

Master 2 Interface Nature-Société  
Département de Géographie  
Faculté des Lettres et Civilisations  
Université Jean Moulin - Lyon 3



Mémoire de géographie physique

Méthodes alternatives à l'analyse géomorphologique et  
glaciologique pour la reconstitution de la dynamique  
récente, historique et prévisionnelle des glaciers du  
vallon de Bérard (massif des Aiguilles Rouges, Alpes  
françaises)

Caroline Dewit

Sous la direction de Dominique Dumas,  
Professeur des universités, UMR 5600 CNRS, Université Jean Moulin - Lyon 3

Mémoire soutenu à Lyon, le 6 juillet 2016



## Remerciements

Je remercie Henri Rougier de m'avoir proposé le sujet à l'origine de ce mémoire et de m'avoir accueillie au sein de l'Association des Réserves Naturelles des Aiguilles Rouges (ARNAR), où j'ai pu réaliser un stage dans l'animation à l'environnement et un stage de recherche de terrain l'été dernier. Je remercie par la même occasion les salariés et les stagiaires avec qui j'ai travaillé, durant ce stage, au chalet d'accueil de l'association au Col des Montets.

Pour leur aide très précieuse apportée sur le terrain et pendant mes recherches, je remercie Patrick Perret et Jacky Ravanel, sans qui je n'aurais pas pu me rendre au plus près de chaque glacier. Je leur adresse à tous deux un immense merci pour m'avoir encouragée sur les terrains, hostiles pour les non-initiés, des moraines et des pierriers pour pouvoir atteindre les glaciers. J'adresse également un grand merci à Patrick pour m'avoir fait part du nom de nombreuses espèces végétales présentes lors de nos sorties.

Je remercie Dominique Dumas pour avoir accepté de diriger mon mémoire, pour avoir suivi régulièrement l'avancée de mes travaux tout au long de l'année universitaire et m'y avoir encouragée. Merci notamment de m'avoir aiguillée au début de mes recherches en me donnant des pistes bibliographiques intéressantes (notamment en lichénométrie). Pour m'avoir fournie les données climatologiques présentées dans le mémoire, je remercie Dominique Dumas et Florent Renard, responsable du M2 Interface Nature Société. Je remercie enfin Robert Moutard, invité à la soutenance de ce mémoire, pour l'attention portée à mon travail et pour ses conseils.

Je souhaite adresser mes remerciements à l'association Asters, et tout particulièrement à Carole Birck, la coordinatrice du programme scientifique d'Asters. Un grand merci pour m'avoir fourni conseils et données bibliographiques, qui se sont avérés indispensables pour une étude « éclairée » de ce sujet de mémoire.

Mes remerciements vont également à Jan Lentschke, que j'avais pour enseignant à Berlin, qui m'a fait connaître la lichénométrie et m'a donné les premiers conseils concernant les mesures lichénométriques ; à Vanessa, pour son soutien aux heures creuses à la cartothèque et pour m'avoir formée à une première prise en main d'AutoCAD ; et à Hugo pour tous ses conseils concernant l'écologie et pour ses relectures.

Enfin, j'adresse un immense merci à mes proches, et tout particulièrement à mes parents, qui m'ont énormément soutenu depuis le début de ce projet.



# Sommaire

Introduction générale.....	7
Chapitre 1 – L'évolution récente et prévisionnelle de la longueur des glaciers du vallon de Bérard d'après la modélisation de leur ligne d'écoulement sous SIG .....	11
1.1 Introduction .....	11
1.2 Données et méthode .....	11
1.2.1 Les données utilisées .....	11
a) Les données vectorielles.....	12
b) Les données raster .....	12
c) Les données climatologiques.....	12
1.2.2 Méthodologie.....	13
a) Préparation des données : preprocessing.....	13
b) L'algorithme de la ligne d'écoulement.....	13
c) Métrique des glaciers étudiés .....	15
d) Analyse statistique des données climatologiques .....	15
1.3 Résultats .....	16
1.3.1 L'évolution de la longueur des glaciers entre 2000 et 2012.....	16
1.3.2 La modélisation de la longueur des glaciers en 2050.....	18
1.3.3 L'évolution du climat local entre 1995 et 2015.....	21
1.4 Discussion .....	21
1.4.1 Limites de la méthode .....	21
1.4.2 Comparaison avec les résultats des études antérieures.....	23
1.5 Conclusion.....	24
Chapitre 2 – L'évolution historique des glaciers du vallon de Bérard du Petit Âge Glaciaire au tournant du XX <sup>ème</sup> siècle d'après la méthode lichénométrique.....	25
2.1 Introduction .....	25
2.2 Les données utilisées et la zone d'étude.....	25
2.2.1 Les données utilisées .....	25
2.2.2 La zone d'étude .....	26
2.3 Méthodologie.....	26
2.3.1 Les mesures de terrain .....	26
2.3.2 L'élaboration de la courbe de croissance des lichens.....	27
2.3.3 La datation des aires de mesure.....	29
2.4 Résultats .....	29

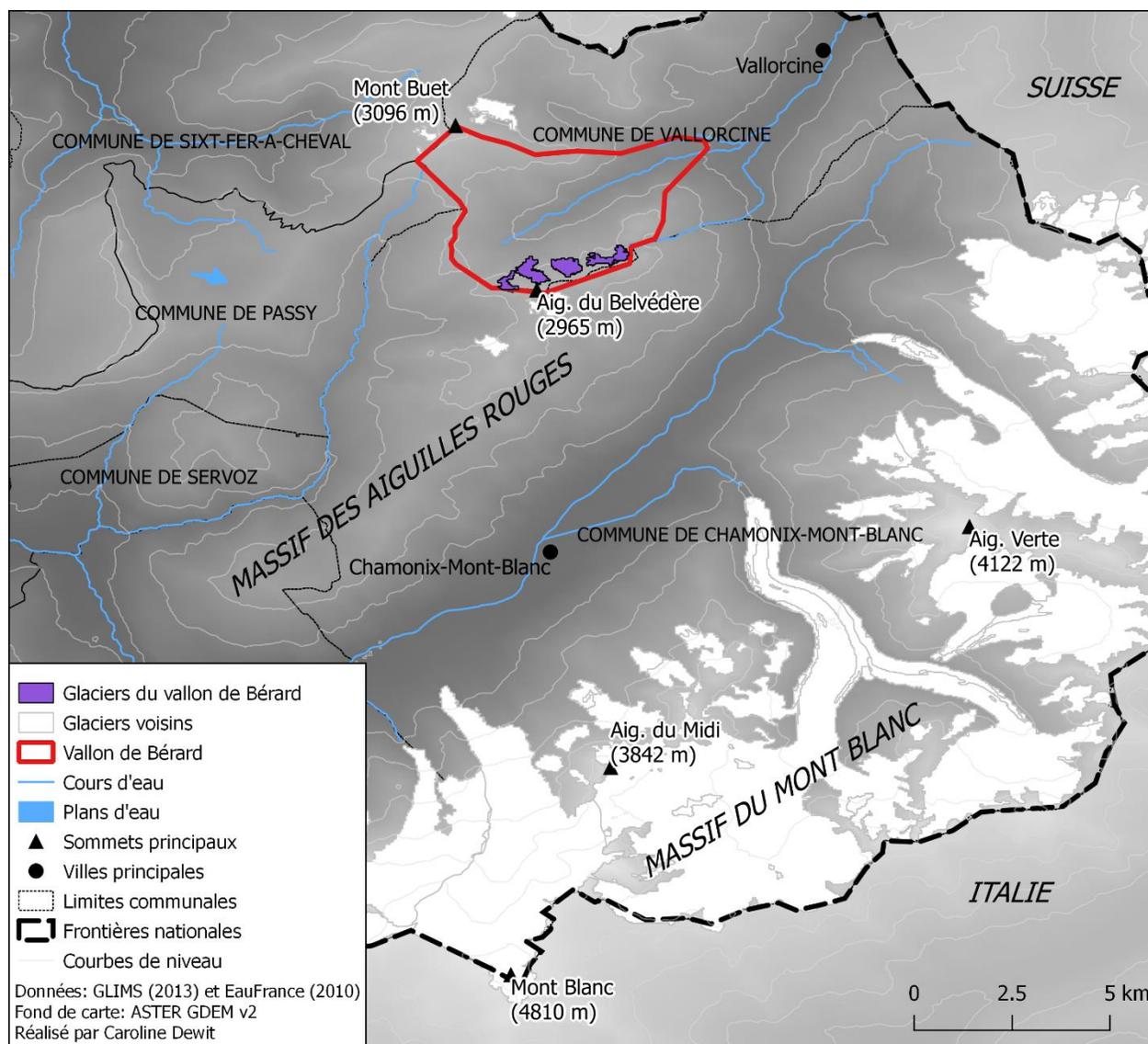
2.4.1 Les mesures de terrain .....	29
2.4.2 La datation lichénométrique .....	30
2.5 Discussion .....	31
2.6 Conclusion.....	31
Chapitre 3 – La dynamique végétale en marge proglaciaire des glaciers du vallon de Bérard selon la théorie de la succession écologique.....	33
3.1 La succession écologique .....	33
3.1.1 Présentation du processus.....	33
3.1.2 Le modèle classique de la succession.....	34
3.1.3 Analyse critique des concepts .....	34
3.2 La succession écologique suite au retrait glaciaire.....	35
3.2.1 La succession écologique à l'échelle de l'interglaciaire .....	35
3.2.2 La succession écologique à l'étage alpin et nival.....	36
3.2.3 La succession écologique en marge proglaciaire .....	37
3.3 La succession écologique en marge proglaciaire dans le vallon de Bérard.....	38
3.3.1 Le biotope : la marge proglaciaire dans le vallon de Bérard .....	38
3.3.2 La perturbation : le retrait des glaciers du vallon de Bérard.....	39
3.3.3 La biocénose : inventaire et analyse des espèces présentes dans la marge proglaciaire du vallon de Bérard .....	39
3.4 Conclusion.....	45
Conclusion générale .....	47
Annexes .....	49
Annexes du chapitre 1 .....	51
Annexes du chapitre 2 .....	54
Rapport du stage de terrain (août - septembre 2015).....	55
Bibliographie .....	67
Liste des figures.....	68
Liste des tableaux .....	69
Liste des annexes.....	70

## Introduction générale

La cryosphère, définie par l'ensemble de l'eau à la surface de la Terre qui se trouve à l'état solide (les calottes glaciaires, la banquise, les glaciers, la neige et le permagel), a un rôle primordial dans la régulation du climat global. D'une part, la cryosphère est particulièrement sensible aux variations climatiques du fait de ses caractéristiques thermiques - ce qui en fait le principal indicateur visible à l'œil nu du réchauffement climatique actuel. D'autre part, la variation de la surface de la cryosphère entraîne en retour des modifications du climat, dans la mesure où l'albédo (la fraction du rayonnement solaire réfléchi par les surfaces terrestres) des surfaces de la cryosphère est l'un des plus forts de la planète : une diminution de la surface de la cryosphère entraîne une baisse de l'albédo global, ce qui entraîne une diminution du pourcentage de rayons solaires réfléchis par la planète (donc une augmentation du pourcentage de rayons solaires absorbés), soit un réchauffement global. Or, depuis le dernier maximum glaciaire, il y a 22000 à 18000 ans, la Terre se situe dans une période de réchauffement climatique nommée holocène, durant laquelle la cryosphère a vu sa surface diminuer de plus de la moitié : alors que les glaciers occupaient un quart de la surface terrestre émergée au dernier maximum glaciaire, ils n'en représentent aujourd'hui que 10% (Baumhauer & Winkler, 2014). Les études contemporaines portant sur les variations de la surface de la cryosphère, notamment via le retrait des glaciers, visent notamment à apporter des précisions sur l'état actuel, passé et prévisionnel du climat. Ce mémoire s'inscrit dans cette même visée, à travers l'étude de la dynamique passée, récente et prévisionnelle des glaciers du vallon de Bérard (massif des Aiguilles Rouges, Alpes françaises).

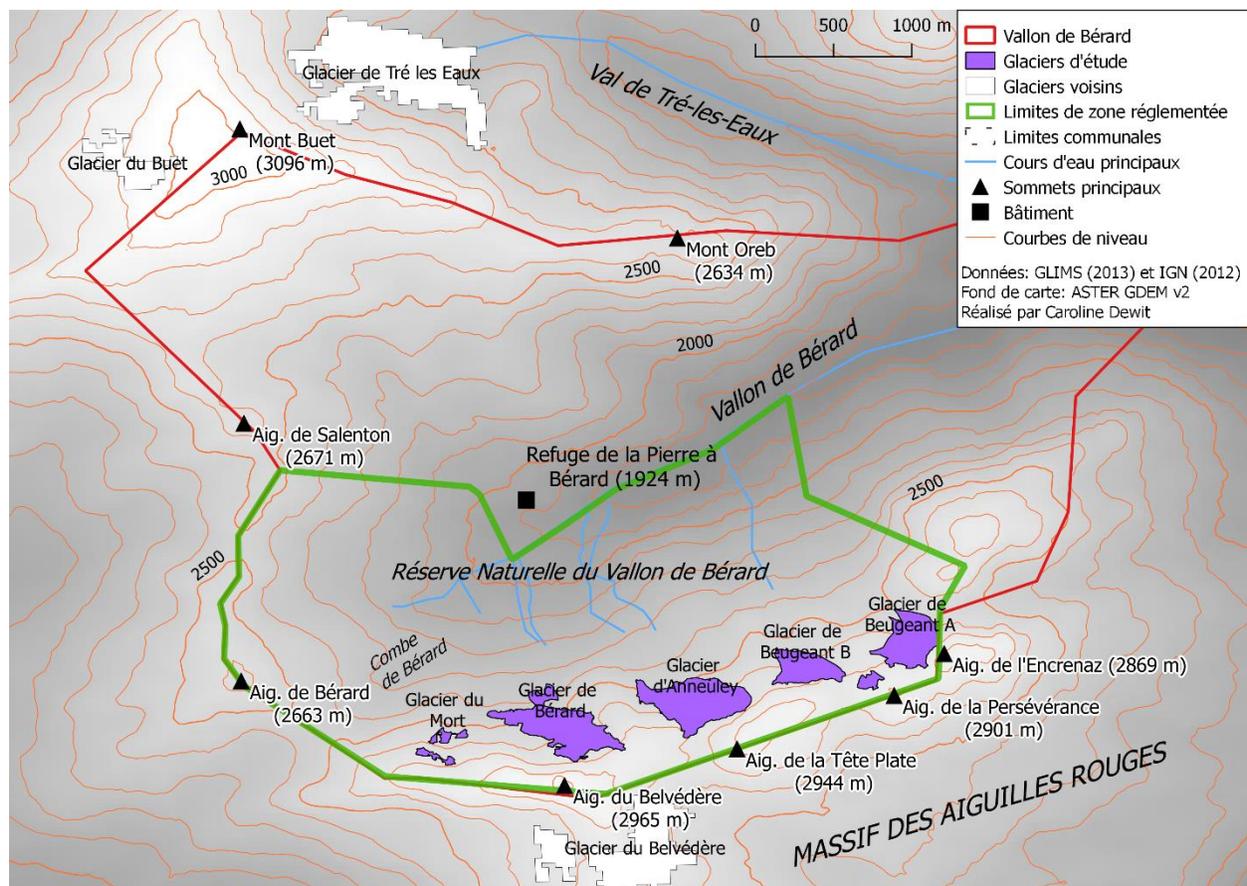
Entre 1885 et 2007, les Alpes françaises ont connu une nette augmentation de la température annuelle moyenne, avec un taux de réchauffement centennal de 0.87 °C (Dumas, 2013). Dans ce contexte de réchauffement climatique, le dernier inventaire en date des glaciers des Alpes françaises témoigne d'un retrait glaciaire général depuis la fin du Petit Âge Glaciaire et tout particulièrement depuis les 50 dernières années : ainsi, entre 1967-1971 et 2006-2009, la surface totale des glaciers des Alpes françaises a diminué en moyenne de 52% (Gardent, 2014). Dans sa thèse, l'auteure donne des résultats généraux pour l'ensemble des 581 glaciers (en 2006-2009) des Alpes françaises, répartis dans 8 massifs. Les glaciers du vallon de Bérard n'y font pas l'objet d'une étude individuelle, mais sont pris en compte dans l'étude sur l'évolution moyenne de l'ensemble des glaciers du massif des Aiguilles Rouges – Mont Ruan. En moyenne, les glaciers du massif des Aiguilles Rouges – Mont Ruan ont connu une perte de leur longueur de 26.01% entre 1967-1971 et 2006-2009 (Gardent, 2014). Ce massif comporte 17 glaciers occupant une superficie totale de 2.71 km<sup>2</sup> en 2006-2009 (Gardent, 2014), parmi lesquels se trouvent les glaciers du vallon de Bérard (Figure 1) : le glacier de Bérard, le glacier d'Anneuley, le glacier de Beugeant et le glacier du Mort.

Depuis la création de la Réserve Naturelle du Vallon de Bérard en 1992, les quatre glaciers suscités sont soumis à la réglementation en vigueur dans les Réserves Naturelles Nationales (RNN) (Figure 2). Cette réserve, qui occupe une partie du versant nord (ubac) du vallon de Bérard sur une étendue de 540 ha, a été créée initialement dans le cadre d'une mesure de compensation environnementale face à l'implantation d'une unité nouvelle de tourisme dans le massif des Aiguilles Rouges. A ce titre, les glaciers du vallon de Bérard sont soumis aux mesures de protection et au suivi scientifique propres aux Réserves Naturelles Nationales (RNN). En Haute-Savoie, les RNN sont aujourd'hui gérées par Asters, association loi 1901 créée en 2000 qui a la double fonction d'association de protection de la nature et de Conservatoire départemental d'Espaces Naturels (Long, 2013). Dans le massif des Aiguilles rouges, une deuxième association de protection de l'environnement (l'Association des Réserves Naturelles des Aiguilles Rouges, ARNAR) se joint aux recherches scientifiques portant sur glaciers du vallon de Bérard. Le sujet de ce mémoire de recherche, proposé par l'ARNAR en 2015, s'inscrit dans ce programme.



**Figure 1. Localisation de la zone d'étude (en rouge) et extension des glaciers d'étude (en violet) dans le contexte glaciaire régional (glaciers du massif du Mont-Blanc et glaciers du massif des Aiguilles Rouges – Mont Ruan).**

La bibliographie de l'étude à l'échelle individuelle de l'évolution des glaciers du vallon de Bérard se limite à notre connaissance à deux titres : un mémoire de maîtrise proposé par l'ARNAR portant sur l'évolution récente des glaciers de la Réserve Naturelle du Vallon de Bérard et la description géomorphologique de leur marge proglaciaire (Rees Catalan, 2012), et un rapport de stage en entreprise réalisé à Asters portant sur le suivi du retrait des glaciers protégés en Réserve Naturelle en Haute-Savoie - à savoir le glacier du Ruan (RNN Sixt-Passy), le glacier de Tré-la-Tête (RNN Contamines-Montjoie) et les glaciers d'Anneuley, de Bérard, de Beugeant et du Mort (RNN Vallon de Bérard) (Long, 2013). Le premier propose une étude sur l'évolution des glaciers du vallon de Bérard entre 1860 et 2008 à partir de l'analyse de photographies aériennes (orthophotos) de l'IGN et d'archives picturales anciennes (Rees Catalan, 2012). Le second propose une partie consacrée à l'évolution des glaciers du vallon de Bérard entre 1998 et 2008 à partir d'une seconde méthode d'analyse des orthophotos de l'IGN et entre 1999 et 2012 à partir du suivi photographique mis en place par Asters (Long, 2013).



**Figure 2. Localisation des glaciers d'étude au sein du vallon de Bérard. L'extension des glaciers d'étude est représentée d'après les orthophotos de 2012 de l'IGN (cf. Chapitre 1). En 2012, le glacier de Beugeant est morcelé en deux parties principales, dont l'une est située à l'est (glacier de Beugeant A) et l'autre à l'ouest (glacier de Beugeant B).**

L'intitulé du mémoire est le suivant : « Méthodes alternatives à l'analyse géomorphologique et glaciologique pour la reconstitution de la dynamique récente, historique et prévisionnelle des glaciers du vallon de Bérard (massif des Aiguilles Rouges, Alpes françaises) ». Jusque-là, les glaciers font l'objet d'un suivi photographique par Asters, ils ont également été étudiés sous l'angle de la géomorphologie glaciaire (Rees Catalan, 2012). Les glaciers du vallon de Bérard n'ont pas fait jusque-là l'objet d'analyse glaciologique (notamment de mesures de bilans de masse) pour des raisons techniques – notons que seuls 7 glaciers bénéficient actuellement de mesures de bilans de masse dans les Alpes françaises (Gardent, 2014). Ce mémoire propose des nouvelles méthodes, applicables à l'étude des glaciers du vallon de Bérard et alternatives à ces deux grandes catégories de méthodes généralement utilisées dans l'étude des glaciers : la géomorphologie glaciaire et la glaciologie. Enfin, le terme « dynamique » est préféré à celui d'« évolution » dans l'intitulé afin de souligner la dimension active des glaciers, masses solides en perpétuel mouvement.

L'objectif majeur de ce mémoire est double. Il s'agit d'une part d'actualiser le suivi scientifique effectué par Asters et par Rees Catalan (2012) sur l'évolution des glaciers du vallon de Bérard depuis 2008, et d'autre part de compléter les études existantes sur l'évolution récente et historique de ces glaciers en élargissant la période d'étude, permettant de reconstituer l'évolution des glaciers du Petit Âge Glaciaire au milieu du XXI<sup>e</sup> siècle, et en apportant de nouveaux champs de la recherche. Ce mémoire apporte ainsi des résultats

acquis selon différentes méthodes venant de la géomatique (Chapitre 1), de la lichénométrie (Chapitre 2) et de l'écologie (Chapitre 3).

Le premier chapitre propose une étude sur l'évolution récente des glaciers du vallon de Bérard à partir de la modélisation de leur ligne d'écoulement sous Système d'Informations Géographiques (SIG) entre 2000 et 2012. Cette étude est l'occasion de proposer une évolution prévisionnelle de la longueur des glaciers d'ici 2050. Dans ce chapitre, nous proposons également une première d'analyse de l'influence du climat local sur le retrait des glaciers. Le deuxième chapitre propose une étude sur l'évolution historique des glaciers du vallon de Bérard, du XVI<sup>e</sup> siècle (Petit Âge Glaciaire) au tournant du XX<sup>e</sup> siècle, à partir de mesures de terrain effectuées sur une espèce de lichens, d'après la méthode lichénométrique. Le troisième chapitre constitue une étude de la dynamique végétale en marge proglaciaire dans le vallon de Bérard, sous le prisme de la théorie de la succession écologique. Ce dernier chapitre propose d'étudier indirectement l'évolution historique des glaciers du vallon de Bérard par l'intermédiaire de l'étude de la colonisation successive des espèces végétales suite au retrait glaciaire.

Parallèlement aux trois chapitres suscités, un rapport du stage de terrain effectué dans le cadre de ce travail de recherche a été réalisé. Ce rapport figure en annexe. Y sont rapportées les observations faites durant ce stage, illustrées par des photographies réalisées sur le terrain et portant sur les multiples dimensions de l'évolution récente et historique des glaciers du vallon de Bérard.

# Chapitre 1 – L'évolution récente et prévisionnelle de la longueur des glaciers du vallon de Bérard d'après la modélisation de leur ligne d'écoulement sous SIG

## 1.1 Introduction

Situés dans le massif des Aiguilles Rouges, les glaciers du vallon de Bérard font partie des glaciers français au sujet desquels on dispose de peu de données glaciologiques qui nous permettraient d'évaluer leur retrait. L'absence de suivi du recul du front des glaciers du vallon de Bérard justifie, sinon motive l'utilisation d'un modèle. La mise à disposition récente de données orthophotographiques par l'IGN et de données radiométriques (tels les MNE, Modèles Numériques d'Élévation) par le METI et la NASA, à haute résolution, rend possible la modélisation de l'évolution récente de tous les glaciers en France. C'est dans ce contexte que nous avons décidé de modéliser l'évolution des glaciers de notre aire d'étude sous un système d'informations géographiques (SIG). Dans ce chapitre, nous allons appliquer la méthode de l'algorithme de la ligne d'écoulement (*Flow Line Algorithm*) créée par Le Bris et Paul (2013) qui permet de générer automatiquement des lignes d'écoulement glaciaire afin de déterminer la longueur des glaciers. Cet objectif est innovant dans l'étude des glaciers du vallon de Bérard, puisque jusque-là, à notre connaissance, la longueur réelle des glaciers, c'est-à-dire la longueur tenant compte de la pente et non la longueur projetée sur les orthophotos, n'avait jamais été calculée.

