



HAL
open science

**Géodynamique, colonisation végétale et phytodiversité
des talus d'éboullis dans le massif de la Grande
Chartreuse (Préalpes françaises du Nord).
Caractéristiques géo-écologiques et sensibilité aux
changements environnementaux.**

Sylvie Arques

► **To cite this version:**

Sylvie Arques. Géodynamique, colonisation végétale et phytodiversité des talus d'éboullis dans le massif de la Grande Chartreuse (Préalpes françaises du Nord). Caractéristiques géo-écologiques et sensibilité aux changements environnementaux.. Sciences de l'Homme et Société. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2005. Français. NNT: . tel-00011509

HAL Id: tel-00011509

<https://theses.hal.science/tel-00011509>

Submitted on 1 Feb 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE JOSEPH FOURIER – GRENOBLE 1
SCIENCES et GEOGRAPHIE

THESE

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Joseph Fourier

Spécialité : Géographie

Présentée et soutenue publiquement par

Sylvie ARQUES

Le 13 décembre 2005

**Géodynamique, colonisation végétale et phytodiversité
des talus d'éboulis dans le massif de la Grande Chartreuse
(Préalpes françaises du Nord). Caractéristiques géo-
écologiques et sensibilité aux changements
environnementaux.**

Composition du Jury :

M. Jean-Paul AMAT, Professeur, Université Paris– Sorbonne, Paris 4	Président
M. Philippe SCHOENEICH, Professeur, Université Joseph Fourier, Grenoble 1	Directeur
M. Georges ROVERA, Maître de Conférences, Université Joseph Fourier, Grenoble 1	Co-directeur
M. Pierre PECH, Professeur, Université Panthéon – Sorbonne, Paris 1	Rapporteur
M. Jean-Jacques BRUN, Directeur de Recherche, Cemagref, Grenoble	Rapporteur
M. Martin BENISTON, Professeur, Université de Fribourg, Suisse	Examineur

Thèse préparée au sein du Laboratoire « Systèmes Environnementaux, Information Géographique et Aide à la Décision » (SEIGAD), Institut de Géographie Alpine, UJF, Grenoble 1.

REMERCIEMENTS

Voilà, ainsi s'achèvent cinq années de recherches menées (presque) en solitaire et sans financement... Que toutes les personnes citées ici, considèrent l'aboutissement de ce travail comme ma profonde reconnaissance. Je ne vais oublier personne. Merci donc à :

- Monsieur Georges Rovéra : co-directeur de thèse d'un point de vue administratif mais véritable instigateur et directeur de ce travail dans les faits. Tout au long de ces sept années passées avec vous (Maîtrise, DEA et Thèse), j'ai pu apprécier votre enthousiasme et votre confiance. Merci pour la rigueur de vos corrections;
- Philippe Schoeneich pour avoir accepté la direction « administrative » de ce travail;
- Monsieur Pierre Pech pour ses conseils, sa confiance et son soutien et d'avoir accepté d'être rapporteur de ce travail;
- Monsieur Jean-Jacques Brun pour ses encouragements et pour avoir accepté également d'être rapporteur de cette thèse;
- Monsieur Martin Beniston, pour son aide précieuse sur l'aspect climatique ainsi que pour sa participation au jury de cette thèse;
- Monsieur Jean-Paul Amat pour avoir accepté d'être président du jury.

Je remercie tout particulièrement Christophe Corona. Au cours de ces cinq dernières années, nous avons parcouru ensemble presque tous les dépôts détritiques de la Vallée de la Romanche et du massif de la Chartreuse. La géographie est un sport complet, n'est ce pas Chris! Je tiens aussi à te remercier pour m'avoir aidé à installer les parcelles topomicrométrées à La Plagne et pour avoir accepté d'en réaliser le suivi avec moi. Bref, pour résumer, nous avons formé une équipe de recherche...à deux ! et parfois à trois car je tenais aussi à remercier Yannick Robert, le troisième larron, pour son objectivité et son soutien. C'est certainement la seule personne que je connaisse qui soit capable de parler sans s'arrêter, une seule seconde, sur un trajet Grenoble-Rennes. Merci donc à vous deux.

Mes remerciements vont également à Monsieur Francisco L. Pérez pour son soutien, nos échanges bibliographiques et l'intérêt qu'il a porté à mon travail.

Merci aussi à Cloé Laurent, que j'ai eu le plaisir d'encadrer en Master. Tes résultats en dendrochronologie/dendrogéomorphologie m'ont fait gagner beaucoup de temps. Merci pour le sérieux de ton travail.

Dans le désordre, merci également à Michel Chardon, Louise Filion, Laurent Astrade, Vincent Jomelli, Sylvie Vanpeene-Bruhier, Marion Gosselin et Christian Körner, pour avoir répondu à certaines de mes interrogations dans des domaines aussi variés que la dendrochronologie/dendrogéomorphologie, la bioclimatologie, l'écologie du paysage ou la biodiversité.

Je remercie également Anne-Marie Boullier, Directrice de l'école doctorale « Terre, Univers, Environnement », pour son soutien et pour avoir accepté à deux reprises ma demande de dérogation.

Je pense aussi à Laëticia Azzolin, responsable de la cartothèque de l'IGA, pour sa gentillesse et pour m'avoir laissé utiliser les documents géo-iconographiques à ma guise. Je n'oublie pas Michel Marin, notre bibliothécaire national ! Personne ne connaissait mieux que lui le fond IGA et j'ai été bien déçue de constater qu'on avait un peu oublié son rôle suite au déménagement de l'IGA.

Merci aussi à mes amis (Africa, Isabelle, David, Jeff, Christine, Manu, Fred, Gilles et Florence) pour leur soutien et bien plus encore...Merci !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

C'est bien plus que des remerciements que je dois à ma famille et tout particulièrement à mes parents, qui malgré l'éloignement géographique (Polynésie, Nouvelle Calédonie et j'en passe...) m'ont soutenu jusqu'au bout. Je pense aussi à Cécile et Nathalie, mes sœurs, pour leur soutien sans faille.

Une pensée aussi à mes grands-parents, René et Carmen Arquès. Si seulement j'avais pu finir plus tôt...

« **L**a juxtadisciplinarité ne suffit plus : le géomorphologue doit devenir botaniste et le botaniste se faire géomorphologue. C'est aussi une condition pour que, dans les milieux de montagne, l'une et l'autre des deux disciplines cessent d'être purement descriptives pour se fondre en une seule qui pourrait, à défaut d'être explicative, avoir l'ambition d'être au moins interprétative ».

André Baudière

SOMMAIRE

INTRODUCTION

I. Thématique de recherche	6
II. Hypothèses et objectifs	6
III. Intérêt et portée scientifiques des résultats.....	8
IV. Plan de la thèse	9

PREMIERE PARTIE : Les talus d'éboulis semi-végétalisés de moyenne montagne : cadre théorique et terrain d'application.....10

CHAPITRE 1 : <i>l'état des connaissances</i>	11
I. Les talus d'éboulis : études géomorphologiques, phytosociologiques et écologiques	11
II. Eboulis et terminologies	17
III. Les changements environnementaux en montagne.....	29

CHAPITRE 2 : *Bases théoriques pour une étude géo-écologique des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis et de leur évolution dynamique*

I. La Théorie de la biorhexistasie.....	65
II. Les apports de l'écologie du paysage.....	68
III. La biodiversité : un concept omniprésent, complexe et dynamique.....	74

CHAPITRE 3 : *Le terrain d'application : Le massif de la Chartreuse (Parc Naturel Régional et Réserve Naturelle des Hauts)*.....

I. Localisation du terrain d'étude.....	77
II. Géomorphologie structurale et géomorphologie dynamique externe	80
III. Un climat de moyenne montagne humide et fraîche.....	87
IV. Des conditions bioclimatiques favorables à la dynamique végétale.....	91
V. Les conséquences du déclin agro-sylvo-pastoral sur l'évolution de l'utilisation du sol des « hauts » de versant.....	93

Conclusion de la première partie..... 107

DEUXIEME PARTIE : Méthodologie pour une étude géo-écologique des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis.....108

CHAPITRE 4 : <i>Analyse systémique des mosaïques biorhexistasiques</i>	109
I. Une démarche systémique pour l'étude des mosaïques biorhexistasiques.....	109
II. La stratification de l'échantillonnage.....	114
III. Approche spatiale et dynamique des mosaïques biorhexistasiques à l'échelle des écosystèmes.....	117

CHAPITRE 5 : *Protocoles d'étude et descripteurs utilisés à l'échelle de la station et de la parcelle*.....

I. Morphométrie, géodynamique de surface et suivi micro-climatique.....	131
II. Approche phyto-écologique et évaluation de la phytodiversité	151

Conclusion de la deuxième partie.....171

TROISIEME PARTIE : Résultats et discussion..... 172

CHAPITRE 6 : *Structure et dynamique des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis à l'échelle des écosystèmes*.....

I. Analyse spatiale et phyto-morphologique des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis.....	173
II. Analyse dynamique des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis.....	194

CHAPITRE 7 : *Analyse phyto-écologique : vers une typologie fonctionnelle des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis*.....

.....	254
-------	-----

I. Caractérisation mésologique des mosaïques biorhexistatiques.....	254
II. Typologie affinée et cartographie actuelle des mosaïques biorhexistatiques d'éboulis.....	296

CHAPITRE 8 : Approche micro-climatique, bioclimatique et géodynamique : contribution à la validation du réchauffement climatique dans l'étage infra-périglacière.....

