ligne. [http://www.institut-montagne.org/IMG/pdf/2007\\_03\\_Volet3\\_CH.pdf](http://www.institut-montagne.org/IMG/pdf/2007_03_Volet3_CH.pdf). Consulté le 25 juillet 2012.

DUPRAZ C., MÜLLER C., PRALONG R., STÄHLI M., ZAPPA, M. (2011). *Klimaänderung und Wasserkraft - Fallstudie Mattmark AG*, WSL, 21 p. En ligne. [www.wsl.ch/.../CC\\_Wasserkraft\\_Gougra\\_2011.pdf](http://www.wsl.ch/.../CC_Wasserkraft_Gougra_2011.pdf). Consulté le 28 juillet 2012.

D'URSO J. (2006). *La gestion publique de l'eau en Suisse, Cahier de recherche de la Haute Ecole de Gestion de Genève*, 7 p. En ligne. [http://doc.rero.ch/lm.php?url=1000,44,9,20061013103703-LJ/D\\_urso\\_cahier\\_recherche\\_5.pdf](http://doc.rero.ch/lm.php?url=1000,44,9,20061013103703-LJ/D_urso_cahier_recherche_5.pdf) Consulter le 20 juillet 2012.

ETCHEVERS P., MARTIN E. (2002). *Colloque International « L'eau en montagne » - Impact d'un changement climatique sur le manteau neigeux et l'hydrologie des bassins versants de montagne* (Mégève, septembre 2002), 8 p. En ligne : <http://www.riob.org/IMG/pdf/Etchevers-2.pdf>. Consulté le 30 janvier 2012.

FANKHAUSER A., LUDWIG A., OSSIAA M., STÄHLI M., ZAPPA M. (2011). *Klimaänderung und Wasserkraft – Fallstudie Kraftwerke Oberhasli AG*, Birmensdorf : WSL, 20 p. En ligne. <http://www.hydrologie.unibe.ch/projekte/Klimaaenderung%20und%20Wasserkraft%20-%20Fallstudie%20Kraftwerke%20Oberhasli.pdf>. Consulté le 23 juillet 2012.

FERRY L. (1992). *Le nouvel Ordre écologique*, Paris : Grasset, 222 p.

FITZHARRIS B.B., GARR C.E. (1994). "Sensitivity of mountains runoff and hydro-electricity to changing climate", in *Mountain environments in changing climates*, pp. 296-304.

FRANCOU B., VINCENT C. (2007). *Les glaciers à l'épreuve du climat*, Paris : IRD Edition, 274 p.

GIEC. (2007). *Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, Genève : GIEC, 104 p. En ligne. [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_fr.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf). Consulté le 19 juillet 2012.

GOTTARDI F. (2009). « Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne. Utilisation d'ébauches par types de temps et assimilation de données d'enneigement. Application aux grands massifs montagneux français ». Thèse de doctorat en ligne. Grenoble : Institut polytechnique de Grenoble, 284 p. <http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/41/91/70/PDF/2009-These-F-GOTTARDI-v144.pdf>. Consulté le 01 juin 2012.

GRANDE DIXENCE SA (2011). *Rapport d'activité de l'exercice 2011*, 45 p. En ligne. [http://www.grande-dixence.ch/template/fs/RA\\_GD\\_2011.pdf](http://www.grande-dixence.ch/template/fs/RA_GD_2011.pdf). Consulté le 16 juillet 2012.

GRARD M. (2001). « Le rôle des politiques publiques dans les services écosystémiques des prairies de montagne », Mémoire de fin d'étude, UPMC – IEP Paris, 73 p.

GUERASSIMOFF G., MAIZI N. (2010) *Eau et énergie : destins croisés*, Paris : Presse des mines, 322 p. GUYER M., HELDSTAB J., KLJUN N., KASSER F., MAIBACH M., NORTH N., REUTIMANN J. (2007). *Changements climatiques en Suisse – Indicateurs des causes, des effets et des mesures. État de l'environnement n° 0728*. Berne : Office fédéral de l'environnement, Berne. 77 p. En ligne. [www.bafu.admin.ch/publikationen/.../00065/index.html](http://www.bafu.admin.ch/publikationen/.../00065/index.html). Consulté le 02 juin 2012.