La ligne d'écoulement telle qu'elle est modélisée ici, représente non pas la trajectoire de l'écoulement subglaciaire des eaux de fonte du glacier, mais décrit plutôt la direction du déplacement du glacier. La ligne d'écoulement relie le point altitudinal le plus élevé et le point altitudinal le plus bas du glacier, et passe par le centre du glacier en évitant les obstacles rocheux. Ce modèle permet d'une part d'approcher précisément la longueur du glacier (i.e. la variation du front glaciaire) pour une année donnée, et d'autre part il permet d'anticiper les fluctuations futures du glacier. Le glacier se déplaçant le long de la ligne d'écoulement modélisée, il est possible, à partir de l'étude des fluctuations glaciaires passées sur plusieurs années, de prévoir les formes successives que prendra le glacier lors de son retrait futur. Ce chapitre se donne ainsi deux objectifs principaux : déterminer l'évolution de la longueur (i.e. la variation du front) des glaciers du vallon de Bérard entre 2000 et 2012, puis proposer une simulation de leur positionnement en 2050. Enfin, nous tenterons d'apporter une explication de l'évolution de la longueur des glaciers à partir du facteur principalement cité lorsqu'il s'agit du retrait glaciaire, le climat, à partir de données climatologiques locales.

## 1.2 Données et méthode

### 1.2.1 Les données utilisées

Pour cette étude nous avons utilisé les logiciels libres QGIS 2.14.0-Essen et AutoCAD 2014. L'analyse statistique a été réalisée sur le logiciel propriétaire Excel 2013. L'algorithme de la ligne d'écoulement formulé par Le Bris et Paul (2013) requiert deux types de données comme *input*. D'une part, l'algorithme nécessite les contours des glaciers digitalisés, sous la forme de données vectorielles polygonales ; d'autre part, il requiert un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) sous format raster.

## Chapitre 1 – L'évolution récente et prévisionnelle de la longueur des glaciers du vallon de Bérard d'après la modélisation de leur ligne d'écoulement sous SIG

### a) *Les données vectorielles*

Les contours des glaciers ont été obtenus à la fin d'une phase de *preprocessing*, à partir d'un jeu de données fourni par l'IGN composé des orthophotos suivantes : BD Ortho® 50 cm éditions anciennes (2000, 2004 et 2008) et BD Ortho® 50 cm (2012) pour le département 74 (Haute-Savoie). Ces données sont accessibles sur acte d'acceptation dans le cadre de l'enseignement et de la recherche sur l'espace professionnel du site de l'IGN (<http://professionnels.ign.fr>). Les photos aériennes acquises couvrent tout le département du 74 et sont de haute résolution (50 cm). Pour couvrir la zone du vallon de Bérard, nous avons utilisé les dalles 0995-6555 et 1000-6555 pour les éditions anciennes (2000, 2004 et 2008) et les dalles numérotées de 0998-6551 à 1001-6552 pour l'édition de 2012. Les orthophotos sont projetées en Lambert-93 sous le système géodésique du Réseau Géodésique Français de 1993 (RGF93).

Les missions de l'IGN sont à intervalle régulier (tous les quatre ans) et sont réalisées en été. Au vu des fortes différences en termes de couvert de neige selon les missions, sur les parcelles étudiées, nous avons noté les dates exactes des missions. Les clichés ont été pris respectivement entre le 27/06/2000 et le 23/08/2000, entre le 26/06/2004 et le 18/07/2004, entre le 10/08/2008 et le 08/09/2008 et entre le 08/08/2012 et le 17/08/2012. Les missions de 2000 et 2004 ont été réalisées au début de l'été, tandis que les missions de 2008 et 2012 ont été réalisées à la fin de l'été. Ces dates donnent des informations relatives à la fonte saisonnière des neiges de l'année : la couverture neigeuse est plus faible à la fin de l'été qu'au début, car c'est au milieu de l'été que les températures sont les plus chaudes (juillet et août) (cf. Chapitre 2, Tableau 3). Ces dates donnent également des informations relatives à la fonte annuelle des neiges, que nous pouvons mettre en relation avec les données thermiques fournies par Météo France.

### b) *Les données raster*

Un modèle numérique d'élévation (MNE) est une représentation numérisée du relief. Le modèle numérique d'élévation (MNE) utilisé est ASTER GDEM v2. Il s'agit de la seconde version du MNE mesuré par le radiomètre ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), où GDEM (*Global Digital Elevation Model*) se traduit par MNE global. ASTER GDEM v2 est un modèle réalisé en 2009 par le METI (Ministry of Economy, Trade and Industry) et la NASA (National Aeronautics and Space Administration). Le modèle couvre la totalité du globe et est disponible librement depuis 2011 (Gardent, 2014). Ce MNE peut être téléchargé gratuitement dans sa totalité ou par extraits selon la zone géographique sur le site de ASTER Viewer (<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/#...type=rectangle>) après inscription sur le site de la EOSDIS. La version 2 de ASTER GDEM donne les valeurs altitudinales de pixels d'une résolution d'un arc-seconde, en mètres verticaux cela donne une résolution variable selon la latitude entre 30 et 10 mètres (27 mètres dans les Alpes), pour une précision altimétrique et planimétrique de 10 mètres. Le modèle ASTER GDEM v2 est fourni dans le système de projection World Geodetic System de 1984 (WGS 84).

### c) *Les données climatologiques*

Cette étude utilise les données climatologiques mesurées sur la station Aiguilles Rouges – Nivôse fournies par Météo France pour la période 1995-2015. Les données ne sont pas disponibles publiquement, elles ont été acquises en février et mars 2016 par l'intermédiaire de l'accès aux données accordé au CNRS pour l'enseignement et la recherche. La station Aiguilles Rouges – Nivôse (45°59'24"N, 6°54'00"E) est la station météorologique la plus proche des glaciers du vallon de Bérard. Elle se situe sur la commune de Chamonix-Mont-Blanc, sur le versant sud (adret) du massif des Aiguilles Rouges à une altitude de 2365 mètres. Cette station fait partie des stations nivôse, au nombre de 16 sur le territoire français, qui sont des stations automatiques implantées en haute-montagne relevant les hauteurs de neige, températures et certaines données relatives au vent. Pour cette étude, nous avons utilisé les températures mensuelles moyennes en °C sur la période qui s'étend de janvier 1995 à décembre 2015.

## 1.2.2 Méthodologie

### a) Préparation des données : preprocessing

Une première étape de la méthode, nommée *preprocessing*, a consisté à préparer les données pour permettre l'application de l'algorithme de la ligne d'écoulement. Le *preprocessing* a suivi quatre étapes :

- La digitalisation des contours des glaciers.

La digitalisation a été réalisée manuellement, à partir des orthophotos de l'IGN, par création de couches vectorielles polygonales grâce aux outils de digitalisation de QGIS. Une couche vectorielle a été créée pour chaque année d'observation (2000, 2004, 2008 et 2012). Les polygones créés ont été dessinés avec une précision de 1 mètre. La délimitation des glaciers s'est réalisée à partir de la détermination visuelle de la nature de la surface (glace, neige ou roche) en favorisant la digitalisation de la glace seule. L'étude des couches résultantes n'est pas suffisante pour étudier l'évolution des glaciers, dans la mesure où la pente n'est pas prise en compte dans le calcul des surfaces et des longueurs des glaciers : les surfaces calculées seront les surfaces projetées, et non les surfaces réelles – d'où l'intérêt de combiner l'information fournie par les orthophotos avec un MNE.

- La projection des contours des glaciers en WGS 84.

Afin de pouvoir associer les nouvelles couches vectorielles et le MNE, nous avons modifié la projection des contours des glaciers (initialement dans le système de projection des orthophotos de l'IGN, en RGF-93) afin qu'ils soient projetés en WGS 84.

- La préparation du raster MNE de la zone.

La zone couverte par le vallon de Bérard s'étend sur deux dalles de ASTER GDEM v2 (N45E006 et N46E006) que nous avons joint avec l'outil raster divers « *Build a virtual raster* » afin de créer un fichier raster de format .vrt couvrant la zone.

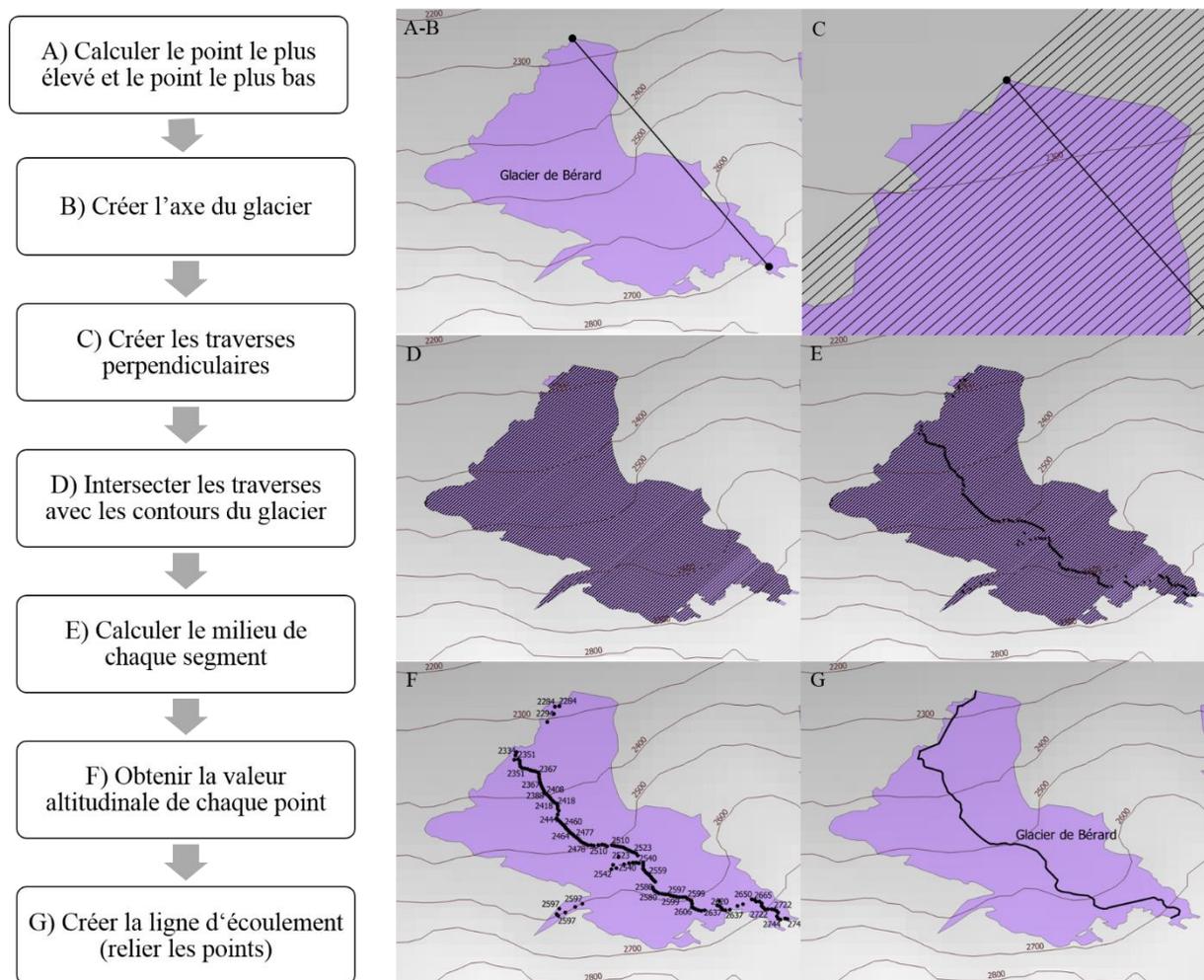
- La préparation du fond de carte : création des courbes de niveau.

Pour une meilleure compréhension des cartes, les courbes de niveau de la zone ont été dessinées avec un intervalle de 100 mètres, grâce à l'outil raster d'extraction « *Contour* ».

### b) L'algorithme de la ligne d'écoulement

L'application de l'algorithme de la ligne d'écoulement selon Le Bris et Paul (2013) nécessite la mise en œuvre de 7 étapes (Figure 3) :

A) Calculer le point le plus élevé et le point le plus bas : Il s'agit de localiser le point altitudinal le plus élevé et le plus bas se trouvant sur le contour du glacier. Pour cela, nous avons créé une couche vectorielle ponctuelle représentant les contours du glacier sous forme de points, grâce à l'outil géométrique « Extraction des nœuds » appliqué à la couche polygonale des contours des glaciers. Nous avons ensuite obtenu l'altitude de chacun de ces points en appliquant l'extension *Point Sampling Tool* sur la couche ponctuelle des contours des glaciers et le MNT, puis nous avons extrait manuellement les points à l'altitude la plus élevée et la plus basse. Une vérification visuelle a été réalisée afin d'assurer la cohérence des lignes d'écoulement pour chaque glacier d'une année sur l'autre. Ainsi, dans le cas où plusieurs points aux extrémités ont une altitude égale ou semblable (+/- 10 mètres), nous choisissons le point qui est dans la continuité des lignes d'écoulement des années précédentes et suivantes.



**Figure 3. Illustration de l'application de l'algorithme de la ligne d'écoulement selon ses principales étapes d'après Le Bris et Paul (2013). Les lettres en haut à gauche de chaque illustration font référence à l'étape correspondante, décrite sur la partie gauche de la figure.**

B) Créer l'axe du glacier : L'axe du glacier est la ligne droite reliant le point altitudinal le plus élevé au point le plus bas du glacier. Il est supposé indiquer la direction générale de l'écoulement du glacier. A partir de la couche ponctuelle composée des deux extrêmes du glacier, l'extension *Points2One* permet de créer une ligne reliant les deux points.

C) Créer les traverses perpendiculaires : Il s'agit de créer des droites perpendiculaires à l'axe des glaciers à intervalle régulier recouvrant l'ensemble du glacier. Pour chaque glacier, la première perpendiculaire a été tracée sur AutoCAD 2014. Sur QGIS, nous avons ensuite procédé à la création de l'intervalle qui séparera chaque traverse, grâce à l'extension *QChainage*. L'intervalle a été fixé à 0,00005 degrés en projection WGS 84, et prend la forme d'un chainage le long de l'axe des glaciers. La création des droites parallèles (les traverses) à la première perpendiculaire, passant par chaque point du chainage, a été réalisée avec l'outil *Parallel Line* de l'extension *CadTools*.

D) Intersecter les traverses avec les contours du glacier : à l'aide de l'outil *Clip* de *Geoprocessing*, nous obtenons l'intersection entre les contours du glacier et les traverses perpendiculaires.

E) Calculer le milieu de chaque segment : à l'aide de l'extension *QChainage*, les traverses peuvent être divisées en plusieurs segments égaux, nous effectuons donc une division en deux segments égaux afin d'obtenir le milieu. L'extension ne prenant pas en compte les contours et obstacles internes au glacier, il est nécessaire de réaliser une coupure manuelle des segments qui traversent une zone située en dehors du contour du glacier. A ces points de milieu de segment, nous ajoutons le point le plus élevé et le point le plus bas, créés à l'étape A), par une fusion de couches vectorielles. Les points résultants de cette étape formeront le squelette de la ligne d'écoulement. En se basant sur les milieux des traverses perpendiculaires découpées selon la forme du glacier, la ligne d'écoulement prend ainsi compte de la forme générale des contours du glacier dans ses irrégularités. L'étude de l'évolution de longueur de la ligne d'écoulement permet donc non seulement d'estimer le recul du front glaciaire au point du glacier situé le plus en aval, mais également de prendre en compte indirectement les variations de la surface du glacier dans son ensemble.

F) Obtenir la valeur altitudinale de chaque point : L'altitude des points est extraite du MNE à l'aide de l'extension *Point Sampling Tool*.

G) Créer la ligne d'écoulement (relier les points) : La ligne d'écoulement est modélisée selon trois règles, i) relier les points de l'amont à l'aval, depuis le point le plus élevé jusqu'au point le plus bas, ii) ne pas traverser les contours des glaciers (y compris les obstacles rocheux internes), et iii) relier chaque point à son voisin le plus proche. La ligne d'écoulement est dessinée grâce à l'extension *Point2One* qui relie les points entre eux dans l'ordre de leur numéro d'identifiant (ID). Afin d'appliquer les règles i) et iii), un nouveau champ a été créé dans lequel l'ID des points a été ordonné selon l'altitude et, manuellement, selon la distance au point suivant. Pour les glaciers fragmentés en plusieurs parties, la ligne d'écoulement a été sectionnée en autant de parties et les parties de la ligne située à l'extérieur des contours des glaciers ont été supprimées.

Dans cette étude, nous avons réitéré l'algorithme sur chacun des 5 glaciers, pour chacune des années d'observation (2000, 2004, 2008 et 2012).

#### c) Métrique des glaciers étudiés

La longueur des lignes d'écoulement a été calculée sur QGIS par la fonction *\$length*, puis a été analysée statistiquement à l'aide du tableur Excel. Pour chaque glacier fragmenté en plusieurs parties, les longueurs de chaque partie de la ligne d'écoulement ont été additionnées. Pour la période 2000-2012, la variation diachronique de la longueur a été calculée. L'estimation de la longueur prévisionnelle de la ligne d'écoulement des glaciers pour la période 2013-2050 a ensuite été calculée à partir de la modélisation linéaire de l'évolution de la longueur de chaque glacier entre 2000 et 2012. Cinq modèles linéaires ont donc été produits. L'équation de la droite des 5 fonctions affines résultant de la modélisation linéaire a été appliquée aux années 2013-2050. Les coefficients de corrélation ( $R^2$ ) ont été calculés pour chaque modèle, indiquant la significativité du modèle linéaire pour chaque glacier.

#### d) Analyse statistique des données climatologiques

Afin de rendre compte de l'évolution climatique saisonnière, qui rythme la dynamique des glaciers à l'échelle annuelle, l'évolution climatique est représentée par l'évolution des températures moyennes saisonnières entre 1995 et 2015. Cette analyse a pour but de mettre en relation l'évolution de la longueur des glaciers entre 2000 et 2012 avec l'évolution du climat local. Par climat local, on entend l'ensemble des conditions climatiques du biotope où il s'exerce (cf. Chapitre 3), ici étendu au massif des Aiguilles rouges. D'après la thèse selon laquelle le climat influence directement la dynamique des glaciers, il est intéressant d'étudier l'évolution des températures sur une période plus longue, afin de prendre en compte le temps de retard avec lequel les glaciers réagissent au climat. Cette analyse se base sur la période 1995-2015 (et non

2000-2012) selon l'hypothèse que les glaciers peuvent réagir aux fluctuations climatiques avec un retard d'au moins 5 ans.

Deux séries de valeur ont été calculées : la température estivale moyenne et la température hivernale moyenne. La température estivale moyenne de chaque année étudiée est le résultat de la moyenne arithmétique des températures moyennes mensuelles des mois d'avril, mai, juin, juillet, août et septembre, et la température hivernale moyenne de chaque année étudiée est le résultat de la moyenne arithmétique des températures moyennes mensuelles d'octobre, novembre, décembre, janvier, février et mars. Nous avons ensuite appliqué la modélisation la plus satisfaisante possible aux deux séries de valeur selon la valeur des coefficients de corrélation ( $R^2$ ) : il s'agit d'un modèle polynomial d'ordre 6.

## 1.3 Résultats

### 1.3.1 L'évolution de la longueur des glaciers entre 2000 et 2012

Les résultats directement extraits de la table attributaire des couches vectorielles réalisées à l'issue de l'algorithme de la ligne d'écoulement figurent en annexe (Annexe 1). Y figurent les données altitudinales des points les plus bas et des points les plus hauts pour chaque glacier, la longueur de leur ligne d'écoulement, et les résultats moyens pour l'ensemble des glaciers.

Les cartes réalisées (Figure 4) représentent la superposition des lignes d'écoulement obtenues avec l'algorithme élaboré par Le Bris et Paul (2013) ainsi que la superposition des contours des cinq glaciers (glacier du Mort, glacier de Bérard, glacier d'Anneuley, glacier de Beugeant A et glacier de Beugeant B), pour les quatre années étudiées (2000, 2004, 2008 et 2012). Les lignes d'écoulement pour l'année 2012 du glacier du Mort et du glacier de Beugeant B sont discontinues, du fait de la fragmentation des deux glaciers en plusieurs parties. Le glacier du Mort se retrouve en effet morcelé en trois névés de glace résiduelle, tandis que le glacier de Beugeant B (partie ouest du glacier de Beugeant) est séparé de sa zone d'alimentation située en amont.

La comparaison visuelle des lignes d'écoulement et des points d'altitude minimaux successifs permet d'affirmer la tendance de retrait du front glaciaire des glaciers de 2000 à 2012. L'analyse visuelle au cas par cas montre toutefois que certains glaciers ont connu des avancées et des stagnations au cours de la période.

Le Tableau 1 donne les résultats de la validation statistique de l'évolution de la longueur de la ligne d'écoulement des glaciers entre 2000 et 2012. La variation moyenne la longueur de la ligne d'écoulement entre 2000 et 2012 est négative : en moyenne pour l'ensemble des glaciers du vallon de Bérard, elle a diminué de 179 mètres (19.56%). La période durant laquelle la longueur moyenne de la ligne d'écoulement des glaciers a le plus diminué est la période entre 2008 et 2012 avec une perte moyenne de 90 mètres (10.88%), suivie de la période entre 2000 et 2004 avec une perte de 61 mètres (6.65%), contre 28 mètres (3.31%) entre 2004 et 2008.

Le glacier dont la longueur a le plus diminué au cours de la période est le glacier du Mort, avec une perte totale de 311 mètres (soit 38.40% de la longueur en 2000), suivi du glacier de Beugeant B, avec une perte de 193 mètres (20.78%), et du glacier de Bérard, avec une perte de 234 mètres (20.05%). La perte totale des deux autres glaciers est moindre : elle s'élève à 78 mètres pour le glacier de Beugeant A (11.52%) et 78 mètres pour le glacier d'Anneuley (7.90%). Au sein de la période 2000-2012, nous observons toutefois à quatre reprises une hausse de la longueur des glaciers (5.38% pour le glacier de Bérard entre 2004 et 2008, 0.87% puis 2.74% pour le glacier de Beugeant A entre 2004 et 2008 et entre 2008 et 2012, et 7.43% pour le glacier de Beugeant B entre 2000 et 2004).

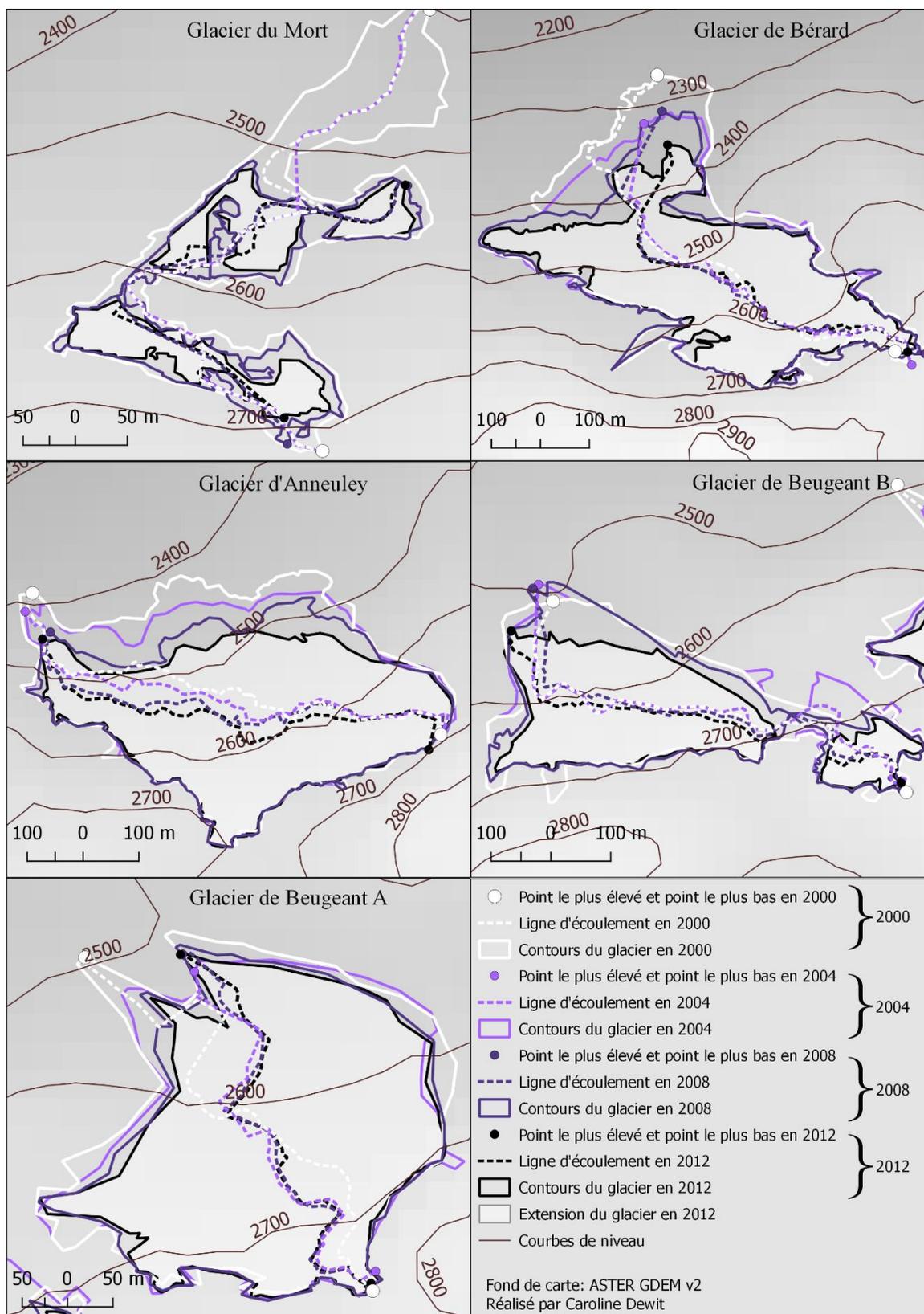


Figure 4. Comparaison des lignes d'écoulement et des contours des glaciers du vallon de Bérard en 2000, 2004, 2008 et 2012, modélisées d'après l'algorithme de la ligne d'écoulement.