I. Une ambiance morphoclimatique de moyenne montagne.....	306
II. Les caractéristiques des régimes thermiques à 20 cm et -10 cm le long du gradient biorhexistatique : Approches bioclimatique et morphoclimatique.....	338
III. L'évolution morphodynamique des talus d'éboulis de La Plagne et de l'Aulp du Seuil : principales caractéristiques de la géodynamique de surface en relation avec le gradient biorhexistatique.....	352
IV. Contribution à la validation du réchauffement climatique dans l'étage infra-périglacière : les apports de la dendrochronologie et de la dendrogéomorphologie.....	379

CONCLUSION GENERALE

I. L'intérêt d'une approche géo-écologique systémique et appliquée.....	386
II. Le rôle fondamental de la biorhexistatie comme élément structurant à différents niveaux d'observation et d'organisation.....	387
III. La pertinence des mosaïques biorhexistatiques d'éboulis de l'étage infra-périglacière comme Eléments intégrateurs et révélateurs des changements environnementaux en cours.....	388
IV. La nécessité d'un suivi à long terme.....	388

BIBLIOGRAPHIE.....	390
---------------------------	------------

TABLE DES MATIERES.....	412
--------------------------------	------------

TABLE DES ENCARTS.....	421
-------------------------------	------------

TABLE DES FIGURES.....	422
-------------------------------	------------

TABLE DES GRAPHIQUES.....	425
----------------------------------	------------

TABLE DES TABLEAUX.....	427
--------------------------------	------------

TABLE DES PHOTOGRAPHIES.....	429
-------------------------------------	------------

TABLE DES CARTES.....	430
------------------------------	------------

TABLE DES ANNEXES.....	431
-------------------------------	------------

ANNEXES.....	432
---------------------	------------

INTRODUCTION

I. Thématique de recherche

Les versants à éboulis du massif de la Grande Chartreuse, situés au pied des grands escarpements de calcaire urgonien, constituent des unités paysagères remarquables pour une moyenne montagne tempérée et humide où la forêt domine. Les versants actuels sont le reflet de plusieurs siècles d'évolution. Dans leur partie asylvatique, entre 1500 et 2000 m, ils se présentent sous la forme de **mosaïques paysagères biorhexistasiques** qui résultent de l'interaction des **dynamiques naturelles** et des **activités anthropiques** génératrices d'ouverture et d'hétérogénéité des milieux. Ces milieux maintenus ouverts correspondent à des modelés hérités ou encore fonctionnels : corniches régularisées à ressauts, talus d'éboulis et formes associées (couloirs avalancheux, ravines, chaos de blocs...), caractérisés par une géodynamique particulière et une intéressante biodiversité (ARQUES, 1999; ARQUES et ROVERA, 2000; ARQUES *et al.*, 2001, ARQUES *et al.*, 2003).

La diversité spécifique et écosystémique des talus d'éboulis est, en partie, liée à la structure paysagère en mosaïque dont la dynamique est régie par l'interaction des facteurs topoclimatiques, édaphiques et géodynamiques agissant à plusieurs échelles spatio-temporelles. Ce sont des écosystèmes-clés pour la richesse végétale en terme d'habitat comme le précise la Directive Natura 2000 « Habitats, faune, flore », dans laquelle les « falaises, éboulis et grottes » constituent l'un des cinq grands types d'habitat prioritaire. Par ailleurs, de nombreuses espèces rupicoles figurent dans le Livre Rouge (1995)¹ ce qui confirme l'intérêt de connaître l'évolution de la biodiversité des talus d'éboulis et d'évaluer les difficultés que cela pourrait soulever en terme de gestion. Dans le massif, certains talus d'éboulis ont fait récemment l'objet de mesures de protection grâce à la mise en place de la Réserve Naturelle des Hauts, intégrée dans le Parc Naturel Régional de Chartreuse.

La colonisation végétale, en particulier ligneuse, constatée sur les talus d'éboulis au cours du siècle dernier, pourrait être à l'origine d'une modification de la biodiversité actuelle de ces écosystèmes. Cela s'explique d'une part, par la déprise sylvo-pastorale et, d'autre part, par un ralentissement de l'intensité et/ou de la fréquence des processus nivéo-périglaciaires, lié au réchauffement climatique. Ces phénomènes provoquent des changements de dynamiques au sein des mosaïques et favorisent la colonisation végétale pionnière et forestière, ce qui pourrait constituer une « menace » pour certaines espèces rupicoles (ARQUES *et al.*, 2003; LAURENT, 2004). Ainsi, ces mosaïques présentent un grand intérêt pour les scientifiques et les aménageurs qui s'intéressent à l'évolution de ce patrimoine paysager. Se pose alors la question de la gestion durable de ces habitats sensibles situés au sein d'espaces protégés, et dont certains subissent, de plus, des impacts récents liés à la fréquentation touristique.

II. Hypothèses et objectifs

Les écosystèmes de montagne, souvent caractérisés par une biodiversité et un taux d'endémisme élevés (OZENDA, 1985; CHAPIN et KÖRNER, 1994, BENISTON, 2003a) sont composés d'espèces, souvent, hautement spécialisées mais à faible pouvoir compétitif qui poussent près de leurs limites de tolérance par rapport à certains facteurs du milieu.

¹ Flore menacée de France, espèces prioritaires.

La végétation de montagne devrait, par conséquent, être très sensible aux changements environnementaux (DI CASTRI *et al.*, 1988; CANNELL *et al.*, 1989; OZENDA et BOREL, 1991; HANSEN *et al.*, 1992; HOLTEN et CAREY, 1992; GUI SAN *et al.*, 1995; DIDIER et BRUN, 1998; BENISTON, 2003a).

Dans le massif de la Chartreuse, entre 1500 et 2000 m, dans l'étage infra-périglacière, la dynamique de la végétation est sous la dépendance des conditions climatiques et de la pression anthropique auxquelles s'ajoutent, pour les zones soumises à l'érosion nivéo-périglacière, les contraintes liées au fonctionnement morphogénique des versants.

En Chartreuse, depuis la fin du XIX^{ème} siècle et surtout depuis les années 1950, le déclin du sylvo-pastoralisme a été particulièrement ressenti dans cette tranche d'altitude où sont situés, les pâturages des étages bioclimatiques du montagnard et du subalpin inférieurs.

Ici, dans l'étage infra-périglacière, les processus nivéo-périglaciaires se révèlent être extrêmement sensibles aux fluctuations climatiques. La température contrôle en partie l'activité de ces processus dans la mesure où elle conditionne également la nature des précipitations. Les variabilités climatiques, même de faible ampleur (0,5 °C; 1 °C), auront ici plus d'impacts qu'à l'étage glaciaire où la température est franchement négative, ou inversement, à plus faible altitude, où la température est nettement positive (JOMELLI, 2000). Le réchauffement climatique des dernières décennies, à la fois par son action directe sur la dynamique des végétaux et par son intervention sur l'efficacité des processus d'érosion nivéo-périglaciaires, qui entretiennent la rhexistase sur éboulis, pourrait être à l'origine de l'amorce de colonisation végétale observée.

Finalement, deux des principaux paramètres qui conditionnent l'équilibre phytomorphodynamique des versants ont subi des modifications importantes qui devraient se traduire par une évolution de cet équilibre (CORONA et ARQUES, 2002). On peut dès lors légitimement s'interroger sur le rôle des changements environnementaux (anthropique et climatique) dans la modification des mosaïques paysagères constatée depuis le début du XX^{ème} siècle et ses impacts futurs sur la biodiversité. Si cette évolution traduit une amorce de fermeture forestière des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis, et si le processus se poursuit, il pourrait être à l'origine d'une modification de la diversité végétale. Celle-ci devrait se manifester par une régression des phytomorphosystèmes et une disparition probable de certaines espèces rupicoles, notamment patrimoniales, à la faveur d'une homogénéisation forestière. En effet, à la différence de ce que l'on peut prévoir pour les grands versants des Alpes (OZENDA et BOREL, 1991; GUI SAN *et al.*, 1995, BENISTON, 2003a; BENISTON, 2004), en Chartreuse, un déplacement des espèces est limité par la géomorphologie du massif qui rend impossible un décalage en altitude des phytomorphosystèmes établis au pied des escarpements urgoniens.

Dans ce contexte, l'hypothèse principale à valider est que la réduction de la pression sylvo-pastorale et le réchauffement climatique récent, sont à l'origine d'une colonisation végétale, ligneuse et herbacée, des talus d'éboulis du massif de la Grande Chartreuse. Cette tendance biostasique pourrait, à terme, modifier considérablement, la structure, le fonctionnement et l'évolution des mosaïques biorhexistasiques, créatrices de biodiversité à l'échelle des talus d'éboulis.

La recherche proposée vise donc à **acquérir une connaissance approfondie des caractéristiques géo-écologiques et des dynamiques naturelles et/ou anthropiques qui animent ces mosaïques paysagères originales depuis le début du siècle dernier.**

Nous tenterons :

- de **développer une typologie des mosaïques biorhexistasiques** qui prenne en compte l'hétérogénéité des talus d'éboulis (structures biorhexistasiques à fonctionnement divers) ainsi que la nature pluriscalaire des systèmes écologiques et qui permette une hiérarchisation des facteurs explicatifs de ces structures à l'échelle du massif puis de quelques talus d'éboulis représentatifs;
- d'établir **les interrelations qui existent entre ces milieux à fonctionnement géodynamique diversifié et la biodiversité**;
- et enfin, **d'identifier et de distinguer le rôle de l'homme et du changement climatique dans les différents stades d'évolution des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis, dans une optique à la fois conservatoire et de gestion appliquée.**

III. Intérêt et portée scientifiques des résultats

Ainsi, ce sujet, et surtout le terrain d'application choisi, ne sont pas marginaux. Les talus d'éboulis constituent des écosystèmes-sentinelles sensibles et les resituer dans une thématique plus vaste, comme celle de la transformation des paysages d'altitude, leur confère tout leur intérêt et les replace au centre des préoccupations socio-économiques et scientifiques. Dans les Alpes, la connaissance de la biodiversité et de son évolution, liée au déclin agro-sylvo-pastoral (DELCROS, 1993; BRUN *et al.*, 1995; FELTGEN DIDIER, 1998; VANPEENE BRUHIER, 1998; ANTHELME *et al.*, 2003) mais surtout aux fluctuations climatiques, constituent une des préoccupations actuelles de la communauté scientifique (OZENDA et BOREL, 1991; KÖRNER, 1992; CHAPIN et KÖRNER, 1994; GUISAN *et al.*, 1995; BENISTON *et al.*, 1996; FELTGEN DIDIER, 1998, FELTGEN DIDIER et BRUN, 1998; JOMELLI, 2000). Dans cette quête, qui intéresse de nombreux champs disciplinaires, chacun recherche des sites intégrateurs et révélateurs des changements en cours. *In situ*, toutes les échelles spatio-temporelles sont concernées. Nous avons choisi les talus d'éboulis du massif de la Chartreuse.