GURNELL A.M. (1983). "Downstream Channel Adjustments in Response to Water Abstraction for Hydro-Electric Power Generation from Alpine Glacial Melt-Water Streams", in *The Geographical Journal*, vol. 149, n°3, pp. 342-354. En ligne. <http://www.jstor.org/stable/634009>. Consulté le 30 janvier 2012

HAEBERLI W., HOELZLE M., PAUL F., ZEMP M. (2007). "Integrated monitoring of mountain glaciers as key indicators of global climate change: the European Alps", in *Annals of Glaciology*, vol. 46, pp. 150-160.

HAINES-YOUNG R., POTSCHEIN M. (2010) "The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being", *University of Nottingham*, 30 p. En ligne. [http://www.nottingham.ac.uk/cem/pdf/Haines-Young&Potschin\\_2010.pdf](http://www.nottingham.ac.uk/cem/pdf/Haines-Young&Potschin_2010.pdf). Consulté le 04 juin 2012.

HALLER T., HAUSER F., WEINGARTNER R. (2007). *Atlas hydrologique de la Suisse*, Berne Institut de géographie de l'Université de Berne. En ligne. [http://www.hades.unibe.ch/hades\\_f/index.htm](http://www.hades.unibe.ch/hades_f/index.htm). Consulté 04 aout 2012.

HÄNGGI P., SCHÄDLER B., WEINGARTNER R. (2012). "Climate change versus Swiss hydro - what happens next?", in *International Water Power & Dam Construction*, n°64/4, pp. 38-42.

HÄNGGI, P., WEINGARTNER R. (2012). "Variations in Discharge Volumes for Hydropower Generation in Switzerland", in *Water Resources Management*, vol. 26, pp.1231–1252. En ligne. <http://www.springerlink.com.ezproxy.ulb.ac.be/content/61887h1680557734/fulltext.pdf>. Consulté le 17 juillet 2012.

HESS G. (2011). *Cours : Ethique de l'environnement et du développement durable*, Université de Lausanne.

HIGY C., MUSY A. (2009). *Hydrologie : une science de la nature*, Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes. 314 p.

HINGRAY, B. MUSY, A., SCHÄFLI, B. (2007). "Climate change and hydropower production in the Swiss Alps : quantification of potential impacts and related modelling uncertainties". In : *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 11, pp. 1191–1205.

HISTALP (2007). *Datasets. HISTALP Management Department of Climate Research Central Institute for Meteorology and Geodynamics*. En ligne. <http://www.zamg.ac.at/histalp/content/view/17/31/index.html>. Consulté le 11 mai 2012.

HINGRAY B., HORTON P., MEZGHANI, A. MUSY, A., SCHAEFLI, B. (2005). *Prediction of climate change impacts on Alpine discharge regimes under A2 and B2 SRES emission scenarios for two future time periods (2020–2049, 2070–2099), Technical report*, 84 p. En ligne. [http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=en&name=en\\_391256751.pdf](http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=en&name=en_391256751.pdf). Consulté le 21 juillet 2012.

JENNY, A., HÄCKI, M., HAUSER, A. HEUSI, F., KLINGLER, G., OTT, W., STAUB, C. (2011) *Indicateurs pour les biens et les services écosystémiques*, Berne : Office Fédérale de l'environnement, 16 p.

JORDAN, F. ( 2007). « Modèle de prévision et de gestion des crues optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques à accumulation pour la réduction des débits de crue ». Thèse de doctorat en ligne. Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 284 p. [http://biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2007/3711/3711\\_abs.pdf](http://biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2007/3711/3711_abs.pdf). Consulté le 25 juillet 2012.

LAMBIEL C. (2011). *Cours : Environnement périglaciaire Alpin*, Université de Lausannes.

LANGEVIN P., MUGNIER R., MARCEPOIL E. (2008) *Changement climatique dans le massif alpin français, état des lieux et propositions*, Grenoble : rapport établi pour le commissariat à l'aménagement au développement et à la protection du massif alpin, 85 p. En ligne : [http://www.be-mountainriders.com/wp\\_content/uploads/2010/11/Changement\\_climatique\\_dans\\_le\\_Massif\\_Alpin1.pdf](http://www.be-mountainriders.com/wp_content/uploads/2010/11/Changement_climatique_dans_le_Massif_Alpin1.pdf). Consulté le 30 janvier 2012.