Chapitre 1 – L'évolution récente et prévisionnelle de la longueur des glaciers du vallon de Bérard d'après la modélisation de leur ligne d'écoulement sous SIG

Les résultats portant sur la période la plus récente (2008-2012) permettent de constater que quatre des cinq glaciers ont vu leur longueur diminuer entre 2008 et 2012, dont trois avec une variation située entre 10% et 25% et un avec une variation moindre ; tandis que l'un des glaciers a connu une légère augmentation de sa longueur. La longueur du glacier de Bérard a diminué de 10.12% (passant de 1038 à 933 mètres), celle du glacier de Beugeant B a diminué de 19.47% (passant de 914 à 736 mètres), celle du glacier du Mort de 24.62% (passant de 662 à 499 mètres). La longueur du glacier d'Anneuley a quant à elle relativement peu diminué, avec une perte de 2.05% (passant de 928 à 909 mètres). Seul le glacier de Beugeant A a perçu une augmentation de sa longueur. Celle-ci est toutefois relativement faible : elle s'élève à 2.74% (passant de 583 à 599 mètres).

**Tableau 1. Evolution de la longueur des lignes d'écoulement modélisées entre 2000 et 2012 pour chaque glacier et évolution moyenne. La longueur (L) de la ligne d'écoulement est donnée en mètres (m) et la variation de la longueur ( $\Delta L$ ) d'une année sur l'autre est donnée en mètres (m) et pourcentages (%). Les cellules grisées représentent l'absence logique d'informations.**

		2000	2004	2008	2012	Total
Glacier d'Anneuley	L (m)	987	968	928	909	
	$\Delta L$ (m)		-19	-40	-19	-78
	$\Delta L$ (%)		-1.93	-4.13	-2.05	-7.90
Glacier de Bérard	L (m)	1167	985	1038	933	
	$\Delta L$ (m)		-182	53	-105	-234
	$\Delta L$ (%)		-15.60	5.38	-10.12	-20.05
Glacier de Beugeant A	L (m)	677	578	583	599	
	$\Delta L$ (m)		-99	5	16	-78
	$\Delta L$ (%)		-14.62	0.87	2.74	-11.52
Glacier de Beugeant B	L (m)	929	998	914	736	
	$\Delta L$ (m)		69	-84	-178	-193
	$\Delta L$ (%)		7.43	-8.42	-19.47	-20.78
Glacier du Mort	L (m)	810	737	662	499	
	$\Delta L$ (m)		-73	-75	-163	-311
	$\Delta L$ (%)		-9.01	-10.18	-24.62	-38.40
Moyenne	L (m)	914	853	825	735	
	$\Delta L$ (m)		-61	-28	-90	-179
	$\Delta L$ (%)		-6.65	-3.31	-10.88	-19.56

### 1.3.2 La modélisation de la longueur des glaciers en 2050

A partir de l'hypothèse d'une conservation de la vitesse de retrait de la longueur des lignes d'écoulement, une modélisation linéaire de l'évolution de la longueur de chaque glacier entre 2000 et 2012 a été établie (Figure 5). Les résultats concernant la significativité de la modélisation linéaire proposée sont variables : la valeur du coefficient de corrélation linéaire ( $R^2$ ) pour les glaciers d'Anneuley et du Mort est très significative (avec respectivement 0.98 et 0.96), tandis que la valeur de  $R^2$  correspondant à la modélisation de l'évolution de la longueur des glaciers de Bérard, de Beugeant A et de Beugeant B est moyennement significative (avec respectivement 0.70, 0.41 et 0.59). L'estimation de la longueur des glaciers sur la période 2010-2050 (Figure 6), réalisée à partir de la modélisation linéaire, est donc très significative pour les glaciers

d'Anneuley et du Mort, et moyennement significative pour les glaciers de Bérard, de Beugeant A et de Beugeant B. La significativité de la modélisation linéaire permet de vérifier que l'évolution de la longueur de la ligne d'écoulement est relativement linéaire (plus que l'évolution d'un bilan de masse), hypothèse qui a permis d'utiliser la méthode de la modélisation linéaire.

Selon le modèle, le glacier du Mort aura totalement disparu en 2037 ; en 2050, le glacier dont la longueur sera la plus grande sera le glacier d'Anneuley (634 m), suivi du glacier de Beugeant B (537 m), et, avec une longueur similaire, les glaciers de Bérard (382 m) et de Beugeant A (380 m).

Dans le Tableau 2 figurent la longueur estimée des quatre glaciers restants en 2050, ainsi que la variation entre la longueur des glaciers en 2050 estimée à partir du modèle linéaire et la longueur des glaciers en 2000 résultant de l'algorithme de la ligne d'écoulement. D'après cette méthode, nous estimons que la longueur moyenne des quatre glaciers aura diminué de 54% entre 2000 et 2050. La partie B du glacier de Beugeant connaîtra la perte en longueur la plus importante (698 mètres, soit une perte de 75.11% par rapport à 2000), suivi du glacier de Bérard (785 mètres, soit 67.29%). La partie A du glacier de Beugeant et le glacier d'Anneuley connaîtront une perte inférieure à 50%, mais qui reste élevée (avec respectivement 297 mètres – 43.83%, et 313 mètres – 31.71%).

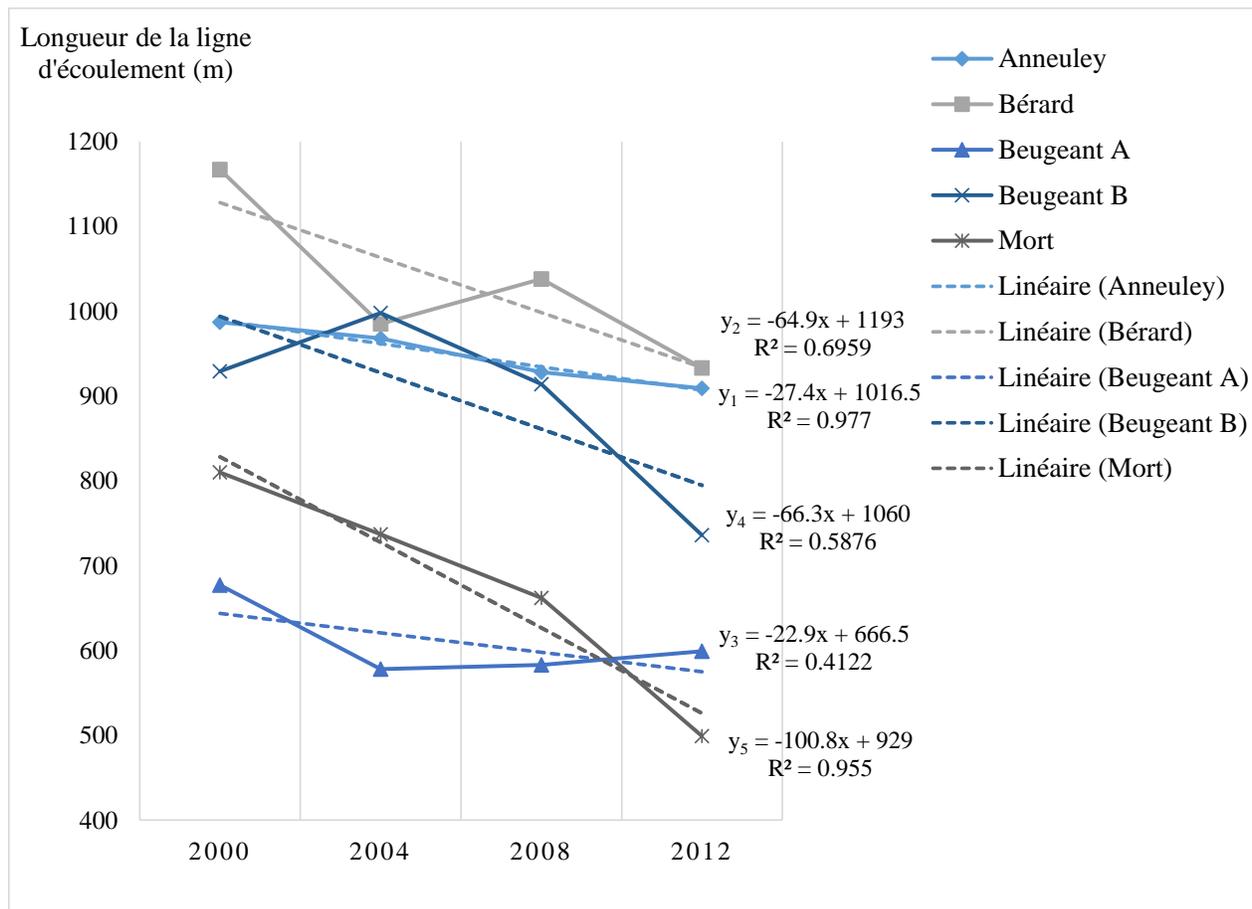


Figure 5. Modélisation linéaire de l'évolution de la longueur des glaciers pour la période 2000-2012, pour le glacier d'Anneuley ( $y_1$ ), le glacier de Bérard ( $y_2$ ), le glacier de Beugeant A ( $y_3$ ), le glacier de Beugeant B ( $y_4$ ) et le glacier du Mort ( $y_5$ ), avec le coefficient de corrélation linéaire associé ( $R^2$ ).

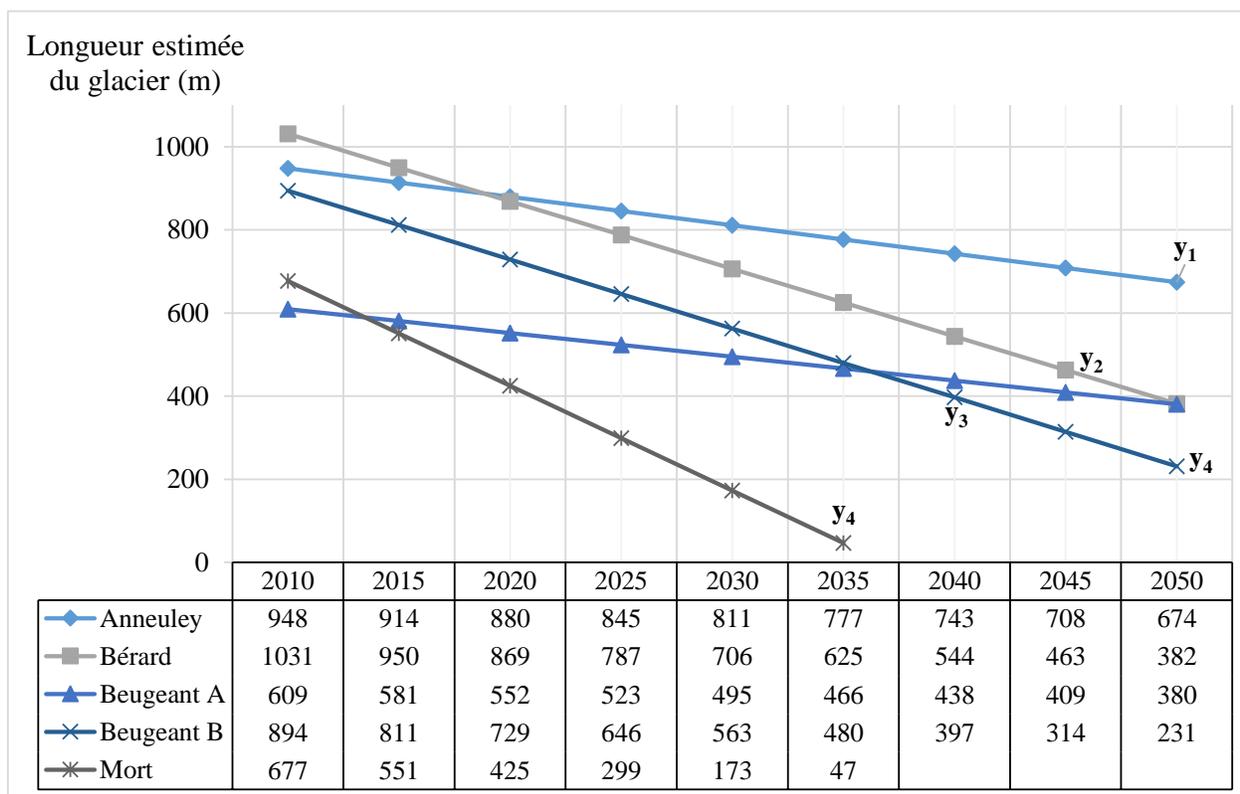


Figure 6. Application du modèle linéaire de l'évolution de la longueur des glaciers à la période 2010-2050. Le graphique et le tableau de données donnent la longueur estimée du glacier en mètres tous les 5 ans.

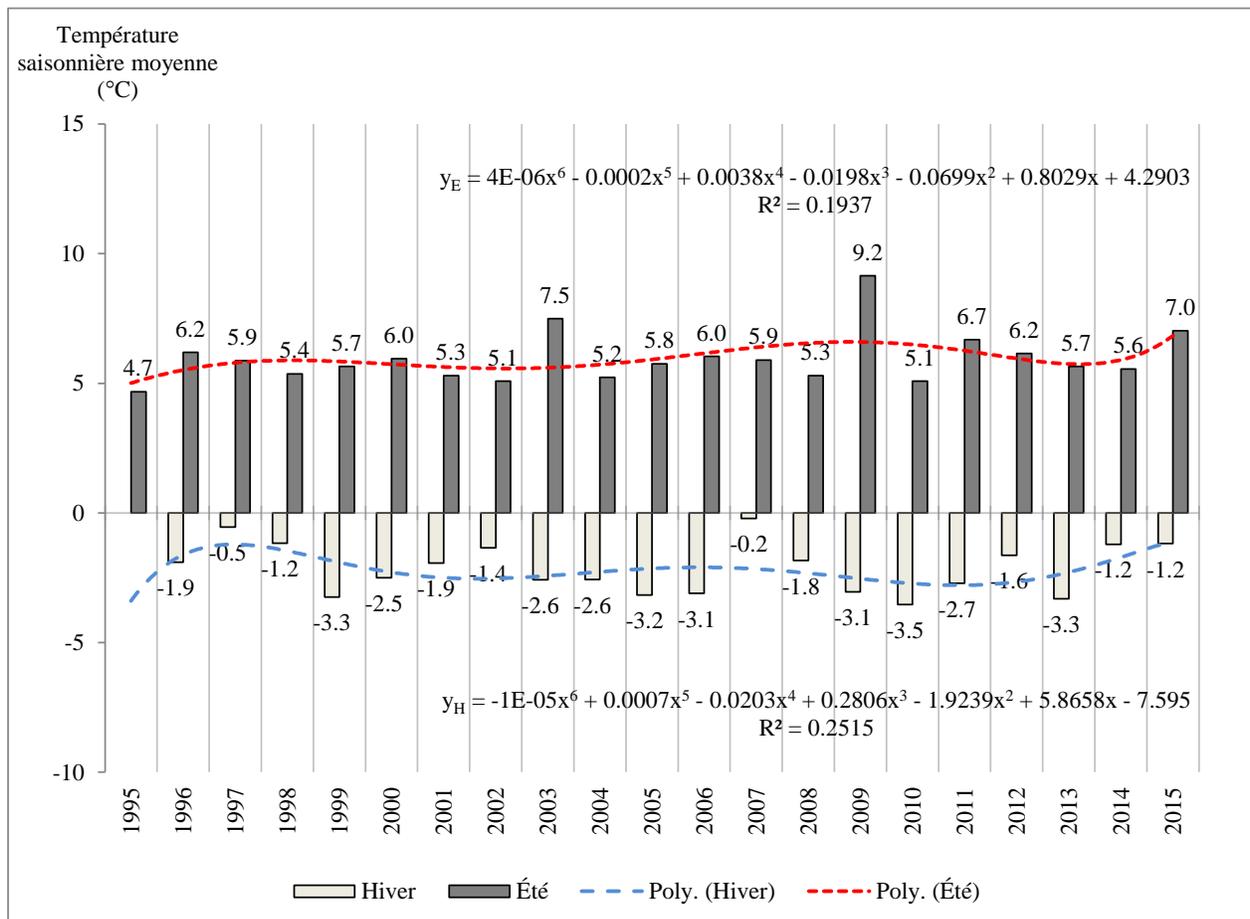
Tableau 2. Estimation de l'évolution de la longueur des glaciers entre 2000 et 2050 à partir du modèle pour le glacier d'Anneuley, le glacier de Bérard, le glacier de Beugeant A et le glacier de Beugeant B, et évolution prévisionnelle moyenne. La longueur (L) de la ligne d'écoulement est donnée en mètres (m) et la variation de la longueur ( $\Delta L$ ) entre 2000 et 2050 est donnée en mètres (m) et pourcentages (%).

	L (m)		$\Delta L$ 2000-2050 (m)	$\Delta L$ 2000-2050 (%)
	2000	2050		
Anneuley	987	674	-313	-31.71
Bérard	1167	382	-785	-67.29
Beugeant A	677	380	-297	-43.83
Beugeant B	929	231	-698	-75.11
Moyenne	940	417	-523	-54

### 1.3.3 L'évolution du climat local entre 1995 et 2015

L'étude du climat local vise à apporter une variable explicative à l'évolution de la longueur des glaciers du vallon de Bérard, en l'occurrence à leur retrait général entre 2000 et 2012 d'une valeur moyenne de près de 20% (Tableau 1).

La modélisation de l'évolution des températures saisonnières moyennes sur la période 1995-2015 est représentée avec les valeurs moyennes absolues des températures saisonnières moyennes (Figure 7). La modélisation polynomiale de l'évolution des températures estivales moyennes comme des températures hivernales moyennes n'aboutit cependant pas à des résultats significatifs. Les coefficients de corrélation des deux équations sont en effet faibles, avec des valeurs s'élevant respectivement à 0.19 et 0.25.



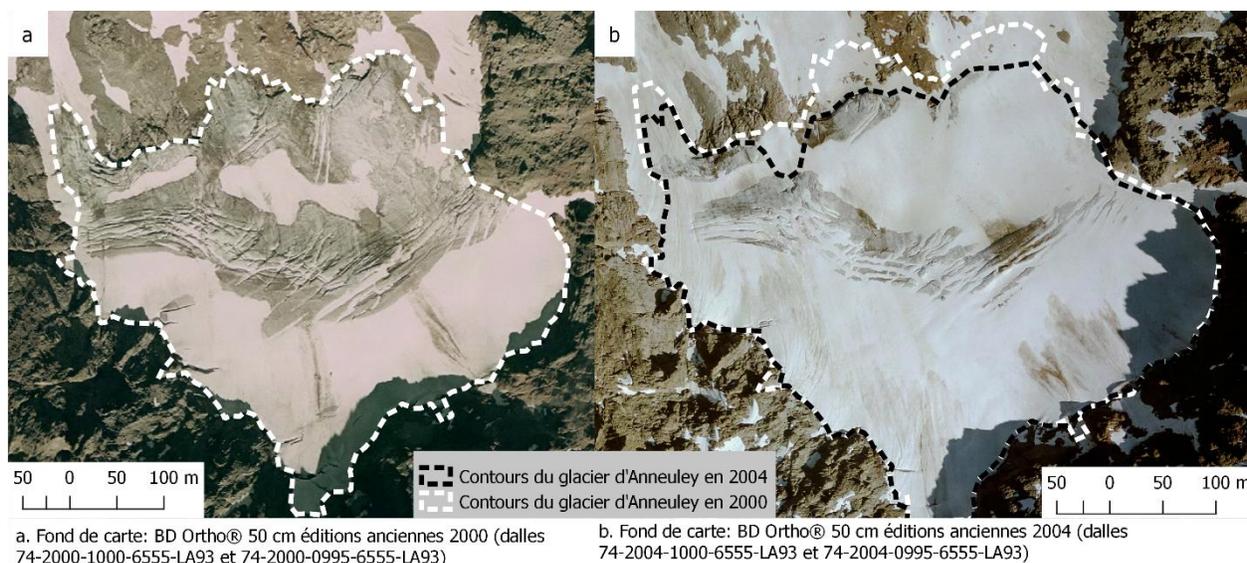
**Figure 7. Données et modélisation des températures saisonnières moyennes en °C entre 1995 et 2015 à la station Aiguilles Rouges – Nivôse (2365 m), d'après les données de Météo France. La modélisation polynomiale (Poly.) est représentée pour les températures estivales ( $y_E$ ) et hivernales ( $y_H$ ) moyennes, avec le coefficient de corrélation linéaire associé ( $R^2$ ).**

## 1.4 Discussion

### 1.4.1 Limites de la méthode

A la phase du *preprocessing*, la recherche de précision dans la digitalisation des contours des glaciers à partir des orthophotos a fait face à deux premières limites. D'une part, les glaciers du vallon de Bérard

comportent des glaces couvertes de débris faisant pleinement partie du corps glaciaire (i.e. en continuité avec le glacier), or nous n'avons pas réussi à appliquer de méthode rigoureuse dans la distinction de la roche et de la glace couverte lors de la digitalisation. Les photos réalisées pendant le travail de terrain effectué en août et septembre 2015 en marge proglaciaire des glaciers ont été utilisées afin de donner un indice supplémentaire sur la nature du substrat au niveau du front glaciaire, lorsque l'analyse visuelle des orthophotos n'était pas suffisante. La résolution des orthophotos étant haute (50 cm), la digitalisation a été réalisée avec une marge d'erreur de 1 m pour les contours en amont, mais pour les contours en aval la marge d'erreur ne pas être précisée du fait de la présence de glaces couvertes. Une deuxième limite se trouve dans la différenciation de la couverture neigeuse d'une année sur l'autre entre les orthophotos. Nous avons observé une couverture neigeuse relativement élevée sur l'orthophoto de 2004 - comme l'avait déjà remarqué Long (2013). Le parti pris de cette étude a été de stipuler que la variation interannuelle de la couverture neigeuse est à prendre en considération. Lors de la digitalisation, la présence du manteau neigeux a mis un obstacle à la délimitation visuelle du glacier ; la Figure 8 illustre un résultat de la digitalisation des contours des glaciers en 2004 comparé à ceux de 2000, prouvant que le manteau neigeux n'a pas été assimilé au glacier.



**Figure 8. Comparaison du résultat de la digitalisation des contours du glacier d'Anneuley pour l'année 2000 (a) et pour l'année 2004 (b) dont l'orthophoto présente une forte couverture neigeuse.**

L'application de l'algorithme de la ligne d'écoulement d'après la méthode de Le Bris et Paul (2013) a également été confrontée à certaines limites. Nous regrettons le caractère arbitraire du choix de ce qui est pris comme base directe à la génération de la ligne d'écoulement : les milieux des segments issus de l'intersection entre les traverses perpendiculaires et les contours des glaciers. Dans plusieurs cas, les points représentant les milieux de ces segments ne semblent pas suivre une ligne d'écoulement naturelle (essentiellement pour le glacier de Beugeant A, cf. Figure 4) et ne semblent donc pas réalistes. De plus la modélisation de la ligne d'écoulement s'applique difficilement aux glaciers en cours de fragmentation (comme le glacier du Mort à partir de 2008 et le glacier de Beugeant B à partir de 2012) : l'étude de la position du front glaciaire est possible, mais le calcul de la longueur du glacier devient problématique.