Malgré leur altitude moyenne, entre 1500 et 1800 m seulement, ces versants à éboulis asylvatiques correspondent à une « zone de combat » à déterminisme édaphique et morphoclimatique située à l'interface des étages bioclimatiques du montagnard supérieur et du subalpin inférieur. Les talus d'éboulis vifs actuels constituent des milieux ouverts, de petites surfaces, délimités en amont par de grands escarpements de calcaire urgonien et, en aval, par l'écosystème forestier. Cette configuration particulière en fait des milieux privilégiés où l'on peut observer simultanément, les effets de la déprise sylvo-pastorale et, dans le cas d'un réchauffement climatique, l'influence du climat sur le minéral et le végétal. Cela révèle l'intérêt d'une étude de ces habitats qui pourraient constituer des observatoires privilégiés pour le suivi à long terme de l'évolution de la biodiversité sous l'effet des changements environnementaux en cours.

IV. Plan de la thèse

Ce travail s'articule en trois parties. La première partie est consacrée à une synthèse bibliographique et à la présentation du terrain d'étude, la deuxième partie est méthodologique et la troisième partie expose et discute les résultats.

I. La synthèse bibliographique

Le premier chapitre dresse un état des connaissances sur les études consacrées aux talus d'éboulis en géomorphologie, phytosociologie et écologie. Un deuxième point abordera les changements environnementaux en montagne et notamment les effets du réchauffement climatique sur les processus morphogéniques et la végétation.

Le deuxième chapitre expose les bases théoriques sur lesquelles se fonde notre approche géo-écologique des mosaïques biorhexistatiques des talus d'éboulis. Il sera question notamment de la théorie de la biorhexistatie, de l'écologie du paysage et du concept de biodiversité.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation du terrain d'étude. Il présente notamment un historique de l'évolution du climat et de l'utilisation des sols sur les talus d'éboulis en Chartreuse.

II. Méthodologie

Le quatrième chapitre développe la démarche utilisée pour l'analyse de la structure et de la dynamique des mosaïques biorhexistatiques. L'étude phyto-morphologique repose sur une analyse systémique et une approche pluriscalaire à quatre niveaux hiérarchiques. Les outils utilisés à l'échelle des écosystèmes sont présentés.

Le cinquième chapitre s'attache à définir les protocoles d'étude et les descripteurs utilisés à l'échelle de la station et de la parcelle.

III. Les résultats

Le sixième chapitre est consacré à l'analyse spatiale et phyto-morphologique des mosaïques biorhexistatiques d'éboulis. Elle est complétée par une étude de leur dynamique végétale au cours du siècle dernier.

Le septième chapitre tente de mettre en évidence une typologie fonctionnelle des mosaïques biorhexistatiques d'éboulis. La méthodologie utilisée repose sur une analyse phyto-écologique.

Le dernier chapitre repose sur une modélisation biomorphoclimatique. Elle constitue une contribution à la validation du réchauffement climatique dans l'étage infra-périglaciaire.

Enfin, la conclusion met l'accent sur l'intérêt du suivi à long terme des mosaïques biorhexistatiques d'éboulis et la nécessité d'une gestion ponctuelle et appliquée.

PREMIERE PARTIE

Les talus d'éboulis semi-végétalisés de moyenne montagne : cadre théorique et terrain d'application

Chapitre 1 : L'état des connaissances

- I. Les éboulis : études géomorphologiques, phytosociologiques et écologiques
- II. Eboulis et terminologies
- III. Les changements environnementaux en montagne

Chapitre 2 : Les bases théoriques pour une étude géo-écologique des talus d'éboulis et de leur évolution dynamique

- I. La théorie de la biorhexistase
- II. Les apports de l'écologie du paysage
- III. La biodiversité : un concept omniprésent, complexe et dynamique

Chapitre 3 : Le terrain d'application : le massif de la Grande Chartreuse (Parc Naturel Régional et Réserve Naturelle des Hauts)

- I. Localisation du terrain d'étude
- II. Géomorphologie structurale et géomorphologie dynamique externe
- III. Un climat de moyenne montagne humide et fraîche
- IV. Des conditions bioclimatiques favorables à la dynamique végétale
- V. Les conséquences du déclin agro-sylvo-pastoral sur l'évolution de l'utilisation du sol des « hauts » de versant

CHAPITRE 1

L'état des connaissances

Ce chapitre dresse un bilan des connaissances sur les travaux géomorphologiques, écologiques et phytosociologiques consacrés aux talus d'éboulis. Un deuxième point abordera les changements environnementaux en montagne et notamment les effets du réchauffement climatique sur les processus morphogéniques et la végétation. Enfin, le terrain d'étude sera présenté sous l'angle de ses relations avec la géomorphologie, la végétation, le climat et l'anthropisation.

I. Les talus d'éboulis : études géomorphologiques, phytosociologiques et écologiques

L'étude de la dynamique actuelle des versants connaît un regain d'intérêt en géographie. Notre étude s'inscrit dans le prolongement de nombreux travaux consacrés aux éboulis et autres formations de pente, réalisés à différentes latitudes et altitudes. Dans les Alpes, l'intérêt s'est porté sur les talus d'éboulis de haute montagne, se limitant à une approche essentiellement géomorphologique. Les études géomorphologiques, botaniques et écologiques ont, pendant de nombreuses années, essentiellement progressé sur des chemins opposés.

1.1. Les apports de la géomorphologie

Cette synthèse s'inscrit dans la continuité du travail réalisé par FRANCOU et HETU (1989). Elle n'a pas la prétention d'être exhaustive. Dans le cadre de notre sujet, il nous est apparu important d'axer cette synthèse sur un aspect plus rarement abordé : les relations végétation/substrat sur talus d'éboulis (géomorphologie/géodynamique/végétation).

Depuis la fin du XIX^{ème} siècle, de nombreuses études ont été consacrées aux mouvements superficiels et à la morphologie des matériaux sur les versants à éboulis. Les premières notes datent de 1887 (THOULET) et 1888 (DAVISON). Depuis, les travaux se sont multipliés.

Les premiers travaux ont été consacrés à la définition de la structure et de la morphométrie des dépôts et des formes (DAVEAU, 1958; HAMELIN, 1958; RAPP, 1960; TRICART, 1967; CARNIEL, 1974; STATHAM, 1976a; FRANCOU, 1977, 1981, 1983, 1988, 1990; ALBJAR *et al*, 1979; HETU, 1986; PEREZ, 1986, 1989; FRANCOU et MANTE, 1990; HETU *et al*, 1994; PEREZ, 1998; JOMELLI, 1999; PECH, 2000) permettant ainsi d'affiner la terminologie géomorphologique des talus d'éboulis et autres formations de pente hétérométriques et de préciser les conditions de mise en place. Ces travaux ont permis de mettre en évidence des modèles de fonctionnement des versants à éboulis qui constituent des références aujourd'hui (VAN BURKALOW, 1945; KING, 1956; CAINE, 1968; KIRKBY et STATHAM, 1975; STATHAM, 1976; FRANCOU, 1981, 1988; LUCKMAN, 1988). D'autres ont suivi, s'intéressant plus particulièrement aux processus et aux dynamiques qui contribuent à leur mise en place (SCHEIDEGGER, 1961; GARDNER, 1970; STATHAM, 1973; KIRBY et STATHAM, 1975; FRANCOU, 1983; HETU, 1986; HETU et VANDELAC, 1989). L'intérêt s'est porté sur les dynamiques d'alimentation des versants à éboulis et notamment sur la mise en place des matériaux lors du transfert corniche/talus d'éboulis (GARDNER, 1970, 1980; KIRKBY et

STATHAM, 1975; FRANCOU, 1982). Puis, sur la phase de réorganisation des matériaux (RAPP, 1960; CAINE, 1969; CARSON, 1977; LUCKMAN, 1988).

Des études plus spécifiques ont été consacrées aux chutes de pierres (FRANCOU, 1982; WHALLEY, 1984; ANDRE, 1988) et notamment à la gélifraction (MALAURIE, 1960; BERTOUILLE, 1976, ALLEE, 1983; ROVERA, 1997); à la définition des angles caractéristiques et des modèles de fonctionnement des éboulis (VAN BURKALOW, 1945; CAINE 1963, 1968; KIRBY et STATHAM, 1975, 1976a, 1977; CARSON, 1977; HETU, 1986; FRANCOU, 1988) et enfin à la modélisation de leur mobilité (CAILLEUX, 1947; MICHAUD et CAILLEUX, 1950; RAPP, 1960; CAINE, 1963, 1969; MALAURIE, 1968; GARDNER, 1969; PISSART, 1972, 1981; LUCKMAN, 1978; GARDNER, 1979; LOUGHRAN et LOUGHRAN, 1979; HETU, 1986; PEREZ, 1985, 1988, FRANCOU, 1988, 1991).