LEAVESLEY G.H. (1994). "Modeling the effects of climate change on water resources - a review", in *Climatic Change*, vol. 28, pp.159-177

MAYORAZ B. (2003) . « Le Val d'Hérens face au défi touristique hivernal (1960-2000) ». Mémoire de licence en histoire contemporaine, Université de Fribourg. 217 p.

MIEVILLE-OTT V., ROQUE O. (2010). « Développement de l'agriculture en montagne et rôle des rapports de proximité : le cas du Val d'Hérens (Valais, Suisse) », in *Développement durable et territoires*, Dossier 7 . En ligne. <http://developpementdurable.revues.org/2989>. Consulté le 12 juin 2012.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington DC. : Island Press, 155 p. En ligne. <http://www.maweb.org/documents/document.356.aspx.pdf>. Consulté le 27 juillet 2012.

MITCHELL J.F.B., VAN DER LINDEN P.(2009). *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Met Office Hadley Centre. 160 pp. En ligne. [http://ensembleseu.metoffice.com/docs/Ensembles\\_final\\_report\\_Nov09.pdf](http://ensembleseu.metoffice.com/docs/Ensembles_final_report_Nov09.pdf). Consulté le 24 juillet 2012.

NARCY J-B. (2004). *Pour une gestion spatiale de l'eau : comment sortir du tuyau*, Bruxelles : Peter Lang, 342 p.

OBSERVATION NATIONALE SUR LES EFFETS DU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE (2008). *Changements climatiques et impacts dans les Alpes*. Paris : ONERC, 100 p. En ligne. [http://www.be-mountainriders.com/wpcontent/uploads/2010/11/Changements\\_climatiques\\_dans+les\\_Alpes\\_Impacts\\_et\\_risques\\_naturels\\_2008.pdf](http://www.be-mountainriders.com/wpcontent/uploads/2010/11/Changements_climatiques_dans+les_Alpes_Impacts_et_risques_naturels_2008.pdf). Consulté le 12 septembre 2011.

OBSERVATOIRE SAVOYARD DU CHANGEMENT CLIMATIQUE (2011). L'année 2010 dans un contexte de changement climatique. Températures, précipitations, indices de sécheresse. 7 p. En ligne. [http://www.mdp73.fr/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_download&gid=209&Itemid=68](http://www.mdp73.fr/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=209&Itemid=68). Consulté le 15 mai 2012.

ORGANISATION DE COOPERATION POUR LE DEVELOPPEMENT ECONOMIQUE. (2007). *Climate change in the European Alps*, Paris : OCDE Publication, 128 p.

OFFICE FEDERAL DE L'ENVIRONNEMENT. (2011). *Indicateurs pour les biens et services écosystémiques, Confédération Helvétique*, 14 p. En ligne. <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01587/index.html?lang=fr>. Consulté le 10 juillet 2012.

OFFICE FEDERAL DES EAUX ET DE LA GEOLOGIE. (2002). *La redevance hydraulique – principale taxe frappant l'utilisation de la force hydraulique en Suisse*, Berne : OFEG, 29p. En ligne. [http://www.bfe.admin.ch/themen/00490/00491/index.html?dossier\\_id=00803&lang=fr](http://www.bfe.admin.ch/themen/00490/00491/index.html?dossier_id=00803&lang=fr). Consulté le 15 juillet 2012.

OFFICE FEDERAL DE L'ENVIRONNEMENT, DES FORETS ET DU PAYSAGE (2004). *Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines. L'environnement pratique*, Berne OFEP : Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne. 141 p.

OFFICE FEDERAL SUISSE DE LA SANTE PUBLIQUE (2010). *Rapport de la Suisse relatif à la mise en œuvre du Protocole Eau et Santé*, Berne : Office Fédérale Suisse de la Santé Publique. 49 p.

OFFICE FEDERAL DE L'ENVIRONNEMENT. (2011). *Gestion par bassin versant, Idées directrices pour une gestion intégrées des eaux en Suisse*. 21 p. En ligne. <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01576/index.html?lang=fr&lang=fr>. Consulté le 02 aout 2012.

OFFICE FEDERAL DE L'ENERGIE. (2012). *Statistique suisse de l'électricité 2011*, 56 p. En ligne. [http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/00630/index.html?lang=fr&dossier\\_id=00765](http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/00630/index.html?lang=fr&dossier_id=00765). Consulté le 2 juillet 2012

OFFICE FEDERAL DE L'ENERGIE. (2012). *Le potentiel hydroélectrique de la Suisse, Potentiel de développement de la force hydraulique au titre de la stratégie énergétique 2050*, 28 p. En ligne. <http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/27058.pdf>. Consulté le 08 aout 2012.