La modélisation linéaire de l'évolution prévisionnelle de la longueur des glaciers suppose que la variation du front glaciaire est linéaire (la même d'une année sur l'autre). Cette hypothèse a des limites, notamment dans sa confrontation avec l'hypothèse d'un réchauffement climatique croissant qui accélère la fonte des glaces. L'hypothèse de la stationnarité des variations de la longueur des glaciers est une hypothèse prudente

et basée sur un modèle simple, la régression linéaire. Les résultats ont une forte significativité dans le cas de l'évolution des glaciers d'Anneuley et du Mort, mais en ont une faible dans le cas des trois autres glaciers, ce qui entraîne la faible validité des résultats concernant l'évolution prévisionnelle de glaciers de Bérard, de Beugeant A et de Beugeant B.

L'analyse climatologique proposée dans cette étude se heurte à une principale limite dans la méthode statistique employée pour modéliser l'évolution des températures saisonnières moyennes. L'hypothèse d'un retard d'au moins 5 ans dans la réaction des glaciers face aux fluctuations du climat local ne semble pas suffisante. L'absence de résultats significatifs est probablement due en partie à la faible étendue de la période étudiée.

#### 1.4.2 Comparaison avec les résultats des études antérieures

Dans la mesure où cette étude propose pour la première fois des résultats concernant l'évolution récente et prévisionnelle de la longueur des glaciers du vallon de Bérard définie par la longueur de leur ligne d'écoulement, une comparaison précise avec les résultats des études portant sur ces mêmes glaciers n'est pas réalisable. Deux études de formes différentes (un mémoire universitaire de Master 1 et un rapport de stage au sein d'Asters) proposent des résultats concernant l'évolution des glaciers du vallon de Bérard, il s'agit respectivement de Rees Catalan (2012) et Long (2013). En annexe figurent un résumé des méthodes et les résultats quantitatifs des études suscitées sur ce sujet (Annexe 2, Annexe 3).

L'étude de Rees Catalan (2012) a l'objectif de mesurer l'évolution de plusieurs variables concernant les glaciers sur la période 1939-2008 (Annexe 2). Il est le seul à proposer des résultats concernant la longueur des glaciers pour différentes dates. Selon sa méthode, le glacier de Bérard a une longueur de 770 mètres en 2008, contre 1038 mètres selon notre méthode. La différence des résultats peut s'expliquer d'après trois critères méthodologiques : 1) l'auteur se base probablement sur une longueur projetée (et non réelle), 2) l'auteur définit probablement la longueur du glacier comme la longueur de l'axe droit reliant les points d'altitude la plus élevée et la plus basse, et 3) la digitalisation des contours des glaciers s'est réalisée sur des choix méthodologiques différents. Ses résultats en termes de longueur sont largement inférieurs à ceux que nous proposons ici, selon nous en grande partie du fait de ces différences méthodologiques.

L'étude de Long (2013) propose des résultats concernant la superficie et le périmètre des glaciers en 1998 et 2008 à partir de l'analyse cartographique d'orthophotos (Annexe 3). Les variables mesurées sont toutefois des variables projetées et donc non réelles. Les résultats proposés dans cette étude sont en effet similaires aux résultats proposés par Rees Catalan (Long, 2013), ce qui n'est pas surprenant car les deux méthodes utilisent la même définition de la surface et les mêmes données.

Les deux études suscitées ont procédé à des méthodes indirectes pour estimer la longueur des glaciers, par la mesure du retrait altitudinal du front (Long, 2013 ; Rees Catalan, 2012) et par la mesure de la longueur projetée et définie probablement par un axe droit (Rees Catalan, 2012).

L'étude comparative des résultats de cette étude avec les résultats de Rees Catalan (2012) et Long (2013) permet de constater que les trois études sont complémentaires dans leur méthode, dans la mesure où les trois études aboutissent à la même conclusion générale : la tendance générale de retrait des glaciers du vallon de Bérard et la disparition prochaine du glacier du Mort.

## 1.5 Conclusion

Cette étude propose une quantification de l'évolution récente de la longueur des glaciers du vallon de Bérard entre 2000 et 2012, ainsi qu'une estimation de l'évolution prévisionnelle de la longueur de ces glaciers d'ici 2050, en prenant pour axe de référence la ligne d'écoulement de chaque glacier, modélisée à l'aide de l'algorithme de la ligne d'écoulement élaboré par Le Bris et Paul (2013). Les données utilisées dans les études antérieures (Rees Catalan, 2012 ; Long, 2013) ont permis une quantification de l'évolution des glaciers jusqu'à 2008. Cette étude permet donc de fournir une mise à jour de l'étude sur les glaciers du vallon de Bérard sur la période 2008-2012. Les résultats expriment des évolutions différentes pour chaque glacier sur cette période, avec trois cas de recul net (avec une variation entre -10 et -25%) et deux cas de stagnation (avec une variation proche de zéro), malgré la tendance générale de recul sur la période récente. En moyenne, la longueur des glaciers du vallon de Bérard a diminué de 20% entre 2000 et 2012.

L'absence de tendance générale significative des températures saisonnières moyennes entre 1995 et 2015 sur la station Aiguilles Rouges – Nivôse a permis d'infirmer l'hypothèse selon laquelle il existe une corrélation simple entre le climat local et la dynamique des glaciers du vallon de Bérard. L'influence du climat local sur l'évolution des glaciers est un phénomène complexe, qu'il s'agirait d'étudier à partir d'une base de données plus riches et de méthodes statistiques plus complexes.

Cette étude vise à apporter une méthode à la fois spécifique (étudiant la variable de la longueur définie comme la longueur de la ligne d'écoulement) et innovante (utilisant un modèle numérique d'élévation et un algorithme de modélisation), qui puisse être reproduite dans le cadre du suivi de l'étude de l'évolution des glaciers du vallon de Bérard. Plus largement, cette étude vise à faire connaître l'algorithme de la ligne d'écoulement élaboré par Le Bris et Paul (2013) pour l'étude de l'évolution d'autres glaciers. L'étude se présente comme un exemple d'application de l'algorithme, puisqu'elle propose une interprétation et un mode d'application particuliers de l'algorithme. La méthode employée dans cette étude est confrontée à plusieurs biais, qu'il serait possible de limiter par la mise en place d'un protocole précis de géomatique à plusieurs niveaux de la démarche. Un protocole automatique pour l'identification visuelle des contours du glacier sur les orthophotos pourrait être élaboré, par exemple par l'intermédiaire d'un référentiel colorimétrique associant une gamme de couleurs à un type de substrat (roche, glacier, glacier couvert, neige, etc.), que l'on appliquerait à chaque pixel et qui permettrait la discrétisation automatique de chaque pixel au sein d'une catégorie de substrat.

## Chapitre 2 – L'évolution historique des glaciers du vallon de Bérard du Petit Âge Glaciaire au tournant du XX<sup>ème</sup> siècle d'après la méthode lichénométrique

### 2.1 Introduction

L'étude des fluctuations glaciaires des glaciers du vallon de Bérard pendant la période suivant la fin du Petit Âge Glaciaire est bien documentée : Rees Catalan (2012) retrace l'évolution générale des glaciers depuis 1860 à partir de documents d'archive (cartes postales, cartes et photographies anciennes). D'après cette étude, le front du glacier de Bérard a reculé de 390 mètres entre 1900 et 2008, soit à une vitesse d'environ 3,5 mètres par an. L'analyse des archives révèle toutefois que la disposition des glaciers en 1950 était la même en 1860, laissant supposer une faible évolution entre ces deux périodes ; les glaciers du vallon de Bérard étaient déjà reculés dans leurs cirques glaciaires respectifs à la fin du Petit Âge Glaciaire. Quand est-ce que les glaciers atteignaient donc le fond du vallon, ou le refuge de la Pierre à Bérard ? L'évolution des glaciers du vallon de Bérard pendant le Petit Âge Glaciaire est peu documentée. La période « classique » du Petit Âge Glaciaire s'étend de 1550 à 1850, soit du Haut Moyen-Âge au début de l'ère industrielle, et se caractérise par une avancée glaciaire générale à l'échelle du globe, que l'on a pu mettre en relation avec la hausse générale des précipitations hivernales (Baumhauer & Winkler, 2014).

Dans cette partie, nous proposons une méthode permettant de compléter les connaissances sur l'évolution historique des glaciers du vallon de Bérard depuis le Petit Âge Glaciaire, à partir de mesures de terrain. La lichénométrie est une méthode de datation des paysages glaciaires et périglaciaires, qui permet de déterminer l'année à laquelle une roche a été libérée de la glace à partir de la taille des lichens qui se sont développés à sa surface. L'étude lichénométrique des roches en place en marge proglaciaire permet ainsi de déterminer à quelle période le glacier s'est retiré au niveau de chaque roche étudiée, et ainsi de retracer la dernière phase de retrait du glacier. Le lichen est un organisme complexe issu de la symbiose entre un champignon et une algue, qui peut se développer sur tout type de surface. On distingue souvent les lichens selon la forme de leur corps (appelé thalle), dont les plus fréquentes sont les formes crustacées, feuilletées et barbues. La lichénométrie utilise plusieurs espèces précises de lichens de forme crustacée qui poussent en milieu périglaciaire et dont la croissance peut durer plusieurs centaines d'années. Il est possible de déterminer l'âge de la colonisation du lichen sur son substrat à partir de la courbe de croissance du diamètre du thalle.

Cette étude vise à proposer la datation de plusieurs zones situées en marge proglaciaire des glaciers du vallon de Bérard à partir d'un protocole de mesure lichénométrique appliqué aux lichens du genre *Rhizocarpon* subgenus *Rhizocarpon (geographicum)*, afin de compléter la documentation existante sur l'évolution historique des glaciers pendant et depuis le Petit Âge Glaciaire.

### 2.2 Les données utilisées et la zone d'étude

Pour représenter les résultats de cette étude, nous avons utilisé le logiciel libre QGIS 2.14.0-Essen. L'analyse statistique a été réalisée sur le logiciel propriétaire Excel 2013.

#### 2.2.1 Les données utilisées

La méthode lichénométrique a l'avantage de nécessiter très peu de données et de moyens, ainsi les résultats lichénométriques n'ont nécessité aucune donnée préalable. La caractérisation du climat de la zone d'étude,

nécessaire pour caractériser la courbe de croissance des lichens, a été réalisée à partir des données thermiques de la station météorologique Aiguilles Rouges - Nivôse fournies par Météofrance. Pour l'élaboration des cartes, nous avons utilisé les données de format raster suivantes (présentées précédemment dans le chapitre 1) : l'orthophotographie de BD Ortho® 50 cm édition 2012 (dalles 0998-6551 à 1001-6554) fournie par l'IGN, et le modèle numérique d'élévation ASTER GDEM v2 fourni par le METI et la NASA.

### 2.2.2 La zone d'étude

Le vallon de Bérard (Massif des Aiguilles Rouges, Alpes françaises) est drainé par l'Eau de Bérard, qui est un affluent rive gauche de l'Eau Noire. La zone d'étude se limite au versant Nord-Nord-Ouest (ubac) et au fond de la vallée de l'Eau de Bérard défini ici de manière large, puisqu'on le délimite sur le versant Sud-Sud-Est (adret) par le Refuge de la Pierre à Bérard (1924 m).

Le climat des Alpes françaises du Nord, où se trouve le massif des Aiguilles Rouges, est un climat de montagne tempéré humide, d'influence océanique, par opposition au climat de montagne tempéré sec, d'influence méditerranéenne, des Alpes françaises du Sud. Sur le versant Sud (adret) du massif des Aiguilles Rouges, la température moyenne annuelle est de 1.9°C, et la température moyenne du mois le plus chaud (août) s'élève à 9.4°C (Tableau 3). D'après la classification internationale des zones climatiques de Köppen-Geiger, les Alpes font partie de la zone climatique polaire de type toundra (ET) : la zone polaire (E) étant définie par une température moyenne du mois le plus chaud qui n'excède pas 10°C, et le type toundra (T) étant défini par une température moyenne du mois le plus chaud supérieure à 0°C (Peel *et al.* 2007).

**Tableau 3. Données climatologiques de la station météorologique Aiguilles Rouges – Nivôse (2365 m d'altitude) : température moyenne mensuelle et annuelle en °C entre 1995 et 2015. D'après les données de Météo France.**

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Température moyenne mensuelle (°C)	-4.1	-4.9	-3.1	-0.6	3.6	7.4	9.2	9.4	6.2	3.7	-1.0	-3.4	1.9

## 2.3 Méthodologie

La lichénométrie nécessite la réunion de deux éléments : la taille des thalles, dans un échantillon donné d'une espèce de lichens d'une part, et la courbe de croissance de l'espèce, qui représente la longueur gagnée par le lichen chaque année, d'autre part. A partir de ces éléments, il est possible de déterminer l'âge moyen des lichens par échantillon (soit par aire de mesure).

### 2.3.1 Les mesures de terrain

Le travail de terrain s'est déroulé d'août à septembre 2015 dans le vallon de Bérard. La méthode de terrain générale a consisté à déterminer plusieurs aires de mesures où se trouvaient des lichens du genre *Rhizocarpon (geographicum)* et à mesurer le diamètre des thalles selon un protocole déterminé.

- Le travail préparatoire : détermination des niveaux morainiques

Avant de réaliser les mesures lichénométriques, il est intéressant de connaître les niveaux morainiques, c'est-à-dire la localisation des moraines principales successives situées en marge proglaciaire. Les moraines sont les débris sédimentaires déposés par le glacier lors de son retrait. Ce travail préliminaire a donné lieu à une analyse de terrain relevant de la géomorphologie glaciaire – l'étude de la formation de la surface terrestre par les glaciers. Les niveaux morainiques principaux sont représentés sur la carte de conclusion, ils ont été digitalisés sur le logiciel QGIS à partir des résultats géomorphologiques de Rees Catalan (2012).

- Le protocole de mesure

La méthodologie de cette étude est inspirée de l'ouvrage général sur la lichénométrie de J.L. Innes (1985), ainsi que de l'étude lichénométrique au Tien Shan de Lentschke & Schröder (2008) et de l'étude lichénométrique dans les Alpes françaises du Nord de Pech *et al.* (2003) qui appliquent certaines méthodes présentées par Innes (1985). Le protocole de mesure suit trois grandes étapes : l'identification d'une aire de mesure (i), la mesure du diamètre des thalles (ii) et la vérification de la circularité des thalles (iii) :

i) L'identification d'une aire de mesure : pour être choisie, l'aire de mesure doit être colonisée par minimum 5 thalles de *Rhizocarpon (geographicum)*, se caractériser par des roches stables (excluant ainsi les débris morainiques) et avoir une superficie minimale de 20 m<sup>2</sup>. Pour chaque aire de mesure, nous avons relevé l'altitude (grâce à un altimètre), la surface (à l'aide d'un mètre), l'orientation de l'exposition, et pour certaines d'entre elles les coordonnées géographiques. Pour que les mesures lichénométriques des différentes aires soient compatibles, il est important que les aires de mesures aient la même exposition, la courbe de croissance des lichens variant en fonction de la quantité de lumière reçue et donc de l'exposition au soleil.



**Figure 9. Deux types de mesure en lichénométrie : le diamètre maximal (en noir) et le diamètre minimal (en blanc). Cliché : C. Dewit.**

ii) La mesure du diamètre des thalles : le *Rhizocarpon* est un genre de lichen de forme crustacée d'une épaisseur quasi nulle, et de forme relativement circulaire, c'est donc le diamètre du thalle que l'on choisit de mesurer. Le protocole selon Innes (1985) utilise deux variables : le diamètre maximal (du cercle circonscrit) et le diamètre minimal (du cercle inscrit), le thalle étant rarement parfaitement circulaire (Figure 9). Sur chaque aire de mesure, nous avons mesuré le diamètre maximal et le diamètre minimal des 5 plus grands thalles de *Rhizocarpon (geographicum)*. Pour identifier l'espèce parmi les autres espèces de lichens présentes (cf. Rapport du stage de terrain (août - septembre 2015)), faute d'indicateurs biologiques nous nous sommes largement appuyés sur l'indicateur colorimétrique – car le genre *Rhizocarpon* se caractérise par une vive couleur verte.

iii) La mesure de la circularité des thalles : seul le diamètre maximal des thalles est utilisé dans les calculs aboutissant à la datation. Le diamètre minimal est utilisé uniquement pour mesurer la circularité des thalles, à partir du rapport entre le diamètre maximal et le diamètre minimal. Pech *et al.* (2003) restreignent leurs mesures aux seuls lichens circulaires, définissant la circularité par une différence entre le diamètre maximal et le diamètre minimal de moins de 10%. D'après Innes, la circularité des thalles n'est toutefois pas un paramètre essentiel car il n'y a pas de différence significative entre les méthodes utilisant seulement le diamètre maximal et les méthodes utilisant le diamètre maximal et minimal (Innes, 1985). La circularité des thalles a été mesurée ici dans l'objectif de donner la caractérisation la plus précise possible des thalles mesurés, cependant elle n'a pas fait l'objet d'un critère de retenue ou non des résultats – les lichens elliptiques ou irréguliers n'ont donc pas été rejetés du protocole.

### 2.3.2 L'élaboration de la courbe de croissance des lichens

L'élaboration d'une courbe de croissance du *Rhizocarpon geographicum* propre au vallon de Bérard n'a pas pu être réalisée, par faute de moyens et de données – pour cela, nous devrions disposer de l'âge précis des niveaux morainiques. Ce sont donc des fonctions de croissance élaborées dans le cadre d'études antérieures qui ont servi de référence. La courbe de croissance des lichens étant fortement sensible aux conditions

climatiques, les courbes de croissance utilisées doivent correspondre à des zones d'étude situées dans le même contexte climatique, que nous définissons ici par le climat tempéré humide de montagne des Alpes françaises du Nord.

Les études lichénométriques portant sur les Alpes sont peu nombreuses dans la littérature. L'étude de Pech *et al.* (2003) fournit trois courbes de croissance, toutes les trois pour le genre *Rhizocarpon* et chacune élaborée dans une vallée appartenant aux Alpes occidentales, nommées respectivement Datation 1, Datation 2 et Datation 3 (Tableau 4).

**Tableau 4. Description des trois courbes de croissance lichénométriques utilisées (Datation 1, Datation 2, Datation 3), d'après Pech *et al.* (2003).**

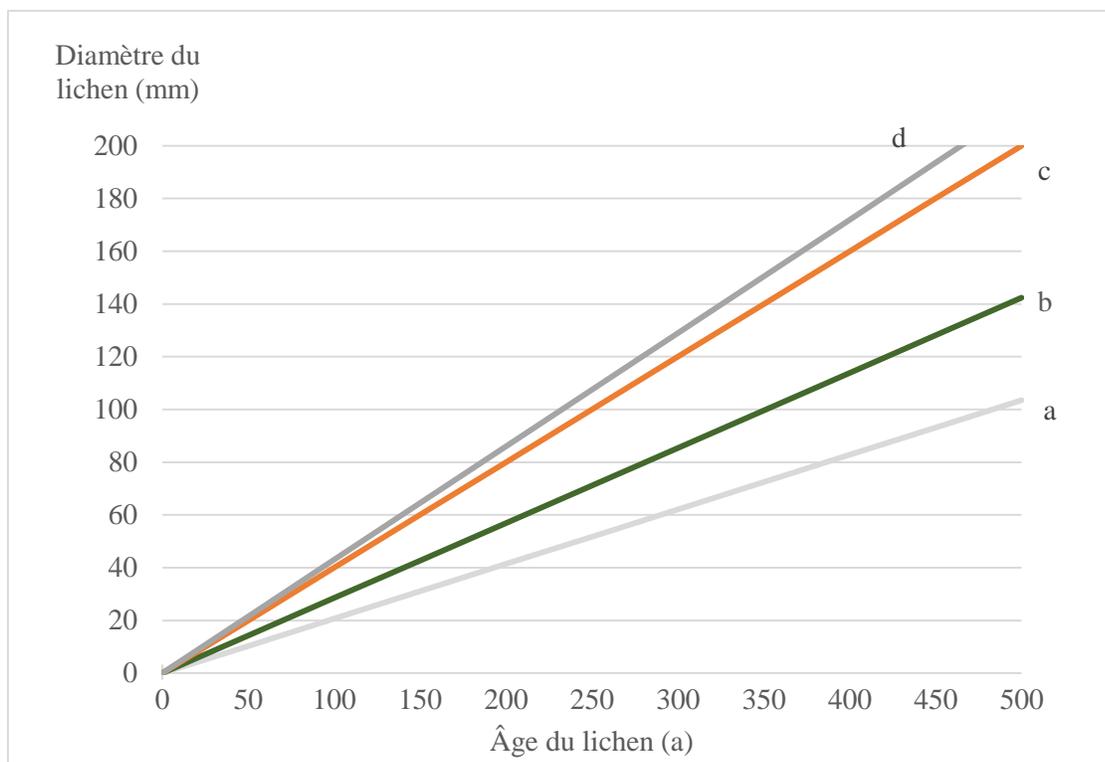
	Article source	Nom de la vallée	Variable utilisée	Fonction de croissance annuelle (mm/an)	
Datation 1	Pech <i>et al.</i> (2003)	Vénéon, Ailefroide	Diamètre maximal moyen (5 thalles)	Etage subalpin	0.207
				Etage alpin	0.2847
Datation 2	Blijenberg (1998)	Ubaye / Bachelard	Diamètre maximal moyen (5 thalles)	0.40	
Datation 3	Orombelli & Porter (1983)	Aoste	Diamètre maximal (1 thalle)	0.43	

La première courbe de croissance (Datation 1) est élaborée par Pech *et al.* (2003) pour une étude lichénométrique dans les vallées du Vénéon et d'Ailefroide dans le massif des Ecrins (Alpes françaises du Nord). La fonction de croissance annuelle proposée dans l'étude est calculée à partir du diamètre maximal moyen des 5 plus grands thalles de *Rhizocarpon*, dont le support (naturel ou construit) a été daté. Deux fonctions de croissance  $y$  sont établies, selon l'étage de la végétation dans lequel se trouve l'aire de mesure : 0.207 mm/an à l'étage subalpin et 0.2847 mm/an à l'étage alpin (au-dessus de 2000 mètres d'altitude) pour les surfaces naturelles morainiques (Pech *et al.* 2003).

La deuxième courbe de croissance (Datation 2) est modélisée dans la vallée du Bachelard (Vallée de l'Ubaye, Alpes françaises du Sud) par Blijenberg (1998), qui utilise également le diamètre maximal moyen des 5 plus grands thalles par aire de mesure. Pour la datation des aires de mesure, l'auteur a utilisé des données dendrochronologiques. La fonction de croissance qui en résulte atteint 0.40 mm/an, indifférenciée selon l'étage de végétation.

La troisième courbe de croissance (Datation 3) est issue d'une étude plus ancienne, d'Orombelli & Porter (1983), et porte sur le val d'Aoste dans le massif du Mont-Blanc (Alpes italiennes de l'Ouest). Les auteurs utilisent une méthode légèrement différente de celle évoquée jusqu'à présent car leur protocole de mesure se fonde sur la taille du diamètre maximal d'un seul thalle, le plus grand thalle présent sur chaque aire de mesure. La fonction de croissance proposée dans leur étude s'élève à 0.43 mm/an.

Les fonctions de croissance annuelle résultantes pour la vallée du Vénéon et d'Ailefroide (Datation 1) sont très inférieures à celles élaborées dans les deux autres études (Datation 2 et Datation 3). Les quatre courbes de croissance utilisées ici sont linéaires (Figure 10), mais ce n'est pas le cas de toutes les courbes lichénométriques (cf. Lentschke & Schröder (2008) qui utilisent des courbes de croissance logarithmiques dans le but de modéliser avec le plus de réalisme possible la croissance des lichens).



**Figure 10. Courbes de croissance du *Rhizocarpon geographicum* pour les Alpes: dans la vallée d'Ailefroide et du Vénéon (Datation 1) pour l'étage subalpin (a) et l'étage alpin (b), dans la vallée de l'Ubaye / vallée du Bachelard (Datation 2) (c) et dans le val d'Aoste (Datation 3) (d).**

### 2.3.3 La datation des aires de mesure

Les trois fonctions de croissance lichénométriques ont été appliquées à chaque aire de mesure, en suivant les modalités méthodologiques de chaque modèle. La Datation 3 a ainsi été appliquée au diamètre maximal du plus grand thalle sur chaque aire de mesure, tandis que la Datation 1 et la Datation 2 ont été appliquées au diamètre maximal moyen des 5 plus grands thalles. Pour la Datation 1, nous avons appliqué la fonction de croissance modélisée pour l'étage subalpin aux aires de mesures situées en-dessous de 2000 mètres d'altitude, et la fonction de croissance modélisée pour l'étage alpin aux autres aires de mesures.

Le choix de l'utilisation de trois fonctions, et non le choix d'une unique fonction parmi celles proposées par Pech *et al.* (2003), d'une part permet de comparer les résultats des trois modèles, et d'autre part découle du constat qu'il y a dans chaque modèle un élément soit méthodologique (Datation 1, Datation 2), soit lié à la proximité géographique (Datation 3) qui légitime son application au vallon de Bérard.