Ces différents travaux ont permis d'établir une classification des talus d'éboulis en fonction des formes perceptibles et des mécanismes présidant à leur genèse et à leur fonctionnement (FRANCOU et HETU, 1989). Cependant, si leur étude d'un point de vue géomorphologique est largement documentée, des difficultés apparaissent lorsque l'on veut conjointement aborder les relations géomorphologie/végétation d'un point de vue statique et/ou dynamique. Beaucoup l'on occulté, ce que nous comprenons car en montagne et surtout en haute montagne, le paysage est dominé par des formes d'érosion et la végétation intervient souvent pour une faible part dans l'évolution des petits modelés. Cependant, nous nous rangerons à l'avis de SOUTADE (1980) qui souligne qu'une observation sommaire conduit facilement à la conclusion que le modelé est fonctionnel, lorsqu'il n'a pas été mis entièrement « sous scellé » par les plantes. Selon le même principe, une forme à recouvrement végétal élevé peut être déclarée à tort non fonctionnelle, puisqu'en apparence elle évoque un état de repos (biostasie). Dans la littérature géographique, les exemples sont nombreux d'une telle vision manichéenne des faits mais dans la réalité, les choses sont bien plus complexes. « Rien ne ressemble plus à un éboulis mobile qu'un éboulis stabilisé » (SOUTADE, 1980). On pourrait trouver cette citation un peu « exagérée ». Certes ! Cependant, nous le verrons plus loin en Chartreuse, même dans le cas de talus d'éboulis extrêmement végétalisés (50 à 75% de la surface), les dynamiques érosives sont assez fortes notamment dans les zones supérieures constituées de matériaux fins.

1.2. Les apports de la botanique

Les botanistes qui ont parcouru les grands massifs montagneux des Alpes, d'Europe et du monde, se sont souvent intéressés à la végétation spécialisée des versants à éboulis. BEAUDIERE (1983), dans un article consacré aux modes de perception de l'éboulis par les botanistes, reconnaissait schématiquement trois courants dans l'histoire de la prospection botanique des éboulis : le courant naturaliste, le courant phytosociologique et le courant géomorphologique.

1.2.1. Le courant naturaliste

La démarche naturaliste s'est opérée entre la deuxième partie du XIX^{ème} siècle et le tout début du XX^{ème} siècle. De nombreuses propositions de classification des végétaux ont alors été avancées, révélant de ce fait les prémices de l'autécologie des espèces. Dans ce contexte, la végétation des éboulis² ne pouvait pas laisser indifférent. Ainsi, OETTLI en 1905 (*in* HARSHBERGER, 1929), dans un ouvrage consacré à l'autécologie de la flore des rochers en Suisse, lui consacre quelques pages. Plus tard, SCHRÖTER (1908) et VAN UFFORD (1909) apporteront, dans ce domaine, une contribution non négligeable dans un premier essai de classification des types écologiques susceptibles de vivre dans les éboulis.

² Pierriers, tas de blocs (sans définition géomorphologique précise).

1.2.2. Le courant phytosociologique

En 1915 paraissait la thèse de J. Braun-Blanquet sur les Cévennes méridionales. On peut considérer que ce fut là le point de départ de la démarche phytosociologique qui, durant des décennies, allait, en Europe centrale et occidentale, guider les botanistes de terrain.

Les études entreprises sur les milieux d'éboulis³ furent dès lors consacrées à l'analyse de la végétation par le biais de l'approche phytocénologique. Les monographies se sont multipliées. RÜBEL (1912 *in* HARSHBERGER, 1929), dans une monographie consacrée aux formations végétales de la région des Alpes bernoises consacre 14 pages à la végétation des éboulis en haute montagne suisse. Il confirme l'existence des groupes écologiques mis en évidence par SCHRÖTER (1908) et insiste sur le fait que les conditions climatiques contraignent les espèces d'éboulis à vivre dans les zones sub-nivale et nivale des montagnes. En 1916, AMBERG consacre deux pages à une description de la végétation des éboulis subalpins. Il engage une discussion sur les adaptations physiologiques des espèces en relation avec les conditions environnementales locales. Dans un ouvrage consacré à l'écologie des plantes et notamment à l'étude des communautés végétales, WARMING et GRAEBNER (1918) font le point sur les conditions écologiques dans lesquelles se développent les espèces d'éboulis. Dans une seconde édition du même ouvrage en 1925, WARMING et VAHL caractérisent les formations végétales associées aux blocailles et gros blocs. Ils insistent sur le fait que deux formations végétales caractéristiques se développent sur éboulis : les espèces lithophiles sur les pierres et celles qui poussent sur matériaux fins. D'autres monographies consacrées à l'inventaire des associations d'éboulis sont réalisées en Suisse, en 1918 (BÄR), 1921 (LÜDI) et 1922 (FREY). Elles sont accompagnées de diverses illustrations et notamment des cartes au 1 :50 000. Au même moment, TANSLEY (1911), COOPER (1916), WEAVER (1919) et LEACH (1930) s'intéressent à la dynamique des éboulis et considèrent que la stabilité des éboulis est un facteur fondamental qui conditionne l'établissement et le développement des plantes.

L'étude la plus détaillée, consacrée aux caractéristiques édaphiques des éboulis, est certainement celle réalisée par SCHRÖTER en 1925. Il prend en compte les conditions abiotiques qui influencent le développement des espèces d'éboulis et la diversité des formes d'adaptation des végétaux dans ces milieux. Il s'intéresse aux caractères physiques des habitats d'éboulis et notamment à l'environnement géomorphologique des plantes. Il réalise un granoclassement des matériaux :

- blocs (plus de 25 cm de diamètre);
- gros cailloux (de 2 à 25 cm de diamètre);
- petits cailloux (de 2 mm à 2 cm de diamètre);
- sable et argile.

Il propose ensuite une classification des végétaux d'éboulis et des lithophytes en général en s'intéressant aux appareils racinaires et à leurs relations avec le substrat :

- Le sol dans lequel les racines se développent est recouvert d'une couche de matériaux fins à texture aérée. Cela contribue à maintenir de bonnes conditions d'humidité.
- L'horizon du sol qui accueille les racines n'est pas continu mais il est parsemé de fragments rocheux.
- Les éboulis ne sont pas secs, l'eau issue de la fonte des neiges et de la pluie est retenue.

³ Pierriers, tas de blocs (sans définition géomorphologique précise).

- La mobilité des matériaux d'éboulis est une de leurs principales caractéristiques. Celle-ci est due à la neige, la pluie, les avalanches, les écroulements, etc.
- Les facteurs qui influencent le développement des plantes sur éboulis sont l'altitude, l'exposition et la corniche. Toute modification est suivie d'un changement dans les associations végétales. Nous ajoutons aussi à ces facteurs la nécessité de prendre en compte la dynamique érosive.

SCHRÖTER (1908) distingue cinq « types écologiques » d'éboulis (*in* HARSHBERGER, 1929) : (1 : Schuttwanderer (scree-wanderers); (2 : Schuttüberkriecher (scree-creepers or trailers); (3 : Schuttstrecker (scree-stretchers); (4 : Schuttdecker (scree-coverers); (5 : Schuttstauer (scree-dammers or bankers). VAN UFFORD (1909), dans une thèse présentée à la faculté des Sciences de l'Université de Lausanne, considère qu'il est difficile de distinguer nettement les types 2, 3, 4 et 5 de SCHRÖTER et propose la classification suivante :

-**les lithophiles migrants** (Schuttwanderer), dont les stolons hypogés ou épigés parcourent le pierrier, le plus souvent parallèlement à la surface; ils peuvent s'enraciner aux nœuds (...). Les stolons radicans constituent le caractère essentiel de ce groupe;

-**les lithophiles recouvreurs** (Schuttüberkriecher et Schuttdecker), dont les rejets épigés s'étalent à la surface du pierrier. Ces rejets partent d'un seul point ou de divers points de la souche;

-**les lithophiles ascendants** (Schuttstrecker et Schuttstauer), dont les rejets émis par la souche hypogée percent la couche détritique et forment des pousses feuillées dressées.

S'appuyant sur la classification de SCHRÖTER, HARSHBERGER (1929) réalise au cours des étés 1925 et 1926 un inventaire des espèces d'éboulis des Rocheuses Canadiennes et du Mont Rainier. Quelques observations supplémentaires sont réalisées dans la Sierra Nevada (Californie).

La production scientifique du début du XX^{ème} siècle a été fructueuse mais rapidement, en fonction de l'accroissement des connaissances acquises, le synsystème phytosociologique s'élaborait et, pour les milieux d'éboulis comme pour les autres, le concept floristique basé sur la notion d'espèce caractéristique et la systématisation des associations végétales prenait le pas sur le concept écologique. La porte entrouverte par SCHRÖTER et VAN UFFORD se refermait pour un temps.

1.3. Le courant actuel : la géomorphologie « naturaliste »

L'intérêt de la prise en compte des relations entre la végétation et son modelé support n'est arrivé que tardivement. Comme le souligne SOUTADE (1980), notre façon de penser n'aurait jamais été ce qu'elle est si cette voie, oubliée pendant des décennies, n'avait été redécouverte par ROUGERIE (1960, 1967) : « *La préoccupation constante a été de considérer le milieu choisi comme un monde vivant* »; TRICART (1962) : « *La nature est un tissu d'interactions...* »; et BERTRAND (1966) « *On a l'impression que la question des rapports entre le tapis végétal et la morphogenèse des versants n'a jamais été réellement posée* ». Les premières études furent d'abord descriptives puis cédèrent rapidement la place à des tentatives de compréhension des versants. Dans les années 60 et surtout à partir des années 70, de nombreux chercheurs ont œuvré en coopération autour de G. SOUTADE, G. JALLUT et A. BAUDIERE dans un contexte transdisciplinaire mettant en œuvre les méthodes de la géomorphologie, de la pédologie, de la palynologie et de l'approche phytocénologique du peuplement végétal. SOUTADE et BAUDIERE se sont intéressés, dans une étude consacrée aux hauts versants septentrionaux de la Sierra Nevada andalouse (1970), à l'étude des relations susceptibles d'exister entre la végétation et son modelé support et, par voie de conséquence, aux relations dynamiques entre végétal et minéral.

Trois types de relations ont été mises en évidence :

- la végétation crée le modelé;
- végétal et minéral participent conjointement à la mise en place du modelé;
- le végétal n'intervient que pour souligner les irrégularités du modelé.

Il convient de souligner que ces relations diffèrent en fonction de la lithologie et de l'échelle d'observation. En général, cela s'applique plutôt à de petits modelés.