ORGANE CONSULTATIF SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES. (2007) *Les changements climatiques et la Suisse en 2050 : impacts attendus sur l'environnement, la société et l'économie*, Berne : Organe Consultatif sur les changements climatiques, 168 p.

ORGANE CONSULTATIF SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES. (2008) *Le climat change – que faire? Le nouveau rapport des Nations Unies sur le climat (GIEC 2007) et ses principaux résultats dans l'optique de la Suisse*, Berne : Organe Consultatif sur les changements climatiques, 47 p. En ligne. <http://proclimweb.scnat.ch/portal/ressources/854.pdf>. Consulté le 3 juin 2012

PACCARD P. ( 2010). « La gestion de l'eau en montagne. Le cas de la production de neige en stations de sports d'hiver ». Thèse de doctorat. Chambéry : Université de Savoie. 536 p. En ligne. [http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/57/61/92/PDF/These\\_NCT\\_13032011\\_light.pdf](http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/57/61/92/PDF/These_NCT_13032011_light.pdf). Consulté le 02 aout 2012.

PEYSSON Y. (2007). *Les glaciers alpins, une histoire en mouvement*. Club Alpin Français, Comité Scientifique. 25 p.

PFLIEGER G. (2009) *L'eau des villes. Aux sources des empires municipaux*, Lausanne : Presse polytechnique et universitaire romandes, 120 p.

PRALONG R., STÄHLI M., ZAPPA, M., WIDMER F. (2011). *Klimaänderung und Wasserkraft - Fallstudie Kraftwerke Gougtra AG, WSL*, 20 p. En ligne. [www.wsl.ch/.../CC\\_Wasserkraft\\_Gougtra\\_2011.pdf](http://www.wsl.ch/.../CC_Wasserkraft_Gougtra_2011.pdf). Consulté le 28 juillet 2012.

- POTSCHIN M., ROY HAINES-YOUNG R. (2010) *Proposal for a Common International Classification of Ecosystem Services. (CICES) for Integrated Environmental and Economic Accounting*, 30 p. En ligne. <http://www.nottingham.ac.uk/cem/pdf/UNCEEA-5-7-Bk1.pdf>. Consulté le 06 juin 2012.
- QUIVY R., VAN CAMPENHOUDT L. (2006). *Manuel de recherche en sciences sociales*, 3ème édition, Paris, Dunod, 256 p.
- REBETEZ M. (2006) *La Suisse se réchauffe. Effet de serre et changement climatique*, Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), 142 p.
- REMONTEE MECANIQUE SUISSE (2011). *Faits et chiffres de la branche des remontées mécaniques suisses*. Edition 2010. 22 p. En ligne. [http://www.seilbahnen.org/dcs/users/174/Fakten\\_Zahlen\\_2010\\_f.pdf](http://www.seilbahnen.org/dcs/users/174/Fakten_Zahlen_2010_f.pdf). Consulté le 25 juillet 2012.
- REYNARD E. (2000). « 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. 53-85.
- REYNARD E. (2011). *Cours : Aménagement et protection des Alpes*, Université de Lausanne.
- ROUGIER H., WACKERMAN G. (2009). *L'eau. Ressources et usages*, Paris : Edition Ellipses, 273 p.
- SOCIETE SUISSE D'HYDROLOGIE ET DE LIMNOLOGIE (SSHL) ET COMMISSION D'HYDROLOGIE (CHY) (éd.) (2011). "Les effets du changement climatique sur l'utilisation de la force hydraulique – Rapport de Synthèse", in *Matériaux pour l'Hydrologie de la Suisse*, n° 38, 28 p. En ligne. <http://chy.scnatweb.ch/downloads/SyntheseberichtF.pdf>. Consulté le 29 juillet 2012.
- VERSUCHSANSTALT FÜR WASSERBAU, HYDROLOGIE UND GLAZIOLOGIE (VWHZ). (2011). *Rapport glaciologique (1881-2009). "Les variations des glaciers suisses"*, *Annuaire de la commission d'experts pour la cryosphère de l'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT)*, ETHZ Zürich, n°1-126. En ligne. <http://glaciology.ethz.ch/swiss-glaciers/>. Consulté le 30 juillet 2012.
- VINCENT , C. (2007). "The climate change impact on alpine glaciers over the last 100 years, in *La Houille Blanche*", vol. 6, pp. 78-82.
- VINCENT C. (2008). *Evolution des bilans de masse des glaciers alpins et changement climatique*, Université de Grenoble, 9 p. En ligne. [www-igge.ujf-grenoble.fr+bilan-climat.pdf](http://www-igge.ujf-grenoble.fr+bilan-climat.pdf). Consulté le 31 janvier 2012.
- VINCENT, C. (2010) « L'impact des changements climatiques sur les glaciers alpin ». Thèse de doctorat en ligne. Grenoble. Université Joseph Fourier Grenoble 1. 211 p. [http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/59/65/23/PDF/Vincent\\_c\\_these\\_26Janvier2010.pdf](http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/59/65/23/PDF/Vincent_c_these_26Janvier2010.pdf). Consulté le 05 aout 2012.
- TYNDALL, J. (1876) *Les glaciers et les transformations de l'eau* Paris : G. Baillièrre, Collection Bibl. scientifique internationale 1, 264 p.
- WESTAWAY R. (2000). "Modelling the potential effects of climate change on the Grande Dixence hydro-electricity scheme, Switzerland", in *Journal of the chartered Institution of Water and Environmental Management*, n°14/3, pp.179–185.
- WESTMAN W.E. (1977). "How Much Are Nature's Services Worth? ", in *Science*, vol. 197, n°4307, pp. 960-964. En ligne. <http://www.sciencemag.org/content/197/4307/960.citation>. Consulté le 24 juillet, 2012.