## 2.4 Résultats

### 2.4.1 Les mesures de terrain

Le résumé des mesures lichénométriques est exprimé dans le tableau ci-dessous (Tableau 5). Les résultats détaillés des mesures de terrain sont représentés en annexe (Annexe 5).

Au total, ce sont 7 aires de mesure qui ont été déterminées, regroupées dans trois zones : 4 aires de mesures se trouvent dans le fond du vallon de Bérard, près du cours d'eau principal, l'Eau de Bérard, à moins de

2000 mètres d'altitude (zone I), 2 aires de mesures se trouvent dans la marge proglaciaire du glacier d'Anneuley (zone II) et une aire de mesure se trouve dans la marge proglaciaire du glacier couvert de la Combe de Bérard (zone III). Toutes les aires de mesure sont exposées à l'Ouest (O), Sud-Ouest (SO) ou Sud-Sud-Ouest (SSO), et ont pour 6 d'entre elles une superficie supérieure à 20 m<sup>2</sup>. Le diamètre maximal représente le diamètre maximal du plus grand thalle présent sur l'aire de mesure en millimètres (mm) et le diamètre maximal moyen représente la moyenne arithmétique du diamètre maximal des 5 plus grands thalles (mm).

**Tableau 5. Mesures lichénométriques dans le vallon de Bérard.**

Zone et aire de mesure		Altitude (m)	Surface (m <sup>2</sup> )	Exposition	n	Diamètre maximal (mm)	Diamètre maximal moyen (mm)
I	1	1675	27	SO	5	110	94.6
	2	1720	26	SO	5	105	87.6
	3	1924	60	SSO	5	95	86.6
	4	1970	48	SO	5	105	96.2
II	1	2200	16	O	5	72	53.8
	2	2386	40	O	5	60	51.2
III	1	2200	27.5	O	5	53	44.4

En annexe (Annexe 4) figurent les résultats portant sur la circularité des thalles, représentés par le rapport entre le diamètre maximal et le diamètre minimal de chaque thalle. Seuls 17% d'entre eux (6) sont circulaires d'après la définition statistique de la circularité de Pech *et al.* (2003).

#### 2.4.2 La datation lichénométrique

Le Tableau 6 donne les résultats de la datation selon chaque courbe lichénométrique utilisée (Datation 1, Datation 2 et Datation 3). D'après la courbe lichénométrique de Pech *et al.* (Datation 1), les lichens du genre *Rhizocarpon* ont colonisé en moyenne le fond de vallée (zone I) vers l'an 1574, la marge proglaciaire du glacier d'Anneuley (zone II) vers l'an 1831 et la marge proglaciaire de la Combe de Bérard (zone III) vers l'an 1859. La Datation 1 se caractérisant par la courbe de croissance la plus lente des trois courbes utilisées, ces datations représentent dans notre étude la date minimale de colonisation par les lichens, et donc la date minimale du retrait des glaciers. Les résultats issus de la Datation 2 et de la Datation 3 représentent des périodes plus récentes, donnant respectivement pour date de colonisation par les lichens pour la zone I : 1787 et 1774, pour la zone II : 1884 et 1862 et pour la zone III : 1904 et 1892. Les résultats issus de la courbe lichénométrique de Blijenberg (1998) (Datation 2) représentent dans cette étude la date maximale du retrait des glaciers.

**Tableau 6. Datation des zones et aires de mesure lichénométriques, exprimée par l'âge en années (a) et par l'année de colonisation des lichens pour les aires de mesure, et par l'année moyenne de colonisation uniquement pour les zones.**

Zone et aire de mesure		Datation 1 (datation minimale)			Datation 2 (datation maximale)			Datation 3		
		Âge (a)	Année	Année moyenne	Âge (a)	Année	Année moyenne	Âge (a)	Année	Année moyenne
I	1	457	1558	1574	237	1779	1787	256	1759	1774
	2	423	1592		219	1796		244	1771	
	3	418	1597		217	1799		221	1794	
	4	465	1550		241	1775		244	1771	
II	1	189	1826	1831	135	1881	1884	167	1848	1862
	2	180	1835		128	1887		140	1875	
III	1	156	1859	1859	111	1904	1904	123	1892	1892

## 2.5 Discussion

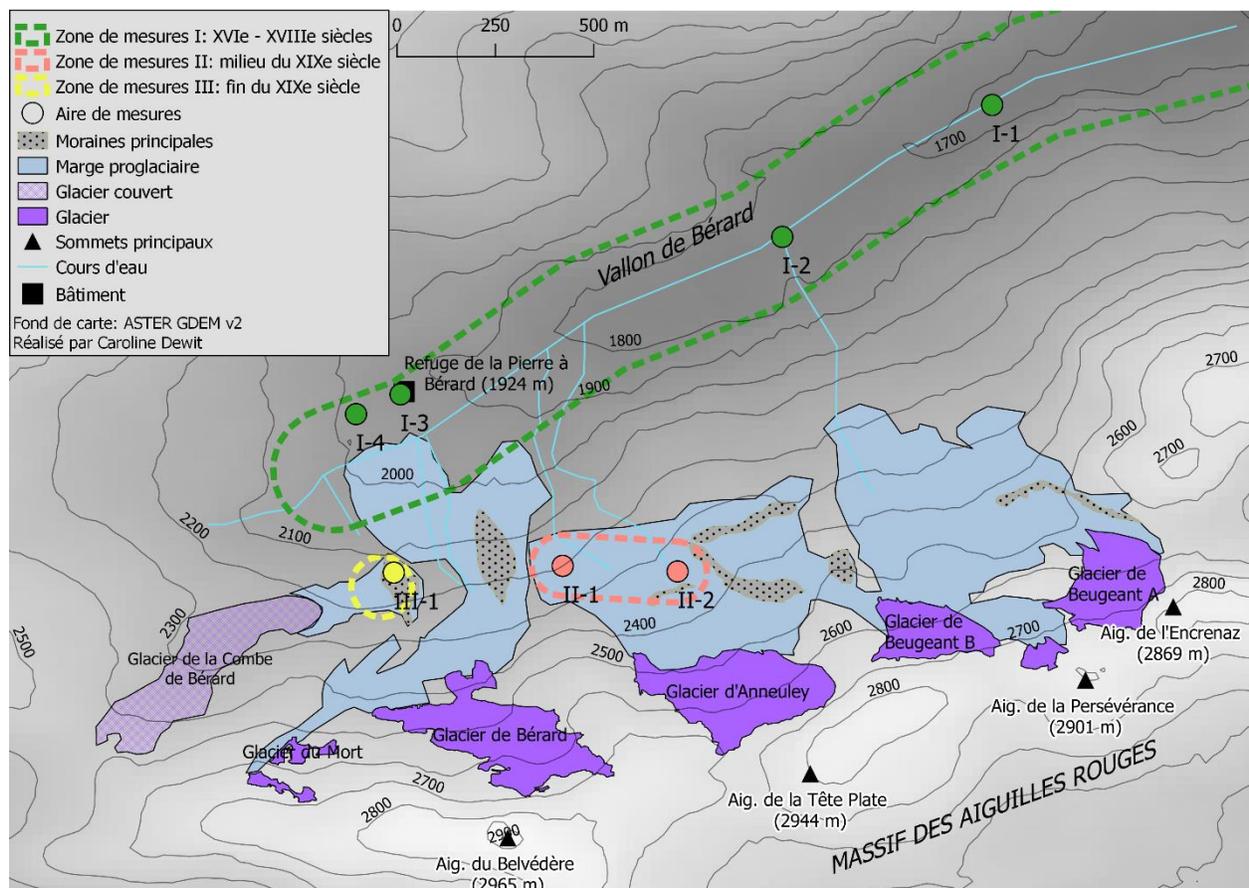
L'étude lichénométrique du vallon de Bérard s'est heurtée à plusieurs limites. Tout d'abord, la méthode lichénométrique nécessite une répartition importante de lichens, or le *Rhizocarpon* était totalement absent dans certaines zones (en marge proglaciaire du glacier de Bérard, en marge proglaciaire du glacier de Beugeant B, en amont de la zone II dans la marge proglaciaire du glacier d'Anneuley au niveau des moraines frontales principales). L'inaccessibilité de la marge proglaciaire du glacier de Beugeant A et du glacier du Mort a formé une deuxième limite à la mise en place d'un protocole lichénométrique. Il n'était donc pas possible d'apporter de nouvelles connaissances sur le retrait de tous les glaciers du vallon de Bérard du Petit Âge Glaciaire au début du XX<sup>e</sup> siècle à partir de la méthode lichénométrique.

Une étude lichénométrique approfondie pourrait reposer sur l'élaboration d'une courbe lichénométrique propre au vallon de Bérard. Pour cela, il suffirait de pouvoir dater un certain nombre d'aires de mesures sur lesquels se développe le lichen *Rhizocarpon*. Certains types de support peuvent être datés très précisément (notamment les supports artificiels, tels les tombes, cf. Pech *et al.* (2003)). Dans notre cas, la connaissance de l'âge approximatif de certains niveaux morainiques en marge proglaciaire permettrait l'élaboration d'une courbe lichénométrique adaptée au vallon de Bérard.

Enfin, la méthode lichénométrique est une méthode qui est faiblement employée. Les courbes lichénométriques utilisées dans cette étude ont été élaborées soit pour des conditions climatiques différentes (la vallée de l'Ubaye, la vallée du Vénéon et la vallée d'Ailefroide n'ont pas les mêmes conditions climatiques que le vallon de Bérard ou le val d'Aoste) – ce qui induit des biais dans l'application de la courbe lichénométrique dans une vallée de climat différent – soit dans un contexte historique de la recherche relativement obsolète (l'étude d'Orombelli et Porter a été publiée il y a 36 ans, en 1983).

## 2.6 Conclusion

La mise en relation de la géomorphologie glaciaire du vallon de Bérard et des résultats de l'étude lichénométriques permettent de retracer, du moins en partie, l'évolution historique des glaciers du vallon de Bérard entre le Petit Âge Glaciaire et le début du XX<sup>e</sup> siècle (Figure 11).



**Figure 11. Géomorphologie glaciaire et lichénométrie dans le vallon de Bérard : contexte géomorphologique et datation du fond de vallée, de la marge proglaciaire du glacier d'Anneuley et de la marge proglaciaire du glacier couvert de la Combe de Bérard.**

D'après l'étude lichénométrique du vallon de Bérard proposée, les glaciers se sont retirés du fond de vallée entre le milieu du XVI<sup>e</sup> siècle et la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle. La marge proglaciaire du glacier d'Anneuley a été libérée entre le début et la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, et la marge proglaciaire du glacier couvert de la Combe de Bérard a été libérée quelques dizaines d'années plus tard, entre le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle et le tournant du XX<sup>e</sup> siècle.

## Chapitre 3 – La dynamique végétale en marge proglaciaire des glaciers du vallon de Bérard selon la théorie de la succession écologique

La dynamique végétale en marge proglaciaire peut se caractériser par une évolution d'une incroyable rapidité selon la vitesse à laquelle les glaciers se retirent. Si la fonte des glaces est visible d'une année sur l'autre, la recolonisation végétale des zones délaissées par le glacier l'est tout autant. Cette colonisation répond du processus de la succession écologique, qui se définit comme la transformation d'une communauté d'êtres vivants en une autre à l'échelle d'un biotope. La biodiversité, l'ensemble des espèces vivantes, est un concept que l'on peut déployer à l'échelle du biotope, pour désigner l'ensemble des espèces vivantes présentes dans un habitat spécifique. On parle alors de biocénose. Dans ce travail, il s'agit d'étudier le processus de succession écologique à l'échelle de la biocénose des marges proglaciaires, c'est-à-dire des zones délaissées par le glacier, en y incluant l'étude des espèces animales présentes qui influencent la dynamique végétale.

L'aire d'étude à laquelle nous nous intéressons se constitue de la marge proglaciaire des glaciers du vallon de Bérard, situés dans la Réserve Naturelle éponyme, dans le massif des Aiguilles Rouges (Alpes françaises du Nord). L'objectif de cette étude est de définir la dynamique végétale proglaciaire dans le vallon de Bérard à travers la grille de lecture du modèle de la succession écologique, et d'analyser dans quelle mesure ce modèle est lacunaire pour expliquer le cas d'étude.

Après avoir étudié le processus de succession écologique et le modèle classique qui lui est associé, nous étudierons le cas de la succession suite au retrait glaciaire en général, puis nous achèverons notre étude en analysant la succession écologique dans l'aire d'étude à partir de l'inventaire des espèces végétales que nous avons relevé sur le terrain en août et septembre 2015.

### 3.1 La succession écologique

#### 3.1.1 Présentation du processus

La succession écologique est un processus d'évolution continue d'un écosystème en un autre. En écologie, la discipline qui étudie la succession écologique est la synécologie, qui a pour objet les rapports entre la biocénose (l'ensemble des espèces végétales et animales en une aire donnée), biotique, et les composantes de son biotope (habitat), abiotiques. Le processus de succession affecte l'ensemble de l'écosystème, dans ses composantes végétales (la phytocénose) et animales (la zoocénose) ainsi que dans l'ensemble des caractères du biotope (sol, microclimat). Par simplicité méthodologique, la succession est souvent étudiée sous l'angle de l'évolution de la végétation, car c'est là que le processus est le plus visible.

Dans les conditions naturelles, la végétation fait l'objet de modifications continues dans sa composition et dans sa structure. On peut parler de succession végétale si son évolution est progressive, par opposition à une évolution régressive. La succession végétale désigne le processus de transformation d'une communauté végétale ou d'une phytocénose (un complexe de communautés végétales) en une autre à un stade plus évolué (progressif) de la série dynamique. L'ensemble des communautés végétales qui se succèdent au cours du temps constitue une série dynamique de végétation. La succession se déroule à partir du stade de colonisation jusqu'à l'état climacique, c'est-à-dire jusqu'à l'établissement de l'équilibre écologique d'une communauté ou d'une phytocénose terminale. Le stade initial de colonisation, quant à lui, peut être de deux

types. On distingue en effet deux types de succession écologique selon leur stade initial : la succession primaire et la succession secondaire.

Les successions dites primaires ont pour origine l'implantation d'organismes sur un substrat rocheux brut (roche-mère), dénué de sol, qui s'ensuit de sa colonisation progressive par la flore et de la faune associée au cours d'une phase pionnière. Elles ont par exemple lieu dans les systèmes dunaires sur le substrat sableux, suite à une éruption volcanique sur les dépôts de cendre, ou encore dans les zones de retrait de glacier sur les dépôts morainiques. A l'inverse, la succession écologique secondaire correspond à la reconstitution de la biocénose suite à sa dégradation ou destruction, sur un sol déjà constitué, nu. Les successions secondaires concernent par exemple les zones dégradées par l'érosion, les avalanches, les ouragans, les incendies ou encore par l'abandon de l'activité culturale ou pastorale.

### 3.1.2 Le modèle classique de la succession

La succession est l'un des concepts les plus anciens de l'écologie (Emery, 2010). L'un des premiers modèles de succession est attribué à l'écologue américain Henry Cowles, qui a modélisé la succession végétale des dunes de sable du rivage du Lac Michigan (Cowles, 1899). Son modèle se fonde sur le principe de chronoséquences successioneuses. Celle qui s'applique dans les systèmes dunaires admet plusieurs composants, du plus proche au plus éloigné du rivage : la plage de sable nu, la prairie, l'arbustaie et la forêt. Le modèle met en évidence l'existence d'une trajectoire successioneuse qui est orientée du rivage vers l'intérieur des terres et évolue selon la distance au rivage. Selon l'approche de Cowles, la succession végétale est totalement déterminée et donc prévisible. Le déterminisme de la succession est conforté avec la théorisation du climax par F. E. Clements formulée dès 1916, dans lequel l'auteur intègre dans la chronoséquence successioneuse un stade ultime et permanent, le climax, vers lequel tend à se reconstituer les mêmes communautés végétales d'un biotope après avoir subi une perturbation (Clements, 1936).

Certains aspects du modèle déterministe de la succession dans la lignée de la théorie de Clements font toujours foi aujourd'hui. Une loi qui domine toujours est que la diversité des espèces (la biodiversité) tend à augmenter avec « l'âge successioneuse » (ou stade de la série dynamique de végétation). Une autre loi admise stipule que les systèmes successioneux précoces (les premières communautés à coloniser le biotope après la perturbation, au stade initial) ont en général des caractéristiques biogéographiques différentes des systèmes successioneux tardifs (les communautés plus tardives à coloniser le biotope, relatives au stade climacique). Les communautés précoces ont ainsi une biomasse végétale moindre pour une longévité végétale plus courte que les communautés tardives, des taux de consommation de nutriments dans le sol plus élevés et relativement peu causés par des organismes décomposeurs, des cycles biogéochimiques plus rapides, des taux de productivité primaire nette plus élevés et une diversité plus faible (Odum, 1969).

### 3.1.3 Analyse critique des concepts

Le concept de climax tel que l'a formulé Clements dans les années 1910 tombe toutefois sous la critique, dans la mesure où il ne reflète pas la diversité des trajectoires possibles des communautés végétales (Alexandre & Génin, 2011). Le concept a abouti à un schéma trop général, celui d'un climax unique, qui entre en contradiction avec la perception au moins double que les écologues avancent aujourd'hui. On peut en effet distinguer le climax climatique du climax stationnaire. Le premier renvoie à l'état d'équilibre écologique influencé essentiellement par le macroclimat, tandis que le second est une forme de climax local, soumis à l'influence prédominante des conditions mésologiques du biotope où il s'exerce. D'autres termes composés à partir de la racine du mot ont vu le jour pour pallier les lacunes du modèle de Clements, notamment pour rendre compte des séries végétales irrégulières, partiellement régressives ou complexes (*paraclimax*, *subclimax*, *euclimax*, etc.). Souvent, le caractère linéaire de l'évolution vers un état climacique est remis en cause, ainsi que l'absence de prise en compte de variables locales extérieures aux contraintes

écologiques (Alexandre & Génin, 2011). La théorie du climax repose sur l'idéologie de l'évolution « naturelle » de la végétation exempte de l'influence de l'homme, idéologie liée au préservationnisme qui prévalait durant la première moitié du XXe siècle. Au paradigme préservationniste s'est substitué dans les années 1990 le paradigme intégrateur, qui intègre l'action de l'homme sur son milieu, depuis l'avènement, dans l'arène scientifique comme politique, des concepts de biodiversité et de développement durable. La théorie climacique ne semble désormais plus convenir aux milieux végétaux anthropisés, tels que les zones de culture (*ager*), les prairies (*saltus*) et les forêts (*silva*) du système agro-sylvo-pastoral.

A présent que nous avons posé les fondements de la théorie écologique de la succession, nous allons étudier une forme particulière de succession écologique, celle qui est causée par le retrait glaciaire, afin de déterminer dans quelle mesure le modèle de la succession est légitime pour étudier les écosystèmes des milieux glaciaires.

### 3.2 La succession écologique suite au retrait glaciaire

Tout d'abord, la succession végétale est par définition une évolution *progressive* de la végétation, il est donc bien légitime de parler de succession en période de déglaciation. A l'inverse, lors des glaciations, on assiste à une évolution *régressive* de la végétation, c'est-à-dire selon le modèle successional, le passage à un stade moins évolué de la série dynamique. Suite au retrait glaciaire, on assiste à une succession de type primaire, qui s'effectue à partir de la roche-mère (*bed rock*), dénuée de sol.

Le retrait glaciaire entraîne un processus de succession primaire selon plusieurs échelles spatiales et temporelles. Nous proposons de structurer l'étude selon trois échelles, à l'image d'un palimpseste. La première échelle est celle de l'interglaciaire, en nous appuyant sur l'exemple de la dernière déglaciation, dans laquelle nous nous trouvons depuis le Tardiglaciaire (14 Ma BP, milliers d'années avant le présent). Il s'agit d'étudier la succession sur une échelle de temps long (plusieurs milliers d'années) et une échelle de lieu importante (des pays aux continents). La deuxième échelle est issue d'un découpage théorique régional des milieux végétaux montagnards : il s'agit de l'échelle de l'étage nival et de l'étage alpin, qui sont caractérisés par des séries dynamiques de végétation propres, intégrant ou non l'action d'un glacier. Enfin, la troisième échelle considérée est celle de la marge proglaciaire, qui est la zone abandonnée par le glacier. Il s'agit d'une échelle de lieu locale pour une échelle de temps restreinte (de plusieurs dizaines d'années à l'année).

#### 3.2.1 La succession écologique à l'échelle de l'interglaciaire

La palynologie, l'étude des pollens et des spores, a permis de reconstituer les communautés de végétation qui prévalaient pendant l'alternance des glaciaires et des interglaciaires à l'ère quaternaire, soit depuis 2,6 millions d'années. Dans les régions tempérées, le premier âge glaciaire du Pléistocène (en Europe occidentale, le Günz) a chassé la plupart des espèces thermophiles héritées de l'ère tertiaire, et les espèces survivantes ont disparu lors du second âge glaciaire (le Mindel) (Richard, 1988). La glaciation suivante (le Riss) a produit des glaciers plus importants, mais eût des températures moins froides que la dernière glaciation (le Würm), où les communautés steppiques atteignirent leur plus grande extension. Entre les glaciations, les interglaciaires sont des périodes de réchauffement caractérisées par une succession écologique qui a pu être modélisée par H. Richard (1988) ainsi : de la végétation de type steppique à climat froid (caractéristique des régions boréales actuelles), elle évolue vers le stade climacique forestier, puis retourne vers un type froid avec l'approche de l'âge glaciaire suivant. L'évolution de la végétation pendant un interglaciaire peut donc se résumer par la succession : toundra, taïga, forêt mixte, forêt acide ; laquelle se poursuit par la régression : taïga, toundra. L'étude palynologique menée par R. Drescher-Scheider (2000)

sur l'interglaciaire Riss/Würm confirme que la succession végétale au début de l'avant-dernier interglaciaire est comparable à l'interglaciaire actuel à l'échelle des Alpes.

Le dernier interglaciaire, dans lequel nous nous trouvons depuis le dernier maximum glaciaire il y a environ 18 000 ans, commence réellement avec le Tardiglaciaire de la fin du Pléistocène dès 14 Ma BP. Cette déglaciation s'est accompagnée d'une succession écologique de grande ampleur. Au début du Tardiglaciaire, les glaciers ont disparu de la plupart des massifs montagneux, la végétation des régions tempérées actuelles se compose de steppes à climat froid. En haute et moyenne montagne, ce sont des herbacées héliophiles qui colonisent les sols maigres (graminées, armoises, hélianthèmes, etc.). Le climat se réchauffe pendant le Préboréal, aux steppes se succèdent alors des forêts assimilables à des taïgas. Dès le Boréal et surtout à l'Atlantique, considéré comme l'optimum climatique de l'Holocène, on assiste à la formation de forêts mixtes qui se dégradent et évoluent, à partir du Subboréal et au Subatlantique, vers le type de forêts acides (Richard, 1988). Nous serions donc actuellement proche de l'état climacique de l'interglaciaire, avec le doute que la régression de la végétation, selon le schéma, vers la taïga puis la toundra, ne soit remise en cause du fait de l'influence de l'homme sur l'environnement lors de ce dernier interglaciaire.

A présent que nous avons précisé les modalités théoriques de la succession écologique des interglaciaires, nous allons étudier le processus de succession à une échelle plus fine, celle de l'étage nival et de l'étage alpin des montagnes tempérées.

### 3.2.2 La succession écologique à l'étage alpin et nival

Dans cette partie il s'agit d'identifier les différents stades théoriques de la série dynamique de la végétation à partir de l'étage alpin. Nous considérerons que l'étage alpin est situé en moyenne entre 2 000 m et 3 000 m, et l'étage nival, zone recouverte par les neiges éternelles, est situé au-delà. Il nous semble important d'affirmer d'entrée de jeu une mise en garde contre la perception simpliste du modèle de l'étagement de la végétation en montagne, en évoquant deux points : en réalité, il n'y a pas d'étages abrupts mais il y a plutôt continuité, et de plus l'étagement n'est pas uniquement lié au facteur altitudinal (et donc au climat), mais il est étroitement lié à l'intervention de l'homme sur l'usage de la végétation.

Les fortes contraintes causées par les relatives faibles températures des étages nival et alpin, font que la série dynamique de la végétation y est relativement simple. La succession végétale de l'étage alpin est mieux renseignée que celle de l'étage nival, du fait que la végétation est relativement très pauvre à l'étage nival.

Avant tout, notons que le climax de la série dynamique à l'étage alpin est un climax climatique, c'est-à-dire qu'il est influencé, théoriquement, de manière dominante par le macro-climat. La définition altitudinale de l'étagement de la végétation induit *de facto* une définition en termes de température moyenne de ces zones (en moyenne, la température diminue de 0,6°C tous les 100m d'altitude), et implique le climat comme facteur direct de formation de la végétation.