Ils attribuent au diptyque végétation-modelé le rôle de marqueur bio-géomorphologique. C'est sur cette approche que repose l'interprétation de l'évolution des systèmes phyto-géomorphologiques et phyto-morphogéniques de BAUDIERE et SOUTADE (1985) ou des phytomorphosystèmes de ROVERA (1990) et PECH (1993, 1995b). Et c'est dans cette continuité que s'inscrit notre recherche (ARQUES *et al.*, 2003).

Les travaux de BAUDIERE et BONNET (1963), NEGRE (1968), BAUDIERE et SERVE (1971), SOUTADE (1972, 1975, 1976, 1980), SOMSON (1983), NOBLE (1985), SOMSON et BAUDIERE (1986) sur la végétation des éboulis dans les Pyrénées ou la Sierra Nevada, de GAUQUELIN (1982) dans les montagnes du bassin occidental de la Méditerranée, de RITTER (1976) dans les Alpes et de QUEZEL (1957) en Afrique du Nord prennent en considération la nature et la forme du modelé support.

Progressivement, les recherches se sont orientées sur l'étude de la dynamique des éboulis, pris en tant que milieu, défini par ses composantes climatiques, édaphiques et biologiques délaissant partiellement la systématisation des associations végétales.

Ainsi, les premières études se sont intéressées au rôle de l'exposition dans l'installation et le développement des plantes sur éboulis (DAUBENMIRE et SLIPP, 1943). Puis, l'intérêt s'est rapidement orienté vers la définition des caractéristiques édaphiques des éboulis et notamment sur les conditions d'humidité (LAMB et CHAPMAN, 1943; WARDLE, 1972; McCUNE, 1977; LEE et HEWITT, 1982; PEREZ, 1987; PEREZ, 1991, 1995, 1998).

Dans le prolongement des travaux réalisés par TANSLEY (1911), COOPER (1916), WEAVER (1919) et LEACH (1930) de nombreux chercheurs se sont intéressés à l'écologie des talus d'éboulis et notamment à la dynamique différentielle, en terme de variabilité spatiale des mouvements de matériaux (stabilité/instabilité), qui influence l'installation et la répartition des plantes sur éboulis (FISHER, 1952; WARREN WILSON, 1952; COE, 1967; ATKINSON, 1972; WARDLE, 1972; McCUNE, 1977; LEE et HEWITT, 1982; KERSHAW et GARDNER, 1986; PEREZ, 1994). Inversement, d'autres se sont attachés à étudier l'influence des végétaux sur la dynamique des matériaux. Ainsi, BELL et BLISS (1973) ont montré, à l'issue de trois années de mesures dans la péninsule Olympique (États-Unis), que les mouvements sur éboulis étaient 30% plus rapides sur les zones dénudées que sur les langues végétalisées et en ont conclu qu'ils étaient influencés par la présence de la végétation. Cette idée a été rapidement abandonnée par les écologistes mais elle est restée très répandue chez les géomorphologues (BEHRE, 1933; SIGAFOOS, 1951; SMITH, 1956; RAHN, 1969), qui ont souvent utilisé la présence végétale comme indicateur de stabilité ou de processus géodynamiques (BRYAN, 1923; KERSHAW et GARDNER, 1986; PEREZ, 1998, BERTRAN et TEXIER, 1999). Aucune preuve n'a jamais été apportée sur cette supposée relation de « cause à effet »... Cependant, contrairement aux botanistes, il semble qu'en Sciences de la Vie et de la Terre on adhère toujours à l'idée que la stabilité de certains éboulis est due à la présence de la végétation.

Fortes de cet héritage, depuis une quinzaine d'années, les recherches géomorphologiques et biogéographiques concernant les formes et formations de pentes se sont orientées vers la prise en compte des changements environnementaux. Parallèlement à l'identification des processus qui ont contribué à leur mise en place, de nombreux travaux cherchent à replacer les variations de leur dynamique dans le temps, et notamment depuis la fin du Petit Age Glaciaire (vers 1850), grâce à différentes méthodes de datation (lichénométrie, silénométrie, dendrochronologie, ¹⁴ C). Dans ces reconstitutions environnementales, notamment sur talus d'éboulis, les végétaux sont utilisés comme des indicateurs temporels fiables (HETU, 1990; LAFORTUNE *et al.*, 1997; HETU et GRAY, 2000, JOMELLI, 2000). Pour la période contemporaine (depuis le XIX^{ème} siècle), ces méthodes de datation sont couplées à des approches diachroniques de l'évolution végétale des formes basées sur l'utilisation de la géo-iconographie disponible (cadastre, photographies anciennes, photographies aériennes...).

C'est en partie dans cet esprit que nous avons abordé l'étude des mosaïques biorhexistatiques des talus d'éboulis du massif de la Chartreuse. Notre travail est notamment consacré à une évaluation de la diversité végétale et de son évolution, en fonction de la variété des dynamiques géomorphologiques et végétales observées, sur talus d'éboulis en moyenne montagne forestière. Nous ne considérons plus, comme nos prédécesseurs, les éboulis comme de simples écosystèmes, mais comme des « réservoirs potentiels » de biodiversité qui en font des écosystèmes particuliers. Ce patrimoine biologique semble être tributaire des changements environnementaux.

II. Eboulis et terminologies

L'objectif de ce paragraphe est de positionner notre recherche, dans le massif de la Chartreuse, au regard des connaissances acquises sur la terminologie des éboulis, en s'intéressant plus particulièrement aux processus contribuant à leur mise en place, aux formes qui en résultent et aux caractéristiques particulières des talus d'éboulis semi-végétalisés de l'étage infra-périglacière. Ces paragraphes n'ont pas la prétention d'être exhaustifs et de nombreux aspects ne seront pas développés, entre autres, ceux relatifs aux principes d'équilibre des versants en roche dure, à l'action de la pesanteur, à l'angle de frottement sur paroi, la rugosité fissurale et la pression hydrostatique. Nous renvoyons pour cela aux nombreux travaux réalisés et aux auteurs spécialisés cités dans le paragraphe précédent et notamment aux travaux de CAINE (1963), KIRKBY et STATHAM (1975), CARSON (1977), STATHAM (1977), ANTOINE et FABRE (1980), BIROT (1981), SELBY (1982) et FRANCOU (1988).

2.1. Les phases d'évolution du géosystème corniche-talus d'éboulis : éboulisation et processus morphoclimatiques

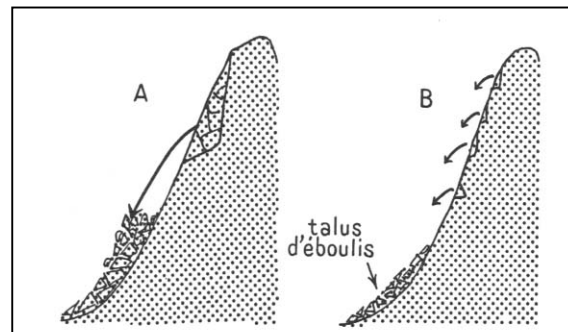
2.1.1. Eboulisation et processus morphoclimatiques

Sous l'effet de diverses contraintes, mais surtout sous l'action de la gravité, les versants libèrent des débris rocheux qui s'accumulent à leur base pour former le talus d'éboulis. Selon la masse mobilisée, le temps d'accumulation et les agents d'érosion intervenant on oppose classiquement les processus d'éboulement ou écroulement (DERRUAU, 1974; THOURET, 1980; KAYSER, 1983) et d'éboulisation (Figure 1). Ces processus ont conjointement participé à la mise en place des talus d'éboulis dans le massif de la Chartreuse, les écoulements et les éboulements jalonnant les étapes de la construction des éboulis, mais nous nous intéresserons ici surtout au processus d'éboulisation.

Figure 1 : Le processus d'éboulisation (d'après DERRUAU (1974)

A : Ecroulement : chute simultanée d'une portion de versant qui se détache en masse sur un flanc abrupt et laisse dans la corniche une niche d'arrachement.

B : l'éboulisation : phénomène lent, dû au détachement successif de blocs rocheux, « un à un ».



Créé par VAUMAS (1964) puis repris par BIROT (1981), le terme d'éboulisation désigne l'ensemble des processus et des mécanismes par lesquels se construit l'éboulis. La destruction mécanique des corniches est imputable aux processus d'éboulisation : « L'éboulisation désigne le processus ou l'ensemble des processus conduisant à la construction progressive de l'éboulis. Par rapport à l'éboulement, il y a l'intervention du facteur temps et la notion d'une mise en place en plusieurs étapes de l'accumulation détritique dont la forme en cône ou tablier et le triage des matériaux en sont les témoins » (ROVERA, 1990).

En fonction du calibre, du volume des matériaux et de la récurrence du processus, nous proposons la distinction suivante :

-l'écroulement : le volume des matériaux est $> \text{au m}^3$, la chute est exceptionnelle;

-l'éboulement : les matériaux sont de l'ordre du $\frac{1}{2}$ ou du m^3 , le processus s'effectue sur un pas de temps pluri-annuel voir décennal;

-l'éboulisation : les matériaux sont plutôt fins, voir très fins et l'alimentation est annuelle ou intra-annuelle.

FRANCOU (1988) lui donne un sens plus élargi où le couple corniche-talus d'éboulis est considéré comme un système morphogénique. Il est nécessaire de s'intéresser à toute la chaîne des mécanismes qui part du démantèlement de la corniche, se poursuit par le transfert des matériaux vers l'éboulis pour aboutir à l'édification et à l'évolution du talus (processus post-dépositionnels) : « *Dans la mesure où l'éboulis est morphologiquement sous l'étroite dépendance du flux de matière qu'il reçoit de la corniche et de celui qu'il concède éventuellement à l'aval, il peut difficilement être étudié isolément, comme s'il n'était qu'un élément d'une somme* » (FRANCOU, 1988).