WIEGANDT E. (2008). *Mountains : sources of water, sources of knowledge*, Dordrecht : Springer, Collection Advances in global change research vol. 31, 384 p.

WYER H. (2008). *Utilisation de la force hydraulique en Valais. Histoire – Législation – Droit de retour*, Viège : Mengis Druck und Verlag AG, 296 p.

ZRYD, A. (2001). *Les glaciers*, Saint-Maurice : Saint-Augustin, 325 p.

### **Sites Internet**

ACQWA (2010). ACQWA, Assessing Climate impacts on the Quantity and quality of Water, Seventh Research Framework Programme (FP7). En ligne. <http://www.acqwa.ch/>. Consulté le 20 juillet 2012.

ADAPTALP (2012). *AdaptAlp. Adaptation to climate change in the Alpin Space*. En ligne. <http://www.adaptalp.org>. Consulté le 26 mai 2012.

ALPWATERSCARCE (2012). *Alp-Water-Scare*. En ligne. [www.alpwaterscarce.eu](http://www.alpwaterscarce.eu)  
Consulté le 19 mai 2012.

CANTON DU VALAIS (2012). *Canton du Valais*. En ligne. <http://www.vs.ch/>. Consulté le 3 aout 2012.

COMMUNE D'ÉVOLENE (2012). *Commune d'Evolène*. En ligne. <http://www.commune-evolene.ch/fr/>.  
Consulté le 07 aout 2012.

COMMUNE D'HEREMENCE (2012). *Commune d'Héremence*. En ligne. <http://www.heremence.ch/>.  
Consulté le 01 aout 2012.

COMMUNE DE SAINT-MARTIN (2012). *Commune de Saint-Martin*. En ligne. <http://www.saint-martin.ch>. Consulté le 01 aout 2012.

COMMUNE DE MONT-NOBLE (2012). *Commune de Mont-Noble*. En ligne. <http://www.mont-noble.ch/>.  
Consulté le 01 aout 2012.

CENTRE DE RECHERCHE SUR LES ECOSYSTEMES D'ALTITUDE (2012). *CREA*. En ligne. <http://www.creamontblanc.org>. Consulté le 3 septembre 2011.

CENTRE DE RECHERCHE SUR L'ENVIRONNEMENT ALPIN (2012). *CREALP Centre de Recherche sur l'environnement alpin*. En ligne. <http://www.crealp.ch/fr>. Consulté le 05 aout 2012.

ENERGIE DE SION SA (2011). *ESR*. En ligne. <http://www.esr.ch/>. Consulté le 05 aout 2012.