D'après Lacoste et Salanon (2010), le climax climatique de l'étage alpin en France se caractérise par la formation de pelouses à graminées, de cypéracées et de joncacées. On y trouve typiquement les associations (ou phytocénoses) de *Caricetum curvulae*, qui est une pelouse acidiphile, et de *Carex curvula*, essentiellement dans les Alpes, à l'horizon supérieur de l'étage alpin. Les sols à l'état climacique sont de types humocalciques, ce sont à la fois des sols calcimorphes du fait de la libération de calcaire par les roches, et des sols riches en humus. Ils sont caractéristiques des sols de montagne, car le climat humide et froid sur la durée empêche la dégradation de la matière organique qui s'accumule. Le climax climatique de l'étage alpin se caractérise enfin par les classes et alliances phytosociologiques de *Caricetea curvulae* et de *Caricion curvulae*, groupements de pelouses alpines des sols acides.

L'étage nival est généralement défini comme l'espace recouvert par les neiges éternelles, en moyenne à partir de 3000 m. Il est difficile d'employer le concept de « climax » ou même de « série dynamique » de végétation pour l'étage nival, dominé par les roches et les neiges éternelles, présentant peu d'espèces végétales. Les genres dominants que l'on y trouve sont quelques plantes à fleur (*Androsace*, *Carex*, *Saxifraga* et *Artemisia*) ainsi que des espèces de lichens et de mousses.

### 3.2.3 La succession écologique en marge proglaciaire

La fonte de glaciers se caractérise par un retrait du front glaciaire, c'est-à-dire que la limite altitudinale inférieure du glacier s'élève au fur et à mesure que le glacier se retire. La marge proglaciaire, la zone située en aval du glacier précédemment couverte de glace, se découvre progressivement et fait apparaître le lit rocheux. La marge proglaciaire se caractérise par les dépôts sédimentaires (moraines) déposés par le déplacement du glacier lors de ses avancées les plus importantes puis lors de ses retraits. La marge proglaciaire est délimitée par les moraines frontales en aval, le front glaciaire en amont, et les moraines latérales. Le retrait glaciaire est propice à la colonisation de la végétation, qui s'effectue sous la forme d'une succession primaire, dans la mesure où dans les interstices des affleurements morainiques, il n'y a pas de sol constitué, du fait de l'absence de matière organique. La colonisation végétale se réalise dans les accumulations de grains minéraux fins gorgées d'eau qui sont situées entre les affleurements de roche nue (Zryd, 2001). L'étude menée par Burga *et al.* (2010) a montré que la taille du grain du substrat est un facteur important de l'établissement de la végétation, avec trois autres facteurs : le temps écoulé depuis la déglaciation, le micro-relief et le développement du sol.

Les modèles successionnels dominants se fondent sur la variable temporelle du temps écoulé depuis le retrait du glacier. La série dynamique que propose A. Zryd (2001) pour la marge proglaciaire se compose de cinq phases. Jusqu'à 20 mètres en aval du front glaciaire, il n'y a aucune végétation, excepté quelques espèces d'algues et de bactéries qui subsistent à l'absence de matière organique (1). Entre 20 et 80 mètres du front, soit en moyenne 5 ans après le retrait du glacier, c'est la phase de la colonisation pionnière proprement dit, durant laquelle s'installent ponctuellement des mousses, des graminacées et des herbacées, environ une vingtaine d'espèces pionnières. Ce sont des espèces de petite taille, solitaires ou organisées en touffes, qui sont dotées de racines résistantes au vent et d'un métabolisme actif à basse température (2). Entre 80 et 200 mètres du front, soit après environ 10 à 20 ans de colonisation, on assiste à la phase de densification. A ce stade, les espèces végétales sont plus diverses (on en dénombre en moyenne une soixantaine). Le système racinaire ainsi que la densité des espèces permettent de stabiliser la moraine et de favoriser le développement de micro-organismes (3). De 25 à 100 ans après le retrait du glacier, s'ensuit la phase arbustive, durant laquelle se constitue la lande d'arbrisseaux nains, sur des sols acides et pauvres en matière organique. La richesse de la biodiversité atteint un maximum d'espèces aux alentours de 80 ans après le retrait du glacier (4). Ensuite, les plantes recouvrantes freinent le développement des espèces pionnières par leur ombre et leur fort besoin en eau. A partir de là, plusieurs siècles sont nécessaires pour atteindre l'état climacique: la forêt de mélèzes et de pins cembro (ou arolles) (5).

Le modèle successionnel selon le facteur temporel est satisfaisant, mais selon Burga *et al.* (2010) il est nécessaire de considérer d'autres variables que le temps écoulé depuis le retrait du glacier pour rendre compte du processus de succession en marge proglaciaire. Considérant en premier lieu uniquement le facteur temporel, Burga *et al.* ont proposé un modèle successionnel différent, à partir de l'étude de la marge proglaciaire du glacier de Morteratsch (Suisse). La succession débute par l'établissement des premières plantes pionnières 7 ans après le retrait du glacier. Les premières espèces de la communauté *Oxyrietum digynae* apparaissent ensuite, environ 10 ans après la déglaciation, et persistent environ 30 ans. Entre temps, environ 27 ans après la déglaciation, se forment les premières communautés d'*Epilobium fleischeri* (épilobes de Fleischer).

Les premières espèces d'arbres à coloniser la marge proglaciaire sont le mélèze (*Larix decidua*) et le pin cembro (*Pinus cembra*), 15 et 31 ans, respectivement, après la déglaciation, soit à 150 et 800 mètres en aval du front glaciaire. Le mélèze domine les zones récemment déglacées avec des sols bruts, tandis que le pin parasol domine des phases plus avancées de la déglaciation avec des sols plus développés. La forêt de mélèzes et de pins cembro, constituant l'état climacique, est mature à partir de 150 ans après la déglaciation.

Après avoir appliqué le modèle successional classique à l'étude du glacier de Morteratsch, Burga *et al.* proposent un modèle de succession primaire non-linéaire fondé sur la taille des grains (*non-linear micro-site primary succession model*) et sur l'humidité du sol. La biodiversité en marge proglaciaire dépend non seulement du temps écoulé depuis le retrait du glacier, mais également fortement des facteurs géomorphologiques et édaphiques qui expliquent l'irrégularité vis-à-vis du modèle classique.

A présent que nous avons rencontré différents modèles successionnels de la marge proglaciaire, nous allons nous intéresser au processus de succession dans l'aire d'étude qui nous intéresse dans le cadre de ce mémoire. L'aire d'étude à laquelle nous allons nous intéresser se constitue de la marge proglaciaire des glaciers du vallon de Bérard, dans le massif des Aiguilles Rouges (Alpes françaises du Nord).

### 3.3 La succession écologique en marge proglaciaire dans le vallon de Bérard

L'étude du processus de succession dans un écosystème donné appelle à distinguer trois étapes : la caractérisation du biotope de l'écosystème (substrat, sol, climat, topographie) ; la caractérisation de la perturbation qui entraîne la succession ; et la caractérisation de la biocénose. Dans notre cas d'étude, le biotope est constitué par la marge proglaciaire des différents glaciers du vallon, la perturbation est constituée par le retrait des glaciers, et la biocénose, soit l'ensemble des êtres vivants présents, constituée de sa partie végétale, la phytocénose, et de sa partie animale, la zoocénose, sera à caractériser. L'inventaire non exhaustif de la biocénose que nous dresserons permettra de mettre en relation la succession écologique observée avec les modèles successionnels établis mentionnés plus haut.

#### 3.3.1 Le biotope : la marge proglaciaire dans le vallon de Bérard

Le vallon de Bérard se situe dans le massif des Aiguilles Rouges, sur la commune de Vallorcine en Haute-Savoie. Il s'agit d'une vallée glaciaire, dont le versant nord, nord-ouest (ubac) comporte aujourd'hui quatre glaciers reliques, le glacier du Mort, le glacier de Bérard, le glacier d'Anneuley et le glacier de Beugeant, tandis que le versant sud, sud-est (adret) est dépourvu de glaciers mais compte quelques plaques de neige éternelle. Le vallon comporte une partie de forêt type de l'étage subalpin, à partir de la Cascade de Bérard (1 443 m), mais sa majeure partie est située au-delà de la limite de l'arbre à l'étage alpin puis nival, jusqu'à son sommet, l'Aiguille du Belvédère (2 965 m). La Réserve Naturelle du Vallon de Bérard, dans laquelle notre zone d'étude se situe, comprend la majeure partie de l'étage alpin du vallon sur son ubac et son versant est, et s'étend sur une superficie de 540 ha.

Le massif des Aiguilles Rouges est un massif cristallin principalement composé de gneiss, qui est une roche cristalline structurée en feuillets. Si le substrat de l'aire d'étude a été profondément analysé, notamment par l'identification de 11 roches ou minéraux remarquables (quartzite triassique, orthogneiss à Kf ou Bi, gneiss à Bi et Hbl, méta-grauwackes, micaschistes, quartzite, marbres, amphibolites, éclogites et serpentinites, gneiss leucocrates, orthogneiss non datés C-S) (von Raumer & Bussy, 2004), les sols présents dans le vallon n'ont pas fait jusque-là, à notre connaissance, l'objet d'une étude pédologique.

Pour la suite de l'étude, nous poserons comme hypothèse que relativement peu de sol s'est formé dans la marge proglaciaire du vallon, et que ce peu de sol est du même type que les sols squelettiques (*skeletal Leptosol*) présents en marge proglaciaire du glacier de Morteratsch (Alpes suisses) (Burga *et al.* 2010).

Les glaciers du vallon de Bérard sont des glaciers de cirque de relative petite taille, occupant au total une surface d'environ 42 ha (420 000 m<sup>2</sup>). Ils sont situés à l'ubac du vallon, qui est la majeure partie à l'ombre, du fait de la domination des Aiguilles et de la forte pente. Cet ubac présente vraisemblablement des conditions climatiques spécifiques du fait de son enclavement et de son faible ensoleillement. Vis-à-vis du modèle successional classique, on a donc hypothétiquement un climax stationnel, et non climatique, car l'influence de ces conditions mésologiques locales prédomine sur l'influence du macroclimat.

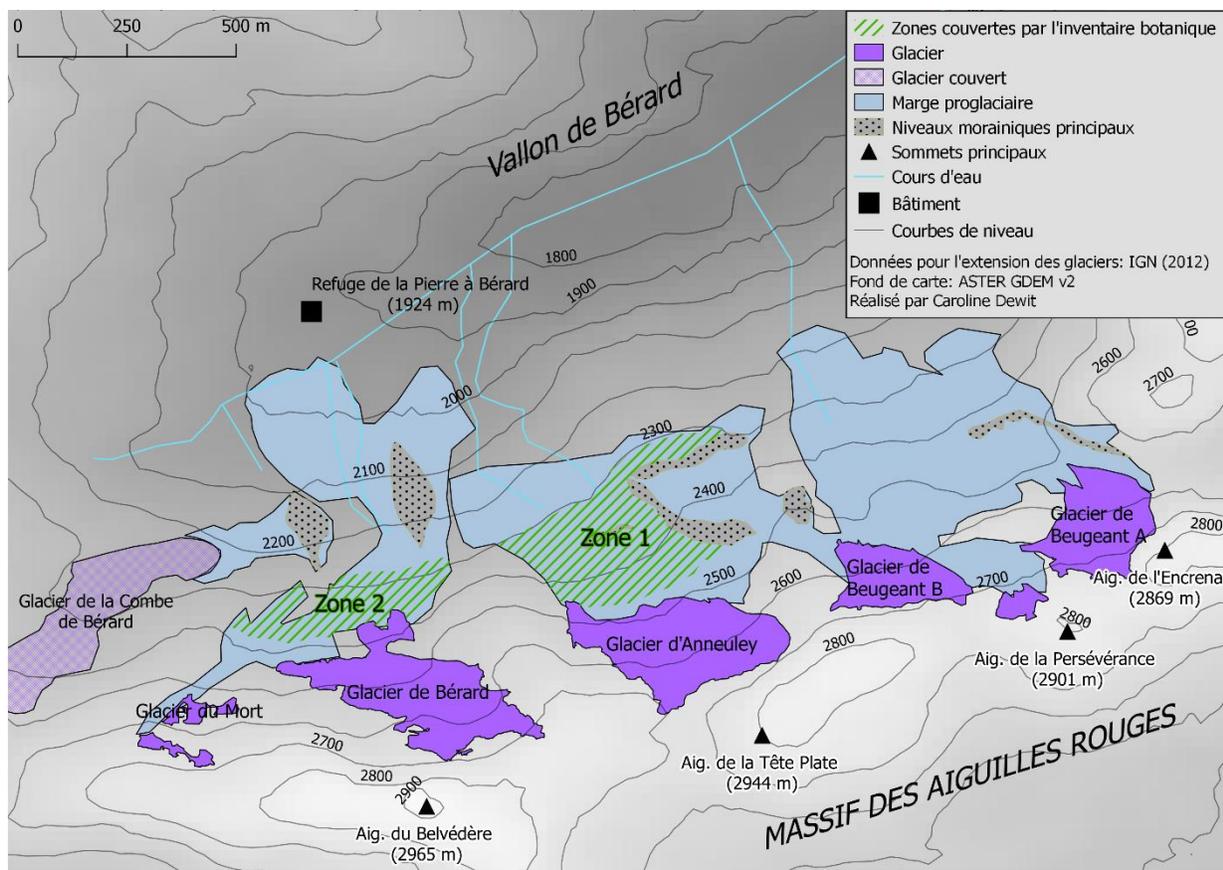
### 3.3.2 La perturbation : le retrait des glaciers du vallon de Bérard

La perturbation entraînant le processus de succession écologique dans notre cas d'étude est celle du retrait du front des cinq glaciers en présence. La démonstration du retrait des glaciers du vallon de Bérard a été réalisée à plusieurs reprises (Gardent, 2014 ; Long, 2013), notamment pour la période entre 2000 et 2012 (cf. Chapitre 1) et pour la période de 1939 à 2008 (Rees Catalan, 2012). La marge proglaciaire actuelle s'étend des fronts glaciaires actuels en amont, qui se renouvellent en continu - car un glacier est par définition une masse en déplacement, aux moraines frontales en aval. En 2012, les fronts glaciaires se situent entre 2353 m (glacier de Bérard) et 2540 mètres d'altitude (glacier de Beugeant B) (cf Chapitre 1, Annexe 1). Les moraines frontales les plus basses sont celles du glacier de Bérard, elles atteignent l'altitude du refuge de la Pierre à Bérard (1924 m). La marge proglaciaire des glaciers du vallon de Bérard se trouve donc, en 2012, entre 1 925 m et 2540 mètres d'altitude, sur le versant nord, nord-ouest du vallon.

### 3.3.3 La biocénose : inventaire et analyse des espèces présentes dans la marge proglaciaire du vallon de Bérard

La biocénose est l'ensemble des êtres vivants sur une aire donnée. Elle se compose de la phytocénose et de la zoocénose de l'aire d'étude, en l'occurrence de la marge proglaciaire du glacier du Mort, du glacier de Bérard, du glacier d'Anneuley et du glacier de Beugeant. D'après Asters, toutes les formations végétales et animales des étages subalpin, alpin et nival sont représentées dans la Réserve Naturelle du Vallon de Bérard. Notons que les marges proglaciaires des glaciers « suspendus » du vallon se situent dans l'étage alpin. Dans le vallon, on retrouve une faune typique de l'environnement de montagne (bouquetins, chamois, lagopèdes, etc.) et également des espèces migratoires, le vallon servant de couloir de migration pour les oiseaux et les insectes entre le Valais suisse et la vallée du Rhône.

Au cours de sorties de terrain, accompagnée de Patrick Perret, garde-technicien, nous avons pu réaliser des observations dans les marges proglaciaires du vallon de Bérard (cf. Rapport du stage de terrain (août - septembre 2015)). Nous avons recueilli un inventaire partiel des espèces végétales présentes dans deux zones distinctes : la première se trouve dans la marge proglaciaire du glacier d'Anneuley (Zone 1) et la seconde dans la marge proglaciaire du glacier de Bérard (Zone 2) (Figure 12).



**Figure 12. Localisation des zones couvertes par l'inventaire botanique réalisé en marge proglaciaire dans le vallon de Bérard en 2015.**

Le premier inventaire (Tableau 7) a été réalisé dans la partie supérieure de la marge proglaciaire du glacier d'Anneuley, entre le front du glacier à 2440 mètres et 2300 mètres d'altitude (Zone 1). Cette zone était en grande partie recouverte par le glacier en 1939 et elle s'en est progressivement libérée depuis – en effet, en 1939 le front du glacier d'Anneuley était à au moins 125 mètres en aval du front actuel (Rees Catalan, 2012). D'après le modèle de Burga *et al.* (2010), nous posons l'hypothèse qu'il s'agit d'un inventaire des espèces pionnières qui se sont formées ces 75 dernières années.

L'inventaire de la phytocénose de la marge proglaciaire récente du glacier d'Anneuley présente certaines correspondances avec le modèle successional des marges proglaciaires de Burga *et al.* (2010) dans sa partie portant sur les plantes pionnières et les lichens (Tableau 9). Selon le modèle de Burga *et al.* 19 espèces de plantes pionnières apparaissent dans les 200 premiers mètres distants du front glaciaire, soit jusqu'à 17 ans après le retrait du glacier. L'inventaire en marge proglaciaire du glacier d'Anneuley recense 6 de ces 19 espèces. Dans l'ordre chronologique de leur implantation selon le modèle de Burga *et al.*, ces six espèces sont l'épilobe de Fleischer, la linaira des Alpes, l'oxyria à deux styles, le saxifrage fausse mousse, l'adénostyle à feuilles blanches et la céréaïste à longs pédoncules. On retrouve également certaines espèces qui ne sont pas recensées dans le modèle, mais dont d'autres espèces appartenant au même genre sont recensées : il s'agit du genre Saxifrage (*Saxifraga*), du genre Pâturin (*Poa*) et du genre Saulne (*Salix*).

**Tableau 7. Inventaire des espèces végétales observées en août 2015 dans la marge proglaciaire du glacier d'Anneuley entre 2300 et 2440 mètres d'altitude (Zone 1).**

Nom scientifique (genre, espèce, source)	Nom vernaculaire
<i>Adenostyles alliariae</i> (Gouan) A.Kern., 1871	Adénostyle à feuilles d'alliaire
<i>Adenostyles leucophylla</i> (Willd.) Rchb., 1831	Adénostyle à feuilles blanches
<i>Agrostis rupestris</i> (Schrud.) Kunth, 1829	Agrostide des Alpes
<i>Androsace alpina</i> (L.) Lam., 1779	Androsace des Alpes
<i>Arabis alpina</i> L., 1753	Arabette des Alpes
<i>Bartsia alpina</i> L., 1753	Bartsie des Alpes
<i>Cardamine alpina</i> Willd., 1800	Cardamine alpine
<i>Cardamine resedifolia</i> L., 1753	Cardamine à feuilles de réséda
<i>Cerastium pedunculatum</i> Gaudin, 1828	Céraiste à longs pédoncules
<i>Cirsium spinosissimum</i> (L.) Scop., 1769	Cirse épineux
<i>Cryptogramma crista</i> (L.) R.Br., 1842	Allosore crispé
<i>Epilobium anagallidifolium</i> Lam., 1786	Épilobe à feuilles de mouron
<i>Epilobium fleischeri</i> Hochst., 1826	Épilobe de Fleischer
<i>Euphrasia minima</i> Jacq. ex DC., 1805	Petite Euphrase
<i>Gnaphalium supinum</i> L., 1768	Gnaphale couché
<i>Homogyne alpina</i> (L.) Cass., 1821	Homogyne des Alpes
<i>Juncus trifidus</i> L., 1753	Jonc trifide
<i>Leontodon helveticus</i> Mérat, 1831	Léontodon de Suisse
<i>Leucanthemopsis alpina</i> (L.) Heywood, 1975	Marguerite des Alpes
<i>Linaria alpina</i> (L.) Mill., 1768	Linaire des Alpes
<i>Luzula alpinopilosa</i> (Chaix) Breistr., 1947	Luzule marron
<i>Luzula spicata</i> (L.) DC., 1805	Luzule en épi
<i>Oxyria digyna</i> (L.) Hill, 1768	Oxyria à deux styles
<i>Poa laxa</i> Haenke, 1791	Pâturin lâche
<i>Pritzelago alpina</i> (L.) Kuntze, 1891	Cresson des chamois
<i>Ranunculus glacialis</i> L., 1753	Renoncule des glaciers
<i>Rhododendron ferrugineum</i> L., 1753	Rhododendron ferrugineux
<i>Salix herbacea</i> L., 1753	Saule herbacé
<i>Salix retusa</i> L., 1759	Saule à feuilles tronquées
<i>Saxifraga bryoides</i> L., 1753	Saxifrage fausse mousse
<i>Saxifraga exarata</i> Vill., 1779	Saxifrage sillonnée
<i>Saxifraga oppositifolia</i> L., 1753	Saxifrage à feuilles opposées
<i>Saxifraga paniculata</i> Cav., 1802	Saxifrage fragile
<i>Saxifraga stellaris</i> L., 1753	Saxifrage étoilée
<i>Sedum alpestre</i> Vill., 1779	Orpin des Alpes
<i>Senecio incanus</i> L., 1753	Sénéçon blanchâtre
<i>Sibbaldia procumbens</i> L., 1753	Sibbaldie couchée
<i>Silene acaulis</i> subsp. <i>exscapa</i> (All.) Killias, 1888	Silène sans pédoncules
<i>Trisetum distichophyllum</i> (Vill.) P.Beauv. ex Roem. & Schult.	Trisète distique
<i>Vaccinium uliginosum</i> subsp. <i>microphyllum</i> (Lange) Tolm., 1936	Airelle à petites feuilles
<i>Veronica alpina</i> L., 1753	Véronique des Alpes

L'inventaire des espèces présentes dans la marge proglaciaire du glacier de Bérard (Tableau 8) a été réalisé aux mêmes altitudes environ que celui effectué en marge proglaciaire du glacier d'Anneuley : entre 2280 et 2380 mètres d'altitude (Zone 2). Le front du glacier de Bérard descend en effet plus bas (à 2353 mètres en 2012, cf. Annexe 1) que celui du glacier d'Anneuley (situé à 2473 m). La zone inventoriée en marge proglaciaire du glacier de Bérard a été libérée plus récemment que la zone inventoriée en marge proglaciaire du glacier d'Anneuley, puisque le glacier de Bérard occupait toute la zone inventoriée à la fin des années 1960 (Long, 2013). Il s'agit donc là d'un inventaire de la végétation qui s'est formée depuis une soixantaine d'années. Notons que ce second inventaire comporte une unique espèce végétale supplémentaire par rapport au premier inventaire : le saxifrage faux aizoon, qui constitue une septième espèce présente sur les 19 espèces pionnières présentées dans le modèle de Burga *et al.*

**Tableau 8. Inventaire des espèces végétales observées en septembre 2015 dans la marge proglaciaire du glacier de Bérard entre 2280 et 2380 mètres d'altitude (Zone 2).**

Nom scientifique	Nom vernaculaire
<i>Androsace alpina</i> (L.) Lam., 1779	Androsace des Alpes
<i>Arabis alpina</i> L., 1753	Arabette des Alpes
<i>Cerastium pedunculatum</i> Gaudin, 1828	Céaiste à longs pédoncules
<i>Epilobium anagallidifolium</i> Lam., 1786	Épilobe à feuilles de mouron
<i>Epilobium fleischeri</i> Hochst., 1826	Épilobe de Fleischer
<i>Leucanthemopsis alpina</i> (L.) Heywood, 1975	Marguerite des Alpes
<i>Oxyria digyna</i> (L.) Hill, 1768	Oxyria à deux styles
<i>Pritzelago alpina</i> (L.) Kuntze, 1891	Cresson des chamois
<i>Saxifraga aizoides</i>	Saxifrage faux aizoon
<i>Saxifraga bryoides</i> L., 1753	Saxifrage fausse mousse
<i>Saxifraga exarata</i> Vill., 1779	Saxifrage sillonnée
<i>Saxifraga oppositifolia</i> L., 1753	Saxifrage à feuilles opposées
<i>Saxifraga paniculata</i> Cav., 1802	Saxifrage fragile
<i>Saxifraga stellaris</i> L., 1753	Saxifrage étoilée
<i>Silene acaulis</i> subsp. <i>exscapa</i> (All.) Killias, 1888	Silène sans pédoncules

L'épilobe de Fleischer, la linaira des Alpes, ainsi que le saxifrage faux aizoon sont les plantes pionnières qui colonisent le plus tôt la marge proglaciaire après le retrait du glacier : environ 7 ans après, jusqu'à 100 mètres du front glaciaire (Tableau 9). La linaira des Alpes et le saxifrage faux aizoon ne se développent qu'entre 7 et 12 ans après le retrait du glacier, soit entre 100 et 150 mètres en aval du front, et disparaissent ensuite. A l'inverse, l'épilobe de Fleischer s'implante de plus en plus densément au fur et à mesure que le glacier se retire, atteignant sa couverture maximale entre 970 et 1440 mètres du front glaciaire, ce qui correspond dans le vallon de Bérard à l'étage subalpin, à l'extrême est du vallon. Les quatre autres espèces retenues (l'oxyria à deux styles, le saxifrage fausse mousse, l'adénostyle à feuilles blanches et la céaiste à longs pédoncules) se développent à partir de 12 ans après le retrait du glacier, tout d'abord avec une couverture très faible à 150 mètres du front (« présence rare »), puis avec une couverture fréquente à 200 mètres du front. Le saxifrage fausse mousse et la céaiste à longs pédoncules redeviennent rares à environ 500 mètres du front, puis sont définitivement absents à partir de 800 mètres du front, tandis que l'oxyria à deux styles et l'adénostyle à feuilles blanches sont présentes plus longtemps après le retrait du glacier, respectivement jusqu'à 77 ans et 47 ans après le retrait glaciaire.