Avant l'intervention des processus d'éboulisation, il est nécessaire que les roches résistantes aient été préparées par la météorisation. Selon ROVERA (1990), l'éboulisation regroupe exclusivement les processus d'érosion climatiques agissant au niveau de la corniche ou du talus d'éboulis et capables de provoquer un déplacement de matière, même minime (précipitation, saturation hydrique, avalanches...). Elle succède ainsi à la météorisation qui se traduit seulement par une fragmentation de la roche sans en désolidariser totalement les éléments et en assurer le transit. L'éboulisation va donc assurer le transfert des matériaux de la paroi vers le talus, cependant, on distingue en général la chute proprement dite du matériel et le transfert.

A la suite des travaux menés par FRANCOU (1988) et ROVERA (1990), dans une étude consacrée à la géomorphologie dynamique des versants en Chartreuse méridionale, POULIN (1994) distingue :

- l'éboulisation primaire, périglaciaire : elle concerne la mobilisation des débris à partir d'une paroi préalablement préparée par la météorisation, ces débris sont déposés au pied de la paroi, sur vire (s) graveleuse (s), dans un couloir ou directement sur le talus d'éboulis;

- l'éboulisation secondaire, gravitaire : désigne la remobilisation des débris des vires ou du couloir sous l'effet de processus morphoclimatiques ou simplement par décharge de la vire lorsqu'elle est pleine. Les débris anguleux s'amassent donc pour former l'éboulis proprement dit. Les processus de transit et de dépôt sont purement gravitaires.

Dans une étude consacrée aux coulées de débris alpines (debris flows) sur éboulis, dans les calcaires du Sénonien (Dévoluy, 2600 m), un processus similaire a été mis en évidence par PECH (2000) qui soulignait le rôle du cône apical dans le déclenchement des coulées de débris. Il indiquait que sans cette accumulation préalable, et même si les conditions météorologiques étaient favorables, la remobilisation des débris ne pouvait se déclencher. Inversement, certaines coulées ne pouvaient se déclencher que lorsque le stock sédimentaire était abondant, et même si les conditions météorologiques n'étaient pas exceptionnelles. Cela correspond à l'apport sommital de CARSON (1977) qui s'effectue périodiquement « par à-coup ». D'après CARSON (1977) les matériaux tombent régulièrement au sommet (apex) et dans la moitié amont (partie proximale) et lorsque l'accumulation atteint l'angle de frottement statique θ_i (θ_{us} pour STATHAM, 1976) survient une coulée sèche qui redistribue le matériel vers l'aval.

Différents processus d'érosion périglaciaires sont à l'origine du processus d'éboulisation ou participent au processus d'éboulisation. Ils agissent au niveau de la roche en place de différentes manières et conduisent à sa fragmentation. Les conditions climatiques jouent un rôle prépondérant dans l'éboulisation primaire. Généralement, on distingue trois principaux facteurs : le vent (impact pneumatique, projection de particules de pluie ou de neige...), la pluie et l'eau de fonte (purge, effet de la pression hydrostastique) et la gélifraction (alternance gel/dégel) ou dégel après une longue et intense période d'engel qui semble intervenir surtout dans la fragmentation de la roche en place (gélidisjonction dans le cas des calcaires). Tous ces facteurs sont associés aux effets permanents de la gravité.

Dans le massif de la Chartreuse, les corniches de calcaire urgonien subissent une éboulisation variable selon la structure de l'interface rocheux (BIROT, 1981) et les conditions de la météorisation à l'échelle microclimatique (ROVERA, 1997). Trois études ont tenté de préciser le rôle de la gélifraction dans l'éboulisation des corniches entre 1600 et 2000 m (POULIN, 1994; GERVAISE, 1997; ROVERA et NATON, 2001). Le suivi et la quantification de la morphodynamique ont été réalisés dans les secteurs les plus favorables à l'éboulisation, c'est-à-dire les abris sous roche et les facettes présentant un faciès de « mosaïque fragmentée ». L'objectif était de déterminer les caractéristiques de la microclimatologie et plus particulièrement le rôle du gel dont l'efficacité varie selon l'exposition, l'humidité de la roche et les plans de faiblesse de l'interface rocheux. ROVERA et NATON (2001) soulignent que c'est la rythmicité saisonnière (hiver-été et entre deux hivers), et non mensuelle ou hebdomadaire, qui révèle l'action des épisodes de gel les plus intenses ou durables. Les conclusions de ces études suggèrent qu'un ralentissement de l'éboulisation durant sa phase périglaciaire (en hiver) est probable lorsque la tendance est au radoucissement des hivers.

ROVERA (1990) et POULIN (1994) soulignent que vis à vis de l'éboulisation, les facteurs biotiques peuvent jouer un rôle non négligeable. Ainsi, l'implantation des arbres au niveau des corniches provoque l'écartement des strates de pénétration en « coin » des racines. Selon ROVERA (1990), il s'agit d'un lent processus de fragmentation, limité au premier mètre de roche. Ce processus de préparation a été observé sur les flancs quartzitiques en Moyenne Tarentaise (ROVERA, 1990), en revanche, ROVERA (1978), POULIN (1994) et GERVAISE (1997) ont constaté les effets du phénomène sur les corniches végétalisées en Chartreuse. Nous rejoignons les auteurs et ajoutons que celui-ci est surtout marqué, en Chartreuse, dans les secteurs colonisés par le pin à crochets (vires, bordure de corniche...).

L'éboulisation est généralement suivie de différentes phases de construction et d'évolution des éboulis.

2.1.2. Les remaniements post-dépositionnels

Les processus de remaniements post-dépositionnels qui s'exercent sur les talus d'éboulis cartusiens⁴, relèvent de processus nivéo-périglaciaires et pluviaux. On distingue trois types de processus (voir aussi, 1.3.2.2., Chapitre 5) :

-l'action de la neige : elle intervient directement sur le glissement et le tassement des matériaux par son poids puis par l'intermédiaire de phénomènes de « creeping » nivaux qui conduisent à des mouvements de débris lorsque la neige cohérente, en se tassant, se déforme et glisse sur le sol dégelé (nivo-reptation). La neige intervient aussi de manière indirecte lors de la fusion nivale (nivo-solifluxion). Elle permet le transport et le déplacement des matériaux de petites tailles par ruissellement épidermique notamment dans les zones proximales, à fines, des talus d'éboulis. Secondairement sont envisagés les processus de remaniements liés aux avalanches, assez rares en Chartreuse depuis une dizaine d'années.

-l'action de la pluie en fonction de sa durée, son intensité et sa fréquence provoque une érosion de rejaillissement des particules causée par l'impact des gouttelettes (FEODOROFF, 1965) et participe au ruissellement épidermique et au transport des matériaux meubles (fins à très fins) notamment dans les zones proximales des talus d'éboulis. Les secteurs à terrassettes, relativement nombreux sur les talus d'éboulis cartusiens sont très sensibles à ce processus.

⁴ De Chartreuse.

-**l'action des processus périglaciaires** : dans cette tranche altitudinale, trois principaux types ont été observés dans les zones proximales des talus d'éboulis, il s'agit du gonflement cryogénique (pipkrakes), de la gélifluxion et de la gélireptation.

Secondairement, on note quelques glissements et déplacements des matériaux liés au passage des animaux (chamois) mais surtout des randonneurs.

2.2. Quelle définition pour le talus d'éboulis nivéo-périglaciaire ?

2.2.1. Le talus d'éboulis : une construction polygénique

2.2.1.1. Généralités

Les éboulis et les formes très variées qui en dérivent ont fait l'objet d'observations nombreuses dans le cadre de recherches géomorphologiques régionales. Comme la plupart des formations de pente (cône d'avalanche, cône torrentiel, dépôts polygéniques...), ils constituent des éléments marquants du paysage en montagne. Si les différentes définitions proposées des termes pierriers et éboulis rendent bien compte d'un état de fait, elles ne précisent pas l'extrême diversité de formations que ces notions recouvrent. Comme le soulignaient FRANCOU et HETU (1989), contrairement à ce qui s'est passé en botanique ou en zoologie, il ne s'est pas développé en géomorphologie de véritable systématique (la taxonomie). Nous n'avons donc pas les équivalents des principes taxonomiques que sont l'espèce, le genre, l'ordre, la classe, etc....D'où, une confusion entretenue dans les critères de base que l'on retient pour classer les formes. Ainsi, telle désignation a des connotations différentes suivant les contextes : c'est le cas du terme « éboulis », qui pour les géologues désigne un dépôt de pente grossier et hétérométrique, pour les géomorphologues, ce même type de sédiment, mais classé et doté d'une forme particulière liée à son mode de mise en place, et pour les géotechniciens, des pierres tombant d'un versant raide. TIHAY (1984) souligne qu'il est préférable de distinguer le talus d'éboulis et l'éboulis, ce dernier étant la forme colluviale, le premier son enveloppe extérieure. FRANCOU et HETU (1989), envisagent le terme talus d'éboulis ou talus comme synonyme d'éboulis.

En terme de distinction, nous nous rangeons à celle de TIHAY (1984) et considérons que l'éboulis désigne le matériau et le talus d'éboulis, la forme constituée par les matériaux accumulés.

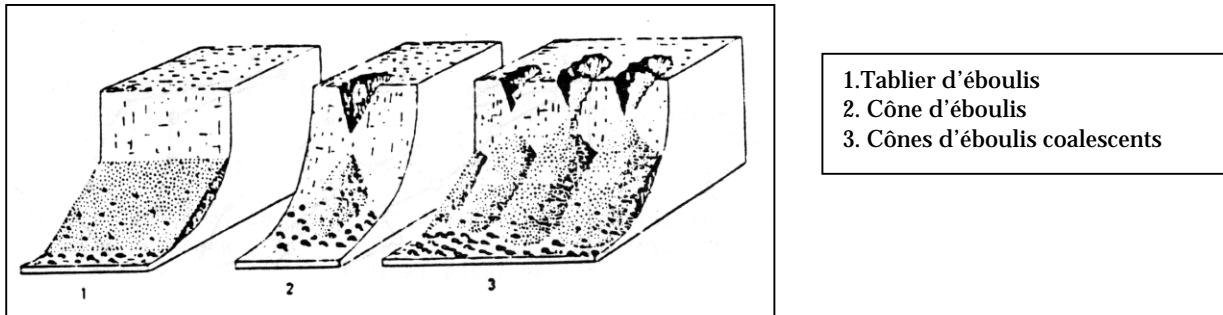
En 1968, MALAURIE, proposait la définition suivante, que rejoint celle de BIROT (1981) : « *Un éboulis au sens strict est essentiellement le résultat d'un déplacement successif des pierres d'une paroi. Celles-ci, tombant en chute libre au pied du mur, se calent les unes contre les autres. Elles constituent un amas au précaire équilibre dont le mouvement est l'effet de la force de gravité réduite par les frictions que les pierres exercent les unes sur les autres (...)* ».