EPFL. (2010). *Chapitre 9, Les régimes hydrologiques*. En ligne. <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre9/chapitre9.html>. Consulté le 11 juin 2012.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY . COMMON INTERNATIONAL CLASSIFICATION OF ECOSYSTEM SERVICES (2012). *CICES*. En ligne. <http://cices.eu/>. Consulté le 12 juillet 2012.

GLACIER-CLIMAT (2011). *Glacier – Climat*. En ligne. <http://www.glaciers-climat.com>. Consulté le 23 juillet 2012.

GRANDE DIXENCE SA (2011). *Grande Dixence SA*. En ligne. <http://www.grande-dixence.ch>.  
Consulté le 03 aout 2012.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2012). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. En ligne. <http://www.ipcc.ch>. Consulté le 01 juin 2012.

INSTITUT DE LA MONTAGNE.(2011). *Institut de la Montagne*. En ligne. <http://www.institut-montagne.org>. Consulté le 2 septembre 2011.

NFP61.(2012). *Gestion durable de l'eau. Portrait du Programme national de recherche PNR 61*. En ligne. <http://www.nfp61.ch/>. Consulté le 25 juillet 2012.

OFFICE FEDERAL DE L'ENVIRONNEMENT.(2012). *Confédération Suisse, Office Fédérale de l'environnement*. En ligne. <http://www.bafu.admin.ch>. Consulté le 06 aout 2012.

OFFICE FEDERAL DE TOPOGRAPHIE . ( 2012). *Confédération Suisse, Office Fédérale de topographie*. En ligne. <http://map.geodataviewer.admin.ch/?lang=fr>. Consulté le 06 aout 2012.

PRONATURA. (2012). *Pronatura*. En ligne. <http://www.pronatura.ch/energie-hydraulique>. Consulté le 01 aout 2012.

MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2009). *Millenium Ecosystem Assessment*. En ligne. <http://www.maweb.org/en/index.aspx>. Consulté le 18 juin 2012.

RIOB. (2012). *Réseau International des Organismes de Bassins*. En ligne. [ttp://www.riob.org/](http://www.riob.org/). Consulté le 08 juin 2012.

RISKNAT (2012) . *Pôle Alpin d'étude et de recherché pour la prevention des Risques naturels*. En ligne. <http://www.risknat.org/>. Dernière Consultation le 12 juillet 2012.

SOCIETE SUISSE DE L'INDUSTRIE, DU GAZ ET DES EAUX. (2012). *Société Suisse de l'Industrie, du Gaz et des Eaux* . En ligne. <http://www.svgw.ch/francais/pagesnav/AK.htm>. Consulté le 3 juillet 2012.

SWISSGRID. (2012). *Swissgrid*. En ligne. <http://www.swissgrid.ch/swissgrid/fr/home/grid.html>. Consulté le 13 juillet 2012.

THE RAMSAR CONVENTION ON WETLANDS. (2012). *The Ramsar Convention on Wetlands*. En ligne. <http://www.teebweb.org>. Consulté le 13 juillet 2012.

TRIBUNAL FÉDÉRAL SUISSE. (2010). *Collections des arrêts du Tribunal Fédéral Suisse*. En ligne. [http://www.polyreg.ch/d/informationen/bgeunpubliziert/Jahr\\_2011/Entscheide\\_1C\\_2011/1C.67\\_\\_2011.html](http://www.polyreg.ch/d/informationen/bgeunpubliziert/Jahr_2011/Entscheide_1C_2011/1C.67__2011.html). Consulté le 04 juin 2012.

UNIVERSITE DE FRIBOURG.(2009). *Processus et formes glaciaires*. En ligne. <http://www.unifr.ch/geoscience/geographie/ssgmfiches/glacier/>. Consulté le 14 juillet 2012.

## **Annexes**

Annexe 1. Photographie d'un bisse en Valais (photographie personnelle)

Annexe 2. Photographie d'une retenue alluvionnée

Annexe 3. Photographie d'une structure permettant de retenir débris solides en amont d'une retenue d'eau

**Annexe 1. Photographie d'un bisse en Valais (photographie personnelle)**



**Annexe 2. Photographie d'une retenue alluvionnée**



**Annexe 3. Photographie d'une structure métallique permettant de retenir les apports solides de granulométrie variables en amont d'une prise d'eau de la Grande Dixence**