Le modèle de Burga *et al.* associe également une chronoséquence aux espèces dominantes de lichens. La seule espèce de lichen recensée dans le modèle est le *Rhizocarpon geographicum*, qui est une espèce de lichen crustacée généralement fréquente à l'étage alpin dans les montagnes de climat tempéré (cf. Chapitre

2). D'après le modèle, *Rhizocarpon* apparaît très ponctuellement dès 1170 mètres du front glaciaire (57 ans après le retrait) et commence à avoir une couverture faible à 1920 mètres du front (119 ans après le retrait). Dans la marge proglaciaire des glaciers du vallon de Bérard, nous avons observé, parmi d'autres espèces de lichen crustacées, des lichens *Rhizocarpon geographicum* jusqu'à 2390 mètres d'altitude, dans les dépôts morainiques du glacier d'Anneuley. Cette espèce se développe avec une plus forte fréquence à plus basse altitude, nous en avons observé jusqu'à 1675 mètres dans le fond de la vallée.

L'inventaire de la phytocénose en marge proglaciaire n'a pas pu s'accompagner de l'inventaire de la zoocénose lors du stage de terrain dans le vallon de Bérard pour des raisons techniques. Toutefois, nous avons noté la présence de plusieurs espèces de collemboles, détritivores qui se développent à la surface des glaciers, dans leur partie frontale ainsi que dans leur partie rocheuse en marge proglaciaire.

En annexe figurent des photographies de collemboles et de certaines espèces végétales pionnières citées, présentes en marge proglaciaire du glacier d'Anneuley et du glacier de Bérard (Annexe 9, Annexe 10, Annexe 33 à Annexe 36).

Tableau 9. Chronoséquence générale des plantes pionnières et lichens en marge du glacier de Morteratsch (Alpes suisses), d'après Burga *et al.* (2010) servant de référence pour l'étude de l'inventaire en marge proglaciaire dans le vallon de Bérard. L'âge de la zone 1 est issu des résultats de l'étude lichénométrique (Chapitre 2) et la distance de la zone 1 et de la zone 2 au front glaciaire est calculée à partir de la méthode présentée dans le Chapitre 1.

Âge du retrait glaciaire	Zone 1		entre 0 et 180 ans (datation minimale) ou entre 0 et 128 ans (datation maximale)										
	Glacier de Morteratsch	Zone 1	7	12	17	27	37	47	57	77	97	119	140
Distance depuis le front glaciaire	Glacier de Morteratsch	Zone 1 et Zone 2	100	150	200	500	800	970	1170	1440	1660	1920	2050
			entre 0 et 250m (Zone 1), entre 0 et 200m (Zone 2)										
Plantes pionnières et lichens													
Glacier de Morteratsch	Zone 1	Zone 2											
<i>Epilobium fleischeri</i>	X	X	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
<i>Linaria alpina</i>	X		.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
<i>Saxifraga aizoides</i>		X	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
<i>Rumex scutatus</i>			.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
<i>Oxyria digyna</i>	X	X	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
<i>Saxifraga bryoides</i>	X	X	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
<i>Adenosyles leucophylla</i>	X		.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
<i>Poa nemoralis</i>			.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
<i>Achillea moschata</i>			.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
<i>Trifolium pallescens</i>			.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
<i>Cerastium pedunculatum</i>	X	X	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
<i>Cardamine resedifolia</i>			.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
<i>Cerastium uniflorum</i>			.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
<i>Salix spp.</i>			.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
<i>Alnus viridis</i>			.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
<i>Rhacomitrium canescens</i>			.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
<i>Pohlia gracilis</i>			.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
<i>Myricaria germanica</i>			.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
<i>Gemma reptans</i>			.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
<i>Heteracaulon staticifolium</i>			.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
<i>Stereocaulon alpinum</i>			.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
<i>Rhizocarpon geoglyphicum</i>	X		.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

- ..... Rarement présent
- ..... Présent de manière non fréquente, avec une faible couverture au sol
- ..... Présent de manière fréquente, avec une faible couverture au sol
- ..... Présent de manière fréquente, avec une couverture moyenne au sol
- ..... Présent de manière fréquente, avec une forte couverture au sol
- ..... Présence ponctuelle, avec une forte couverture au sol

### 3.4 Conclusion

Cette étude est un premier pas dans l'identification de l'état actuel de la dynamique végétale en marge proglaciaire dans le vallon de Bérard. La succession écologique qui se déroule dans les zones étudiées a été analysée selon un modèle successional élaboré en marge proglaciaire dans une autre vallée des Alpes (Burga *et al.* 2010), ce qui nous a permis d'identifier certaines espèces végétales indicatrices d'un retrait des glaciers plus ou moins récent. En marge proglaciaire du glacier d'Anneuley et de Bérard, ce sont 7 espèces indicatrices du retrait glaciaire qui ont été identifiées (plantes et lichens). Afin de pouvoir spécifier la phase successionale dans laquelle se situent les zones couvertes par l'inventaire, il serait nécessaire d'effectuer des mesures concernant la fréquence des espèces et la superficie de leur couverture au sol.

L'étude de la succession écologique dans cette aire d'étude peut être approfondie par plusieurs moyens. Une première difficulté que nous avons rencontrée est liée à la faible acquisition de données dont nous disposons. Les sources bibliographiques d'une part sont limitées. Le protocole de suivi photographique mené par Asters depuis 1999 permet de suivre l'évolution de la végétation sur l'épaulement de la Tête des Crottes, sous l'Aiguille de Mesure, bordant les moraines latérales à l'est du glacier de Beugeant (Long, 2013). Toutefois, il n'existe pas de synthèse portant sur la biodiversité des glaciers du vallon et de leur marge proglaciaire. Concernant l'identification des espèces végétales et animales, le travail de terrain est exigeant en termes de connaissances et de matériel.

Une deuxième difficulté ensuite, à partir du moment où nous analysons l'inventaire que nous avons relevé, réside dans la difficulté de comparaison avec les modèles. Nous avons choisi d'étudier la biocénose du vallon à partir de la grille de lecture d'un modèle fondé sur l'étude d'un grand glacier de vallée (le glacier de Morteratsch), qui a une vitesse de retrait bien supérieure à celle des glaciers de Bérard qui sont des glaciers de cirque de petite taille. Ainsi, la zone libérée par le glacier de Morteratsch depuis 77 ans s'étend jusqu'à une distance de 1440 mètres du front glaciaire actuel, tandis que la zone libérée par le glacier d'Anneuley depuis 75 ans s'étend jusqu'à une distance de 125 mètres du front glaciaire. D'autres facteurs, comme l'altitude, l'exposition, le climat local (cf. Chapitre 2, Tableau 3) et la nature du substrat, font que la comparaison de la succession écologique dans ces deux marges proglaciaires est délicate. Elle permet toutefois de donner une idée générale de l'évolution de la végétation : le retrait des glaciers du vallon de Bérard, et donc la série dynamique végétale associée, est relativement lente. Ce trait est caractéristique des glaciers de cirque de taille relativement petite. Cette étude invite, enfin, à réaliser de plus amples recherches sur la dynamique végétale en marge proglaciaire dans le massif des Aiguilles Rouges, à travers la mise en place d'inventaires botaniques couvrant une plus vaste zone.



## Conclusion générale

A travers les trois études menées dans le cadre de ce mémoire, nous avons tenté de répondre à un double objectif : l'actualisation du suivi scientifique de l'évolution des glaciers du vallon de Bérard, et l'apport de nouveaux champs et méthodes de la recherche dans le but de compléter la connaissance de leur dynamique.

En réponse au premier objectif, nous avons proposé une étude de l'évolution de la longueur des glaciers entre 2000 et 2012 à partir de la modélisation de leur ligne d'écoulement sous SIG (Chapitre 1). Cinq glaciers ont été considérés pour cette étude : le glacier d'Anneuley, le glacier de Bérard, le glacier de Beugeant A, le glacier de Beugeant B et le glacier du Mort. La longueur des glaciers du vallon de Bérard a diminué de 20% en moyenne entre 2000 et 2012, et de 11% entre 2008 et 2012. La longueur moyenne des glaciers était de 914 mètres en 2000, de 853 mètres en 2004, de 825 mètres en 2008, pour atteindre 735 mètres en 2012.

Le deuxième objectif a été atteint de manières multiples à travers l'ensemble des études menées :

- Le premier chapitre a donné lieu à l'introduction de l'algorithme de la ligne d'écoulement dans le suivi scientifique des glaciers d'étude, apportant une nouvelle méthode de modélisation de l'évolution de la longueur des glaciers. Par la suite, cette étude a été l'occasion de présenter une modélisation de l'évolution prévisionnelle des glaciers d'ici 2050. D'après nos résultats, le glacier du Mort aura probablement disparu en 2037, tandis que la longueur des quatre autres glaciers aura diminué de 54% en moyenne entre 2000 et 2050. Enfin, le premier chapitre a donné lieu à une réflexion sur l'influence du climat local sur le retrait glaciaire, à travers l'analyse statistique des températures mensuelles moyennes mesurées dans le massif des Aiguilles Rouges. Cette analyse s'est soldée par le constat que le climat local est un facteur complexe du retrait glaciaire que nous n'avons pas pu mesurer, faute de résultats suffisamment significatifs.

- Le deuxième chapitre a donné lieu à l'introduction de la méthode lichénométrique dans le vallon de Bérard, comme méthode de datation du retrait glaciaire à partir de la taille des lichens, nous permettant de remonter jusqu'au Petit Âge Glaciaire. En effet, d'après nos résultats, les glaciers auraient atteint le fond du vallon pendant le Petit Âge Glaciaire et se seraient retirés entre le XVI<sup>e</sup> et le XVIII<sup>e</sup> siècle.

- Le troisième chapitre a introduit un modèle venant de l'écologie, centré sur la théorie de la succession écologique en marge proglaciaire. Cette méthode a permis d'identifier 7 espèces de plantes et lichens indicatrices du retrait glaciaire en marge proglaciaire. Cette étude apporte une réponse aux perspectives énoncées dans la conclusion de l'étude de Rees Catalan (2012), qui affirmait à propos du versant nord du vallon de Bérard : « C'est un secteur, du fait des changements en cours, qu'il sera intéressant de suivre année par année parce que plus le retrait de glaciers progresse, plus des nouveaux phénomènes seront à répertorier. Ce sera le cas notamment de la flore, qui occupe assez rapidement ces espaces vierges et les colonise, augmentant davantage la biodiversité du secteur. » Ce chapitre se veut être une première réponse au manque de recherches portant sur la biodiversité de la Réserve Naturelle du Vallon de Bérard dans la littérature.

Ce mémoire s'est appuyé sur différents types de méthodes (mesures de terrain, photo-interprétation, analyse bibliographique, cartographie et modélisation statistique) et s'est intéressé à des disciplines diverses (géomorphologie glaciaire, géomatique, climatologie, botanique et écologie). Cependant, la méthode générale utilisée dans ce mémoire peut être résumée par le seul terme de modélisation : pour chaque étude, la définition d'un modèle est en effet primordiale pour assurer à la fois la significativité des résultats et la reproductibilité de la méthode.

L'ensemble des études présentées dans ce mémoire pourront être ultérieurement prolongées : à travers l'actualisation du suivi de l'évolution des glaciers (notamment par l'application de l'algorithme de la ligne d'écoulement, par exemple) et l'approfondissement de champs de recherche annexes, qui permettent d'ouvrir l'étude de la dynamique des glaciers à d'autres approches que celle de la géomorphologie glaciaire. Je pense notamment à la climatologie et aux statistiques, grâce auxquels une étude approfondie de l'influence du climat sur l'évolution des glaciers pourrait donner des résultats significatifs, et à l'écologie, à travers le concept de succession écologique et la mise en place d'un inventaire botanique systématique en marge proglaciaire.

## Annexes



## Annexes du chapitre 1

**Annexe 1. Résultats issus de l'algorithme de la ligne d'écoulement : altitude minimale (altitude du point le plus bas situé sur le contour du glacier), altitude maximale (altitude du point le plus haut situé sur le contour du glacier), et longueur de la ligne d'écoulement (L) en mètres pour chacun des glaciers du vallon de Bérard et pour l'ensemble des glaciers en moyenne, en l'an 2000, 2004, 2008 et 2012.**

	<b>Année</b>	<b>2000</b>	<b>2004</b>	<b>2008</b>	<b>2012</b>
Glacier d'Anneuley	Altitude minimale (m)	2400	2422	2446	2473
	Altitude maximale (m)	2695	2702	2695	2702
	L (m)	987	968	928	909
Glacier de Bérard	Altitude minimale (m)	2282	2320	2320	2353
	Altitude maximale (m)	2748	2748	2744	2722
	L (m)	1167	985	1038	933
Glacier de Beugeant A	Altitude minimale (m)	2507	2520	2520	2520
	Altitude maximale (m)	2739	2739	2739	2739
	L (m)	677	578	583	599
Glacier de Beugeant B	Altitude minimale (m)	2505	2495	2498	2540
	Altitude maximale (m)	2782	2782	2782	2782
	L (m)	929	998	914	830
Glacier du Mort	Altitude minimale (m)	2402	2402	2538	2636
	Altitude maximale (m)	2702	2702	2679	2673
	L (m)	810	737	662	508
<i>Moyenne</i>	<i>Altitude minimale (m)</i>	<i>2419</i>	<i>2432</i>	<i>2464</i>	<i>2543</i>
	<i>Altitude maximale (m)</i>	<i>2733</i>	<i>2735</i>	<i>2728</i>	<i>2724</i>
	<i>L (m)</i>	<i>914</i>	<i>853</i>	<i>825</i>	<i>756</i>

**Annexe 2. Résumé de l'étude quantitative sur l'évolution des glaciers du vallon de Bérard issue de Rees Catalan (2012) : méthode (a) et résultats (b).**

(a)

Variable	Longueur	Largeur	Altitude minimale et maximale	Superficie	Epaisseur
<b>Définition</b>	Indirecte : différence de position du front glaciaire entre deux dates. Longueur maximale.	Largeur maximale du glacier.	Altitude du front glaciaire et altitude du bassin d'alimentation	Non spécifiée.	Indirecte : perte d'épaisseur à partir de la variation de l'altitude du terrain.
<b>Année étudiée</b>	1939, 1952, 1967/1970, 2000, 2008	1939, 1952, 1967/1970, 2000, 2008	1939, 1952, 1967/1970, 2000, 2008	2008	1939, 2008
<b>Données</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Photographies aériennes IGN : 2000 (1/25000) ; 1970 (1/30000) ; 1967 (1/25000) ; 1952 (1/25000) ; 1939 (1/20000).</li> <li>• Orthophotos de l'IGN (BD Ortho@ 50 cm) : 2008</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Photographies aériennes IGN : 2000 (1/25000) ; 1970 (1/30000) ; 1967 (1/25000) ; 1952 (1/25000) ; 1939 (1/20000).</li> <li>• Orthophotos de l'IGN (BD Ortho@ 50 cm) : 2008</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Photographies aériennes IGN : 2000 (1/25000) ; 1970 (1/30000) ; 1967 (1/25000) ; 1952 (1/25000) ; 1939 (1/20000).</li> <li>• Orthophotos de l'IGN (BD Ortho@ 50 cm) : 2008</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Orthophotos de l'IGN (BD Ortho@ 50 cm) : 2008</li> <li>• Carte topographique IGN 3630 OT (1/25000) : 2012 (réalisée à partir des orthophotos de 2008) ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carte topographique IGN 3630 OT (1/25000) : 2012 (réalisée à partir des orthophotos de 2008) ; 1953 (réalisée à partir de relevés datant de 1949).</li> </ul>
<b>Méthode</b>	Qualitative et quantitative : analyse visuelle des orthophotos	Qualitative et quantitative : analyse visuelle des orthophotos	Qualitative et quantitative : analyse visuelle des orthophotos	Quantitative : outil 3D de Geoportail	Qualitative : comparaison des cartes topographiques

(b)

	Longueur en 2008 (m)	Largeur en 2008 (m)	Altitude minimale/maximale en 2008 (m)	Superficie en 2008 (m <sup>2</sup> )
<b>Anneuley</b>	540	372	2454/2792	125000
<b>Bérard</b>	770	323	2430/2770	160000
<b>Beugeant A</b>	455	333	2534/2800	71804
<b>Beugeant B</b>	440	330	2515/2761	65475
<b>Mort</b>	259	191	2505/2700	18301

**Annexe 3. Résumé de l'étude quantitative sur l'évolution des glaciers du vallon de Bérard de Long (2013) : méthode (a) et résultats (b).**

(a)

Variable	Altitude minimale et maximale	Superficie	Périmètre
<b>Définition</b>	Altitude du front glaciaire et altitude du bassin d'alimentation	Aire. Superficie projetée	Périmètre projeté
<b>Année étudiée</b>	1998, 2008	1998, 2008	1998, 2008
<b>Données</b>	Carte topographique IGN 3630 OT (1/25000) : 2001 (réalisée à partir des levés photogrammétriques de 1937 et 1982) ; 2008 (sur l'outil Géoportail de l'IGN)	Orthophotos de l'IGN acquises par Asters: 2008; 1998	Orthophotos de l'IGN acquises par Asters: 2008; 1998
<b>Méthode</b>	Qualitative et quantitative : analyse visuelle de la carte topographique	Quantitative : analyse cartographique. Outil <i>Area</i> sur MapInfo Professional v. 8.5	Quantitative : analyse cartographique. Outil <i>Perimeter</i> sur MapInfo Professional v. 8.5

(b)

	Altitude minimale/ maximale (m)		Superficie (m <sup>2</sup> )		Variation de la superficie (1998-2008)		Périmètre (m)	
	1998	2008	1998	2008	Absolue (m <sup>2</sup> )	Relative (%)	1998	2008
<b>Anneuley</b>	2380/2730	n.c.	165000	122000	-43000	-26.06	2216	1841
<b>Bérard</b>	2250/2750	2300/2700	185000	130000	-55000	-29.72	2738	2597
<b>Beugeant A (est)</b>	2450/2630	n.c.	234000	73000	-161000	-68.80	3562	1463
<b>Beugeant B (ouest)</b>	2510/2780	n.c.		75000				1877
<b>Mort</b>	2500/2650	n.c.	60000	36000	-24000	-40	3062	2965

**Annexe 5. Résultats détaillés des mesures lichénométriques réalisées dans le vallon de Bérard**

Zone et aire de mesure	Altitude (m)	Surface (m <sup>2</sup> )	Exposition	n	Thalle n°1		Thalle n°2		Thalle n°3		Thalle n°4		Thalle n°5		
					Diamètre maximal (mm)	Diamètre minimal (mm)									
I	1	1675	27	SO	5	110	85	80	65	90	55	98	58	95	78
	2	1720	26	SO	5	100	93	105	98	70	58	80	58	83	60
	3	1924	60	SSO	5	90	65	95	60	85	58	80	65	83	51
	4	1970	48	SO	5	83	76	100	75	98	85	95	60	105	80
II	1	2200	16	O	5	45	30	70	45	40	38	42	33	72	45
	2	2386	40	O	5	60	50	49	35	45	32	50	33	52	36
III	1	2200	27.5	O	5	40	38	41	30	53	50	43	35	45	31

**Annexe 4. Résultats de la vérification de la circularité des thalles. Les cellules colorées en vert représentent les résultats supérieurs à 0.90 (soit les thalles circulaires).**

Zone et aire de mesure	Thalle n°1	Thalle n°2	Thalle n°3	Thalle n°4	Thalle n°5	
I	1	0.77	0.81	0.61	0.59	0.82
	2	0.93	0.93	0.83	0.73	0.72
	3	0.72	0.63	0.68	0.81	0.61
	4	0.92	0.75	0.87	0.63	0.76
II	1	0.67	0.64	0.95	0.79	0.63
	2	0.83	0.71	0.71	0.66	0.69
III	1	0.95	0.73	0.94	0.81	0.69

## Rapport du stage de terrain (août - septembre 2015)

Dans le cadre du projet de mémoire, j'ai effectué un stage au sein de l'Association des Réserves Naturelles des Aiguilles Rouges (ARNAR) de 7 semaines. L'ARNAR propose plusieurs types d'animation portant sur les trois Réserves Naturelles (RN) situées dans le massif des Aiguilles Rouges (RN des Aiguilles Rouges, RN de Carlaveyron et RN du Vallon de Bérard). Le stage s'est effectué en deux parties : les deux premières semaines ont donné lieu à un stage d'animation au sein du chalet d'accueil de l'ARNAR au Col des Montets, encadré par l'animatrice salariée de l'ARNAR, et les cinq semaines suivantes ont donné lieu à un stage de recherche en autonomie. Ce sont les observations effectuées durant cette période de stage de recherche que je vais décrire à présent. L'objectif de ce rapport est de partager les observations que j'ai réalisées, illustrées par des photographies, et de faire part de certains questionnements à propos de zones qui, situées hors sentier, sont rarement explorées en dehors des visites occasionnelles effectuées par les gardes-techniciens des réserves naturelles.

Tous les clichés, sauf mention, sont de l'auteur, et ont été pris à la date de la sortie de terrain correspondante.

1) *Sortie de terrain au pied du glacier d'Anneuley avec Patrick Perret, garde-technicien, le 17 août 2015*

La marge proglaciaire du glacier d'Anneuley a été l'objet de la première sortie de terrain (Annexe 6). Patrick Perret, garde-technicien salarié chez Asters, le Conservatoire d'espaces naturels de Haute-Savoie, a accepté de m'accompagner. L'accès au glacier d'Anneuley s'est fait à partir du refuge de la Pierre à Bérard via la marge proglaciaire du glacier de Bérard : nous avons suivi les torrents d'eau de fonte issus du glacier de Bérard atteignant le glacier d'Anneuley par le nord-ouest.

Un premier questionnement s'est posé à l'arrivée en marge proglaciaire : comment peut-on expliquer la présence à la surface du glacier de lignes noires régulières, parallèles à la pente (Annexe 7)? L'hypothèse que nous faisons est que ces lignes sont équivalentes aux bandes de Forbes, c'est-à-dire des lignes constituées de débris qui témoignent du dépôt sédimentaire estival.



**Annexe 6. Le glacier d'Anneuley, depuis sa marge proglaciaire.**



**Annexe 7. Des lignes noires régulières à la surface du glacier d'Anneuley.**

Le front du glacier d'Anneuley se caractérise par une forte couverture de débris morainiques (à gauche sur l'Annexe 6 ; Annexe 8). En aval de la partie découverte (blanche) du glacier d'Anneuley, le glacier est progressivement recouvert de débris morainiques : nous faisons face à un glacier rocheux.

L'allusion aux moraines est l'occasion de discuter de la différence entre les moraines et les éboulis. Dans les éboulis, les roches roulent dans le sens de la pente et se déposent selon leur taille, elles sont donc triées (les plus grosses roches se déposent en aval et les plus petites se déposent en amont de la pente). Dans les moraines, il n'y a aucun tri : les roches ne roulent pas, elles sont déposées lors du retrait glaciaire ; les grosses roches peuvent donc rester en amont. Dans les moraines, on trouve une grande hétérogénéité des tailles des roches, c'est ce que l'on appelle le granoclassement.

Patrick Perret a réalisé un inventaire non exhaustif des espèces de plantes dans la marge proglaciaire du glacier d'Anneuley dans le cadre du suivi de la flore de la Réserve Naturelle du Vallon de Bérard. Plus de 50 espèces végétales ont été identifiées dans la moraine, dont l'androsace (Annexe 9). De nombreuses espèces de lichens ont été observées (environ 3-4 espèces de forme crustacée, 5-6 de formes foliacées). Du côté de la faune, nous avons pu observer de nombreux collemboles à la surface du glacier, ce sont des détritivores qui se nourrissent de la matière organique piégée dans la glace ou dans l'eau.