C'est HAMELIN et COOK (1967), FRANCOU (1981) puis FRANCOU et HETU (1989) qui précisent la spécificité des éboulis périglaciaires : « *Les éboulis sont formés de blocs tombés un à un et accumulés au même endroit; le profil longitudinal d'un éboulis est le plus souvent rectiligne à concave avec des valeurs de pente atteignant couramment 35° et plus dans le secteur proximal* » (FRANCOU et HETU, 1989).

TRICART (1963 cité par DELLION, 1986) apporte quelques précisions en terme de modèle de fonctionnement : « *Les éboulis sont constitués par des blocs qui se détachent et roulent individuellement sur les pentes. Leur inclinaison est directement et exclusivement fonction du coefficient de frottement des blocs les uns contre les autres. Elle dépend donc de la nature des roches qui commande la forme et la dimension des débris. Cette pente des éboulis doit être influencée par le climat, qui commande le mode de fragmentation de la roche* ».

En fonction de l'ampleur et de la morphologie de la paroi amont, les auteurs distinguent les cônes d'éboulis, au profil transverse convexe, qui sont caractéristiques des corniches coupées de couloirs (lorsqu'ils sont jointifs, on parle de cônes coalescents). Et, sous les corniches faiblement échancrées, on a de simples plans inclinés, les tabliers d'éboulis (Figure 2). En Chartreuse, les deux types coexistent mais les tabliers d'éboulis sont les plus représentés (Chapitre 3, paragraphe 2.2).

Figure 2 : *Physionomie générale des éboulis (d'après RAPP (1960) modifiée par FRANCOU et HETU (1989))*



Le matériel de l'éboulis est le plus souvent grossier et hétérométrique et il convient de noter une tendance au granoclassement longitudinal des blocs de l'amont vers l'aval, des plus petits aux plus gros. Cette zonation longitudinale classique (modèle biphasé de FRANCOU, 1981, 1988) et en général complétée par une zonation transversale plus rarement décrite (WILSON, 1990). Nous précisons ces deux aspects pour les talus d'éboulis cartusiens.

Toutefois, la réalité de terrain est plus complexe. Ainsi, FRANCOU (1981, 1988) propose cinq facteurs de différenciation :

- le granoclassement. Il n'est jamais totalement parfait le long du profil (DAVEAU, 1958) et les profils en long sont très variables (CAILLEUX, 1965);
- la concavité basale.
- le passage à l'aval à d'autres morphoséquences. L'éboulis est une forme de contact entre les corniches dominantes et les fonds de vallons. SOUTADE (1980) le considère comme une morphoséquence étroitement dépendante de la corniche et de sa désagrégation, mais aussi de la morphologie des couloirs;
- le modelé de détail de l'éboulis. La surface de l'éboulis porte en général les traces d'une activité propre (dynamique interne). Selon FRANCOU (1981), ces irrégularités relèvent essentiellement de l'action du ruissellement, de la gélifluxion ou encore de processus de fluage;
- le degré d'évolution. L'âge ou le stade d'évolution différencie les éboulis.

Nous ajoutons, le degré de végétalisation. Aspect qui sera développé dans la troisième partie de ce travail.

Les particularités « classiques » générales évoquées par ces différents auteurs sont assez proches de celles que nous avons pu définir et retenir sur les talus d'éboulis cartusiens (Troisième partie, Chapitre 6). Mais des nuances méritent d'être soulignées lorsque l'on s'intéresse aux modèles de

fonctionnement des éboulis et aux angles de frottement (STATHAM, 1976; CARSON, 1977; FRANCOU, 1988).

2.2.1.2. Intervention de la gravité et du frottement des matériaux

Théoriquement, comme le soulignent de nombreux auteurs (TRICART, 1963; STATHAM, 1976; CARSON, 1977; BIROT, 1981; FRANCOU, 1988; ROVERA, 1990...), dans la construction et la dynamique superficielle des talus d'éboulis interviennent les mêmes principes d'équilibre que dans les corniches. La force de cisaillement qui tend à faire se déplacer un bloc à la surface de l'éboulis obéit au critère de Coulomb. Dans la mesure où l'éboulis est considéré comme un amas de matériel granulaire sans cohésion, cette force dépend essentiellement de l'angle de frottement interne \emptyset . En simplifiant, ROVERA (1990) ajoute que l'on peut considérer que cet angle est équivalent à l'angle d'inclinaison du talus. Mesuré par de nombreux auteurs sur divers talus d'éboulis, il se situe vers 35° . Il ajoute que la réalité est plus complexe et que plusieurs angles de frottement peuvent être pris en considération, selon que l'on se situe au haut ou au bas du talus d'éboulis, selon le calibre des matériaux, leur forme, selon la hauteur de chute des blocs...une combinaison de facteurs dont rendent bien compte les modèles établis par STATHAM (1976) et CARSON (1977).

Ces auteurs ont mis en évidence trois types d'angles de frottement susceptibles d'être rencontrés sur un éboulis, sans cohésion et sec, expliquant le profil, la plus ou moins grande stabilité de la construction et la répartition des matériaux; ils se situent dans une fourchette de 5 à 7° :

- l'angle de frottement statique (\emptyset'_{US} , chez STATHAM et \emptyset'_i , chez CARSON);
- l'angle de repos ou angle résiduel (\emptyset'_r);
- l'angle de frottement dynamique ou angle de frottement externe (\emptyset'_{UD}).

En Chartreuse, nous le verrons plus loin, la plupart des talus d'éboulis (actuels) sont semi-végétalisés. Par conséquent, le fonctionnement géodynamique **actuel** (évolution superficielle des talus, remaniements post-dépositionnels) est largement influencé par la présence végétale.

A titre d'exemple, en nous intéressant à la dynamique d'évolution superficielle des talus, nous avons constaté que les distances parcourues par les matériaux en déplacement sur la surface, étaient fortement influencées par la présence végétale et le type de talus d'éboulis considéré (cône ou tablier). Ainsi, dans le cas des tabliers d'éboulis, les zones apico-proximales sont souvent très végétalisées et certaines valeurs de pente mesurées atteignent 39 à 40° (tablier d'éboulis de La Plagne, Troisième partie, Chapitre 6, Paragraphe I). Sur ce tablier, elles augmentent au fur et à mesure que la surface de la zone végétalisée s'accroît vers l'aval. Ces valeurs s'expliquent par l'accumulation de fines, qui ont progressivement constitués des bombements proximaux, végétalisés, se surimposant à la zone proximale sous-jacente « classique ». Ces bombements constituent des plans de glissement favorables aux déplacements des matériaux sur de plus longues distances. Par conséquent, la distance parcourue pour atteindre la valeur de l'angle de repos à partir de laquelle les matériaux en déplacement sont susceptibles de s'arrêter se trouve allongée. Le tablier de la Plagne n'est pas un cas isolé.

Dans le cas des cônes d'éboulis, les zones proximales à fines et petits fracts instables, situées dans le prolongement des couloirs d'alimentation, ne sont que très rarement végétalisées, les distances parcourues par les matériaux sont plus courtes. La végétation se développant sur un bombement central situé dans l'axe et proche du couloir d'alimentation (cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil, Troisième partie, Chapitre 6, Paragraphe 1).

2.2.2. Caractéristiques des talus d'éboulis de l'étage nivéo-périglacière

Concrètement, si les aspects théoriques évoqués plus haut sont pour la plupart parfaitement transposables aux versants à éboulis cartusiens, des distinctions fondamentales existent quant aux dynamiques colluviales et végétales qui s'exercent sur les talus d'éboulis de l'étage infra-périglacière (limite inférieure), notamment, dans le contexte environnemental actuel.

CHARDON (1984) propose une subdivision de l'étage périglacière et nival en deux étages distincts : un étage inférieur de 2000 à 2500 m qu'il qualifie d'infra-périglacière et un étage supérieur de 2500 à 3100 m (limite des neiges permanentes). ROVERA (1990) subdivise ce dernier en un étage périglacière évolué ou médio-périglacière de 2500 à 2800 m et un étage supra-périglacière de 2800 m à 3100 m ou plus.

Dans les Alpes du Nord, on considère habituellement l'altitude de 2500 m où stationne l'isotherme annuelle 0°C, comme le début de l'étage périglacière (FRANCOU, 1982 *in* ROVERA, 1990). Selon CHARDON (1984), cette limite peut être abaissée vers 2000 m. D'après ROVERA (1990), à cette altitude, la température moyenne annuelle atteint certes déjà 2°C, à cause d'un été thermique plus marqué que l'hiver (semestre chaud : 8°C, semestre froid : -4°C) mais la période de gel (en cumulant les jours de gel continu et les jours à gel/dégel) couvre plus de la moitié de l'année ainsi que la durée du manteau neigeux (6 à 7 mois) tandis que le coefficient de niviosité dépasse 50% : « *Dès 2000 m, le rôle morphogénique du gel et de la neige se repère dans le paysage aussi bien en roche dure qu'en roche tendre* » (ROVERA, 1990).