**Annexe 8. La terminaison frontale du glacier d'Anneuley, couverte de débris morainiques.**



**Annexe 9. Une plante pionnière, l'androsace des alpes (*Androsace alpinum*).**



**Annexe 10. Deux collemboles à la surface du glacier.**

2) *Sortie de terrain au col de Salenton (2526 m), le 21 août 2015*

Une sortie le long du sentier situé entre le refuge de la Pierre à Bérard (1924 m) et le col de Salenton (2526 m) est l'occasion d'avoir une vue d'ensemble sur les glaciers du vallon de Bérard (Annexe 11 à Annexe 14).



**Annexe 11. Vue d'ensemble sur les glaciers de Bérard depuis le sentier menant au col de Salenton.**



**Annexe 13. Vue sur le glacier de Bérard depuis le sentier menant au col de Salenton.**



**Annexe 12. Vue sur le glacier d'Anneuley depuis le sentier menant au col de Salenton.**



**Annexe 14. Vue sur le glacier du Mort et sur le glacier couvert de la Combe de Bérard depuis le sentier menant au col de Salenton.**

### 3) Sortie de terrain pour effectuer les mesures lichénométriques du fond de vallée, le 25 août 2015

Les mesures lichénométriques du fond de vallée (zone I, cf. Chapitre 2) ont été réalisées le 25 août 2015. Quatre aires ont été mesurées : les premières mesures ont été réalisées sur le sentier situé en fond de vallée, et sur un rocher qui comporte plusieurs genres de lichens en plus de *Rhizocarpon (geographicum)* (Annexe 15): *Xanthoria (elegans)* et *Aspicilia*. Les deuxièmes mesures ont été effectuées hors sentier, à la confluence du torrent provenant des glaciers et de l'Eau de Bérard (aire de mesure I-2). Les troisièmes mesures ont été réalisées sur la roche dans laquelle est construit le refuge de la Pierre à Bérard (Annexe 16). Enfin, les dernières mesures ont été réalisées en amont du refuge, près d'une prise d'eau gérée par EDF (aire I-4).



**Annexe 15. Mesure de l'un des cinq plus grands thalles de *Rhizocarpon (geographicum)* sur la première aire de mesure (I-1).**

**Annexe 16. Le rocher dans lequel est construit le refuge de la Pierre à Bérard est fortement colonisé par les lichens du genre *Rhizocarpon* (aire de mesure I-3).**

4) *Sortie de terrain en marge proglaciaire du glacier de Beugeant B avec Jacky Ravanel, garde-technicien retraité, le 28 août 2015*

Jacky Ravanel, garde-technicien de réserve naturelle à la retraite, a accepté de m'accompagner pour cette sortie de terrain. L'accès au glacier de Beugeant est plus difficile que l'accès au glacier de Bérard ou au glacier d'Anneuley. Nous avons d'abord atteint la marge proglaciaire du glacier d'Anneuley (par le Nord-Ouest), où nous avons pu identifier deux niveaux morainiques de périodes différentes qui se distinguent par deux phases différentes dans la succession écologique : un niveau morainique a déjà été colonisé par la végétation, un second s'est formé trop récemment pour que la végétation ait eu le temps de le coloniser (Annexe 17, cf. Chapitre 3). Les mesures lichénométriques de la marge proglaciaire du glacier d'Anneuley (zone II, cf. Chapitre 2) ont été réalisés à cette occasion (Annexe 18).



**Annexe 17. Deux niveaux morainiques distincts par la phase de la colonisation des plantes pionnières (au premier plan : moraines végétalisées, au second plan : moraines dénuées de végétation)**

**Annexe 18. Mesures lichénométriques (aire de mesure II-1). Cliché : J. Ravanel.**

A l'issue de la traversée de la marge proglaciaire du glacier d'Anneuley d'ouest en est, nous avons pu atteindre un point de vue situé sous le Chardonnet (2536 m). Depuis ce point de vue, nous avons une vue complète sur le glacier de Beugeant B (Annexe 19). Le questionnement lié aux lignes noires, que nous mettons en relation avec les bandes de Forbes, s'est également posé pour le glacier de Beugeant B. Nous avons également formulé une seconde hypothèse : ces lignes seraient dues à l'alternance entre l'ensoleillement et l'ombre quotidiens, car la ligne semble suivre l'ombre de l'obstacle rocheux qui se trouve à son aval (Annexe 20).



**Annexe 19. Le glacier de Beugeant B depuis le col situé sous le Chardonnet.**



**Annexe 20. Des lignes noires régulières à la surface du glacier de Beugeant B.**

Le retour s'est effectué par le même chemin environ qu'à l'aller. A partir de la marge proglaciaire du glacier d'Anneuley, nous avons alors abordé la situation du glacier de la Combe de Bérard. Il s'agit d'un glacier entièrement recouvert par les débris morainiques, mais on ne sait pas si le glacier est toujours en mouvement – cette question pourrait être à l'origine d'une sortie de terrain dans la zone du glacier de la Combe de Bérard.



**Annexe 21. A l'arrière-plan, au centre : le glacier couvert de la Combe de Bérard, dont les moraines frontales sont bien visibles.**



**Annexe 22. Des rigoles de ruissellement des eaux de fonte en marge proglaciaire du glacier de Bérard, formées récemment (selon notre hypothèse : formées un mois auparavant).**

5) *Sortie de terrain au col de l'Encrenaz (2579m) en amont du glacier de Beugeant A avec Jacky Ravel, garde-technicien retraité, le 8 septembre 2015*

Le glacier de Beugeant A est très difficile d'accès. Andres Rees Catalan, pour son étude sur les glaciers effectuée en 2012 (Rees Catalan, 2012) témoigne ne pas avoir pu faire d'observations de terrain sur le glacier de Beugeant A. Une possibilité que m'a proposée Jacky Ravel est d'atteindre le glacier de Beugeant A par le col de l'Encrenaz, situé à l'est du glacier. Cette sortie de terrain a nécessité 7h30 de marche, dont une dernière partie difficile dans la Combe de l'Encrenaz qui nécessiterait que les marcheurs soient encordés. Cette sortie de terrain a permis d'observer les glaciers de l'Encrenaz, situés sur le versant sud du col du même nom (Annexe 23). Le glacier de l'Encrenaz est un glacier de cirque morcelé, en partie glacier rocheux, comparable aux glaciers du vallon de Bérard avec une superficie plus réduite : d'après la méthode de l'algorithme de la ligne d'écoulement exposée dans le chapitre 1, nous avons pu estimer la longueur du glacier de l'Encrenaz en 2004 à 597 mètres, ce qui correspond à une longueur inférieure à celle du glacier du Mort la même année (cf. Chapitre 1).

Depuis le col de l'Encrenaz, nous avons une vue complète sur le glacier de Beugeant A (Annexe 24, Annexe 25). Nous avons pu observer que la partie terminale du glacier est couverte de débris morainiques (ce qui s'observe par la couleur relativement chaude des débris situés sur le glacier rocheux, Annexe 26). Nous observons les mêmes lignes noires régulières que sur la seconde partie du glacier de Beugeant (glacier de Beugeant B) et sur le glacier d'Anneuley.



**Annexe 23. Traversée de la Combe de l'Encrenaz, menant au col de l'Encrenaz – avec vue sur le glacier de l'Encrenaz (à droite). Cliché : J. Ravel**



**Annexe 24. Le col de l'Encrenaz et la vue sur le glacier de Beugeant A. Cliché : J. Ravel.**



**Annexe 25. Le glacier de Beugeant A dans sa partie amont, depuis le col de l'Encrenaz.**



**Annexe 26. Le glacier de Beugeant A et sa terminaison frontale recouverte de débris morainiques, depuis le col de l'Encrenaz.**

Pour des raisons de sécurité, nous n'avons pas pu accéder à la marge proglaciaire du glacier de Beugeant A pour procéder à des mesures lichénométriques et faire de plus amples observations de la marge proglaciaire.

6) *Sortie de terrain en marge proglaciaire du glacier de Bérard avec Patrick Perret, garde-technicien, le 10 septembre 2015*

La marge proglaciaire du glacier de Bérard a fait l'objet de la dernière sortie de terrain (Annexe 27). Concernant la géomorphologie glaciaire de la zone, nous avons constaté un trait qui distingue ce glacier des autres glaciers du vallon de Bérard : le front glaciaire, situé aux coordonnées géographiques 45.99281 °N, 6.86913 °E, à 2425 mètres d'altitudes, constitue une cavité (Annexe 28, Annexe 29, Annexe 30).



**Annexe 27.** Le glacier de Bérard depuis sa marge proglaciaire.



**Annexe 28.** Le front glaciaire du glacier de Bérard (2425 m).



**Annexe 29.** La cavité glaciaire au niveau du front vue de l'extérieur. Le bâton de marche donne l'échelle.



**Annexe 30.** La cavité glaciaire vue de l'intérieur

En aval du front glaciaire (front de la partie émergée, blanche, du glacier), le glacier de Bérard se prolonge dans un glacier couvert – c'est-à-dire que de la glace subsiste sous les débris morainiques (Annexe 31), et se fragmente en plusieurs plaques de glaces (Annexe 32).

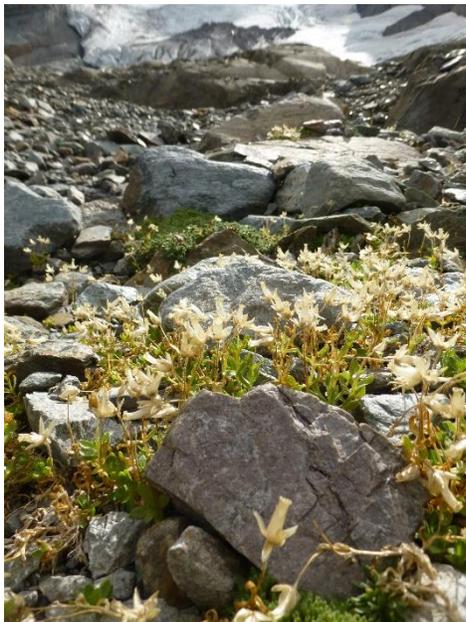


Annexe 31. Le glacier de Bérard recouvert de débris morainiques en aval de sa partie frontale.



Annexe 32. En marge du glacier, on observe des plaques de glaces comme celle-ci, épaisses de plusieurs dizaines de centimètres.

Accompagné à nouveau de Patrick Perret, un second inventaire botanique a pu être réalisé (cf. Chapitre 3).



Annexe 33. La céraïste à longs pédoncules (*Cerastium pedunculatum*).



Annexe 34. L'épilobe des moraines (*Epilobium fleischeri*).



**Annexe 35. Le saxifrage fausse mousse (*Saxifraga bryoides*).**



**Annexe 36. L'oxyria à deux styles (*Oxyria digyna*).**

Le retour est l'occasion d'effectuer les dernières mesures lichénométriques, en marge proglaciaire du glacier couvert de la Combe de Bérard (zone III, cf. Chapitre 2) – faute de pouvoir en effectuer en marge proglaciaire du glacier de Bérard, où les lichens n'ont pas encore colonisé la moraine.

## Bibliographie

- Alexandre F. et Génin A. (2011). Géographie de la végétation. Armand Colin. 302 p.
- Baumhauer, R. & Winkler, S. (2014). Glazialgeomorphologie. Borntraeger. 262 p.
- Blijenberg, H. (1998). Rolling stones? Triggering and frequency of hillslope debris flows in the Bachelard Valley, southern French Alps. Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap.
- Burga C.A. *et al.* (2010). "Plant succession and soil development on the foreland of the Morteratsch glacier (Pontresina, Switzerland): Straight forward or chaotic?" *Flora* n°205, pp. 561–576.
- Clements, F. E. (1936). Nature and structure of the climax. *Journal of ecology*, 24(1), 252-284.
- Drescher-Schneider, R. (2000). The Riss-Wuerm interglacial from West to East in the Alps: an overview of the vegetational succession and climatic development. *Geologie en Mijnbouw/Netherlands. Journal of Geosciences (Netherlands)*.
- Dumas, M. D. (2013). Changes in temperature and temperature gradients in the French Northern Alps during the last century. *Theoretical and applied climatology*, 111(1-2), 223-233.
- Emery, S. (2010). Succession: A Closer Look. *Nature Education Knowledge* 3(10):45.
- Gardent, M. (2014). Inventaire et retrait des glaciers dans les Alpes françaises depuis la fin du Petit Age Glaciaire. Geography, Université de Grenoble. 444 p.
- Lacoste, A. et Salanon, R. (2010). Eléments de biogéographie et d'écologie. Armand Colin. 318 p.
- Le Bris, R. et Paul, F. (2013). An automatic method to create flow lines for determination of glacier length : A pilot study with Alaskan glaciers. *Computers & Geosciences*, 53, 234-245.
- Lentschke, J. & Schröder, H. (2008). Untersuchungen zur rezenten und historischen Vergletscherung am Dmitrieva Gletscher im nördlichen Tien Shan (Kasachstan). Mensch & Buch Verlag, INCO-COPERNICUS Band V, Berlin, 101 p.
- Long, A. (2013). Suivi du retrait des glaciers en réserve naturelle 74, Université de Savoie. 104 p.
- Odum, E. P. (1969). The Strategy of Ecosystem Development. *Science* 164, 262-270.
- Orombelli, G., & Porter, S. C. (1983). Lichen growth curves for the southern flank of the Mont Blanc Massif, Western Italian Alps. *Arctic and Alpine Research*, 193-200.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences discussions*, 4(2), 439-473.
- Rees Catalan, A. (2012). Etude sur l'évolution récente des glaciers de la Réserve Naturelle du Vallon de Bérard, Université Jean Moulin Lyon 3. 96 p.
- Richard, H. (1988). Palynologie et climat. *Histoire & Mesure* n°3. Le climat. pp. 359-384.
- Von Raumer, J. & Bussy, F. (2004). Mont Blanc and Aiguilles Rouges – Geology of their polymetamorphic basement, *Géol. (Lausanne)*, 42.
- Zryd, A. (2001). Les glaciers. Pillet. 325 p.

## Liste des figures

Figure 1. Localisation de la zone d'étude (en rouge) et extension des glaciers d'étude (en violet) dans le contexte glaciaire régional (glaciers du massif du Mont-Blanc et glaciers du massif des Aiguilles Rouges – Mont Ruan).....	8
Figure 2. Localisation des glaciers d'étude au sein du vallon de Bérard. L'extension des glaciers d'étude est représentée d'après les orthophotos de 2012 de l'IGN (cf. Chapitre 1). En 2012, le glacier de Beugeant est morcelé en deux parties principales, dont l'une est située à l'est (glacier de Beugeant A) et l'autre à l'ouest (glacier de Beugeant B).....	9
Figure 3. Illustration de l'application de l'algorithme de la ligne d'écoulement selon ses principales étapes d'après Le Bris et Paul (2013). Les lettres en haut à gauche de chaque illustration font référence à l'étape correspondante, décrite sur la partie gauche de la figure.....	14
Figure 4. Comparaison des lignes d'écoulement des glaciers du vallon de Bérard en 2000, 2004, 2008 et 2012, modélisées d'après l'algorithme de la ligne d'écoulement.....	17
Figure 5. Modélisation linéaire de l'évolution de la longueur des glaciers pour la période 2000-2012, pour le glacier d'Anneuley ( $y_1$ ), le glacier de Bérard ( $y_2$ ), le glacier de Beugeant A ( $y_3$ ), le glacier de Beugeant B ( $y_4$ ) et le glacier du Mort ( $y_5$ ), avec le coefficient de corrélation linéaire associé ( $R^2$ ).....	19
Figure 6. Application du modèle linéaire de l'évolution de la longueur des glaciers à la période 2010-2050. Le graphique et le tableau de données donnent la longueur estimée du glacier en mètres tous les 5 ans. ...	20
Figure 7. Données et modélisation des températures saisonnières moyennes en °C entre 1995 et 2015 à la station Aiguilles Rouges – Nivôse (2365 m), d'après les données de Météo France. La modélisation polynomiale (Poly.) est représentée pour les températures estivales ( $y_E$ ) et hivernales ( $y_H$ ) moyennes, avec le coefficient de corrélation linéaire associé ( $R^2$ ).....	21
Figure 8. Comparaison du résultat de la digitalisation des contours du glacier d'Anneuley pour l'année 2000 (a) et pour l'année 2004 (b) dont l'orthophoto présente une forte couverture neigeuse.....	22
Figure 9. Les différents types de mesure en lichénométrie (Innes, 1985) : le diamètre maximal et le diamètre du cercle inscrit (ou diamètre minimal).....	27
Figure 10. Courbes de croissance du <i>Rhizocarpon geographicum</i> pour les Alpes: dans la vallée d'Ailefroide et du Vénéon (Datation 1) pour l'étage subalpin (a) et l'étage alpin (b), dans la vallée de l'Ubaye / vallée du Bachelard (Datation 2) (c) et dans le val d'Aoste (Datation 3) (d). ....	29
Figure 11. Géomorphologie glaciaire et lichénométrie dans le vallon de Bérard : contexte géomorphologique et datation du fond de vallée, de la marge proglaciaire du glacier d'Anneuley et de la marge proglaciaire du glacier couvert de la Combe de Bérard. ....	32
Figure 12. Localisation des zones couvertes par l'inventaire botanique réalisé en marge proglaciaire dans le vallon de Bérard en 2015.....	40

## Liste des tableaux

Tableau 1. Evolution de la longueur des lignes d'écoulement modélisées entre 2000 et 2012 pour chaque glacier et évolution moyenne. La longueur (L) de la ligne d'écoulement est donnée en mètres (m) et la variation de la longueur ( $\Delta L$ ) d'une année sur l'autre est donnée en mètres (m) et pourcentages (%). Les cellules grisées représentent l'absence logique d'informations.....	18
Tableau 2. Estimation de l'évolution de la longueur des glaciers entre 2000 et 2050 à partir du modèle pour le glacier d'Anneuley, le glacier de Bérard, le glacier de Beugeant A et le glacier de Beugeant B, et évolution prévisionnelle moyenne. La longueur (L) de la ligne d'écoulement est donnée en mètres (m) et la variation de la longueur ( $\Delta L$ ) entre 2000 et 2050 est donnée en mètres (m) et pourcentages (%)......	20
Tableau 3. Données climatologiques de la station météorologique Aiguilles Rouges – Nivôse (2365 m d'altitude) : température moyenne mensuelle et annuelle en °C entre 1995 et 2015. D'après les données de Météo France.....	26
Tableau 4. Description des trois courbes de croissance lichénométriques utilisées (Datation 1, Datation 2, Datation 3), d'après Pech <i>et al.</i> (2003).....	28
Tableau 5. Mesures lichénométriques dans le vallon de Bérard. ....	30
Tableau 6. Datation des zones et aires de mesure lichénométriques, exprimée par l'âge en années (a) et par l'année de colonisation des lichens pour les aires de mesure, et par l'année moyenne de colonisation uniquement pour les zones. ....	31
Tableau 7. Inventaire des espèces végétales observées en août 2015 dans la marge proglaciaire du glacier d'Anneuley entre 2300 et 2440 mètres d'altitude (Zone 1). ....	41
Tableau 8. Inventaire des espèces végétales observées en septembre 2015 dans la marge proglaciaire du glacier de Bérard entre 2280 et 2380 mètres d'altitude (Zone 2). ....	42
Tableau 9. Chronoséquence générale des plantes pionnières et lichens en marge du glacier de Morteratsch (Alpes suisses), d'après Burga <i>et al.</i> (2010) servant de référence pour l'étude de l'inventaire en marge proglaciaire dans le vallon de Bérard. L'âge de la zone 1 est issu des résultats de l'étude lichénométrique (Chapitre 2) et la distance de la zone 1 et de la zone 2 au front glaciaire est calculée à partir de la méthode présentée dans le Chapitre 1. ....	44

## Liste des annexes

Annexe 1. Résultats issus de l’algorithme de la ligne d’écoulement : altitude minimale (altitude du point le plus bas situé sur le contour du glacier), altitude maximale (altitude du point le plus haut situé sur le contour du glacier), et longueur de la ligne d’écoulement (L) en mètres pour chacun des glaciers du vallon de Bérard et pour l’ensemble des glaciers en moyenne, en l’an 2000, 2004, 2008 et 2012.....	51
Annexe 2. Résumé de l’étude quantitative sur l’évolution des glaciers du vallon de Bérard issue de Rees Catalan (2012) : méthode (a) et résultats (b). .....	52
Annexe 3. Résumé de l’étude quantitative sur l’évolution des glaciers du vallon de Bérard de Long (2013) : méthode (a) et résultats (b). .....	53
Annexe 4. Résultats de la vérification de la circularité des thalles. Les cellules colorées en vert représentent les résultats supérieurs à 0.90 (soit les thalles circulaires). .....	54
Annexe 5. Résultats détaillés des mesures lichénométriques réalisées dans le vallon de Bérard .....	54
Annexe 6. Le glacier d’Anneuley, depuis sa marge proglaciaire. ....	56
Annexe 7. Des lignes noires régulières à la surface du glacier d’Anneuley.....	56
Annexe 8. La terminaison frontale du glacier d’Anneuley, couverte de débris morainiques.....	57
Annexe 9. Une plante pionnière, l’androsace des alpes ( <i>Androsace alpinum</i> ).....	57
Annexe 10. Deux collemboles à la surface du glacier.....	57
Annexe 11. Vue d’ensemble sur les glaciers de Bérard depuis le sentier menant au col de Salenton. ....	58
Annexe 12. Vue sur le glacier d’Anneuley depuis le sentier menant au col de Salenton.....	58
Annexe 13. Vue sur le glacier de Bérard depuis le sentier menant au col de Salenton.....	58
Annexe 14. Vue sur le glacier du Mort et sur le glacier couvert de la Combe de Bérard depuis le sentier menant au col de Salenton. ....	58
Annexe 15. Mesure de l’un des cinq plus grands thalles de Rhizocarpon ( <i>geographicum</i> ) sur la première aire de mesure (I-1). .....	59
Annexe 16. Le rocher dans lequel est construit le refuge de la Pierre à Bérard est fortement colonisé par les lichens du genre Rhizocarpon (aire de mesure I-3). .....	59
Annexe 17. Deux niveaux morainiques distincts par la phase de la colonisation des plantes pionnières (au premier plan : moraines végétalisées, au second plan : moraines dénuées de végétation).....	60

Annexe 18. Mesures lichénométriques (aire de mesure II-1). Cliché : J. Ravanel.....	60
Annexe 19. Le glacier de Beugeant B depuis le col situé sous le Chardonnet.....	61
Annexe 20. Des lignes noires régulières à la surface du glacier de Beugeant B.....	61
Annexe 21. A l'arrière-plan, au centre : le glacier couvert de la Combe de Bérard, dont les moraines frontales sont bien visibles. ....	61
Annexe 22. Des rigoles de ruissellement des eaux de fonte en marge proglaciaire du glacier de Bérard, formées récemment (selon notre hypothèse : formées un mois auparavant).....	61
Annexe 23. Traversée de la Combe de l'Encrenaz, menant au col de l'Encrenaz – avec vue sur le glacier de l'Encrenaz (à droite). Cliché : J. Ravanel.....	62
Annexe 24. Le col de l'Encrenaz et la vue sur le glacier de Beugeant A. Cliché : J. Ravanel.....	62
Annexe 25. Le glacier de Beugeant A dans sa partie amont, depuis le col de l'Encrenaz. ....	63
Annexe 26. Le glacier de Beugeant A et sa terminaison frontale recouverte de débris morainiques, depuis le col de l'Encrenaz. ....	63
Annexe 27. Le glacier de Bérard depuis sa marge proglaciaire. ....	64
Annexe 28. Le front glaciaire du glacier de Bérard (2425 m).....	64
Annexe 29. La cavité glaciaire au niveau du front vue de l'extérieur. Le bâton de marche donne l'échelle. ....	64
Annexe 30. La cavité glaciaire vue de l'intérieur.....	64
Annexe 31. Le glacier de Bérard recouvert de débris morainiques en aval de sa partie frontale.....	65
Annexe 32. En marge du glacier, on observe des plaques de glaces comme celle-ci, épaisses de plusieurs dizaines de centimètres.....	65
Annexe 33. La céraïste à longs pédoncules ( <i>Cerastium pedunculatum</i> ).....	65
Annexe 34. L'épilobe des moraines ( <i>Epilobium fleischeri</i> ).....	65
Annexe 35. Le saxifrage fausse mousse ( <i>Saxifraga bryoides</i> ).....	66
Annexe 36. L'oxyria à deux styles ( <i>Oxyria digyna</i> ).....	66