Au dessous de 2000 m, l'emprise du froid diminue. Au vu des processus nivaux et périglaciaires (2.1.) qui s'exercent actuellement sur les talus d'éboulis du massif de la Grande Chartreuse entre 1500 et 2000 m, les précisions apportées par ROVERA (1990) nous ont conduit à reconsidérer la limite inférieure de l'étage infra-périglacière que nous situons, dans notre cas, vers 1550-1600 m. La tranche altitudinale retenue (1500-2000 m) correspond à ce que JOMELLI (2001; 2002) appelle l'étage nivéo-périglacière (étage infra-périglacière) dont la limite supérieure peut s'étendre jusqu'à 2500 m. Cet étage a été particulièrement délaissé (1.1 et 3.2. Chapitre 1) en raison des méconnaissances qui existaient jusqu'à aujourd'hui sur les processus et leurs dépôts, dans cette tranche d'altitude (JOMELLI, 2001).

Globalement, vers 1500 m, les critères des années 80, en cours de modification probable depuis une vingtaine d'année (III, 3.1.3.), soulignaient le maintien des conditions périglaciaires (jour de gel continu et surtout jours à alternances gel-dégel) sur environ 30% de l'année. Le coefficient de niviosité avoisinait aussi les 30% et l'enneigement durait en moyenne 3 à 4 mois par an (POULIN, 1994; GERVAISE, 1997). Nous développerons cet aspect dans un paragraphe consacré à l'analyse des conditions mésoclimatiques d'un tablier d'éboulis en situation d'adret dans la troisième partie de ce mémoire (Chapitre 8). Il y a 30, 40 ans (III), les conditions étaient plus froides mais depuis la fin des années 80, la tendance au réchauffement climatique est attestée en Chartreuse (III). Dans ce contexte, l'étage nivéo-périglacière est selon nous « un étage à changements » où la régression des processus est assez rapide par rapport aux étages supérieurs. La température moyenne annuelle se situe aux alentours de 0°C, or, cette température contrôle en partie l'activité des processus nivéo-périglaciaires dans la mesure où elle conditionne également la nature des précipitations.

Ces conditions en font un étage extrêmement sensible aux fluctuations climatiques même de faible ampleur (JOMELLI, 2001).

Dans un contexte de ralentissement morphodynamique généralisé, au sein de cette tranche altitudinale, ces considérations ont conduit ROVERA (1990) à proposer pour les talus d'éboulis

quartzitiques de moyenne altitude (Tarentaise), un modèle de fonctionnement épidermique plus complexe que celui développé par FRANCOU (1988) et qu'il qualifie de « polyphasé ». Ce modèle est certainement celui qui illustre le mieux le fonctionnement observé sur les talus d'éboulis cartusiens. En simplifiant, l'auteur distingue trois zones :

-une zone apico-proximale : à pente soutenue (supérieure à 35°) et à matériel fin où, sur un profil globalement réglé, s'effectue le transfert des matériaux de gros et moyen calibre tandis que les limons, sables et petits graviers restent piégés in situ. Dans cette rétention, la colonisation végétale joue un rôle majeur et le micromodèle de cette zone est donné par la solifluxion et la gélireptation. Ces caractéristiques sont assez proches de celles que nous avons développé dans l'exemple présenté plus haut (2.2.1.2.);

-à l'aval, on retrouve la zone distale du modèle biphasé de FRANCOU (1988), à pente plus faible (inférieure à 35°) et gros blocs;

-une zone intermédiaire, qualifiée de zone médiale, complexe dans le détail et subdivisée. Elle résulte de l'alimentation persistante par les corniches dominantes et fait figure de marge instable. Elle se compose de langues fonctionnelles dessinant le plus souvent des chevrons, influencées dans leur tracé à la fois par les génératrices longitudinales habituelles des éboulis vifs et par les lignes de pente transversales secondaires. Cette zone médiale est formée d'éléments bien calibrés (cailloux et graviers exclusivement) rassemblés par le triage homométrique (modèle de STATHAM) mais aussi tout simplement par la rugosité végétale et la présence des premiers gros blocs en fin de zone proximale ou en début de zone distale. Nous ajoutons que sur cône d'éboulis, en Chartreuse, l'accumulation des gros blocs contribue à la création de bombements centraux. L'isolement fonctionnel de ces bombements est susceptible de générer une quatrième partie constituée de chenaux graveleux actifs (polyphasage). Lorsque la végétation, en particulier ligneuse, s'installe, le zonage se complexifie. Nous reviendrons sur ce aspect dans le paragraphe I du Chapitre 6.

Souvent digitée sur un cône, elle est légèrement ondulée sur un tablier. Selon ROVERA (1990), cela traduit un polyphasage (apparition de langues de graviers, plages à fines) qui semble être révélateur de la régression de l'apport de débris et de l'action des processus nivéo-périglaciaires depuis les dernières décennies. Dans ce modèle « triphasé », la zone médiale annonce la fragmentation du talus d'éboulis à moyenne altitude. Il s'agit d'une zone « à changements » intégratrice des modifications en cours. Génératrice d'hétérogénéité, nous supposons qu'elle est créatrice de biodiversité.

Une zonation transversale a aussi été décrite par ROVERA (1990), elle sera développée dans le cadre de ce travail.

La spécificité des talus d'éboulis cartusiens est liée à la lithologie, aux conditions morphoclimatiques locales et au degré de végétalisation. Nous tenterons d'affiner une typologie en reprenant le modèle triphasé de ROVERA (1990) et en intégrant simultanément les composantes géomorphologique, géodynamique et végétale. Nos efforts porteront aussi sur la mise en évidence de signes géodynamiques, morphologiques, climatiques et/ou végétaux traduisant une variation de l'activité des processus nivéo-périglaciaires (Chapitre 8).

2.3. Le talus d'éboulis : un milieu défini par des composantes climatiques, édaphiques et biologiques

SOMSON (1983), dans une thèse consacrée aux relations entre la végétation et la dynamique de son modelé support dans les pierriers et éboulis⁵ pyrénéens, propose une synthèse bibliographique très détaillée des points de vue phytosociologiques et écologiques relatifs aux groupements dits d'éboulis. Nous nous intéresserons aux conclusions de l'auteur pour tout ce qui se rapporte au point de vue phytosociologique et nous développerons l'aspect lié à la perception écologique. Une comparaison sera effectuée, si possible, avec les travaux réalisés dans les Alpes.

2.3.1. L'approche phytosociologique de l'éboulis

Quelques points fondamentaux liés aux problèmes de classification des groupements d'éboulis apparaissent régulièrement :

- les termes « éboulis » et « pierriers », les plus couramment utilisés, ne font l'objet d'aucune définition géomorphologique précise et adéquate;
- dans les Alpes (RICHARD et PAUTOU, 1982), l'état des travaux donne la priorité absolue à la nature chimique de la roche-mère (acidité du sol, présence ou absence de carbonate de chaux) en individualisant deux ensembles de communautés au niveau d'un syntaxon⁶ de rang supérieur : l'ordre. Il s'agit, conformément à la classification de BRAUN-BLANQUET (1926), de l'ordre des *Thlaspeetalia rotundifolii* des éboulis calcaires et l'ordre des *Androsacetalia alpinae* des éboulis siliceux pauvres en carbonate de chaux. BRAUN-BLANQUET (1948), introduisant la végétation des éboulis calcaires, considère que l'ordre des *Thlaspeetalia* caractérise la végétation des pierriers « actifs » recevant constamment ou de temps en temps des matériaux nouveaux. L'auteur poursuit en indiquant que « (...) Parmi les facteurs qui régissent l'individualisation et la répartition des différentes associations de l'ordre, l'humidité du sol, la dimension des débris rocheux et la durée du manteau neigeux tiennent les premières places. Avec la mobilité des pentes, ces facteurs conditionnent l'adaptation rigoureuse des espèces caractéristiques ».

Nous ne développerons pas ici la classification de RICHARD et PAUTOU (1982). Certes, les relevés effectués permettent une première approche globale des groupements particuliers caractérisant les éboulis calcaires. Cependant, les différences d'altitude sont trop importantes, de l'ordre de 500 m en moyenne (2072 m), pour que nous puissions comparer nos données. D'autre part, nous ne sommes pas dans une logique de classification systématique.

La plupart des auteurs semblent considérer que la végétation joue un rôle tout à fait secondaire dans la fixation et la stabilisation du milieu. Les éboulis mobiles abriteraient des groupements pionniers plus ou moins durables (associations spécialisées). D'après FAVARGER (1972 *in* SOMSON, 1983), leur persistance serait due à l'intensité de l'instabilité du substratum et aux chutes constantes de matériaux. Dans les Pyrénées orientales, BAUDIERE et BONNET (1963) ont montré que les caractères physiques d'un éboulis avaient plus d'importance que la composition chimique de la roche. Dans les Alpes, la composition chimique joue un rôle principal ce qui n'empêche pas que (sur calcaire tout au moins), le calibre des matériaux influence les groupements : « (...) les associations d'éboulis sont assez nombreuses dans les Alpes. Elles ne sont d'ailleurs pas toujours très tranchées, ce qui tient au gradient physique (degré de stabilité, calibre des matériaux, pente, etc.) que présentent ces stations souvent hétérogènes. Le contingent d'espèces communes à plusieurs associations n'est pas négligeable; cela montre la parenté des divers groupements » (BAUDIERE et BONNET, 1963).

⁵ Terminologie utilisée par l'auteur.

⁶ Groupement végétal identifié, quel que soit son rang dans la classification phytosociologique (RAMEAU *et al.*, 1993).

D'autres points sont également soulignés relatifs au déterminisme de la végétation des éboulis; ce sont, en plus des degrés de stabilité estimés, l'intensité de l'alimentation, le calibre des débris, la raideur de la pente, l'humidité du sol et la durée du manteau neigeux qui déterminent l'installation, le développement et le maintien des groupements d'éboulis.

SOMSON (1983) souligne que d'un point de vue purement phytosociologique, rares sont les auteurs faisant remarquer que sur un éboulis la concurrence interspécifique est réduite : « *c'est pourtant, dans ces types de milieux, l'une des caractéristiques principale du peuplement végétal* ». Les phytosociologues reconnaissent que le cortège floristique est constitué d'une grande partie d'endémiques, ce qui entraîne l'individualisation d'un nombre considérable d'associations malgré la présence, voire la permanence, d'un contingent d'espèces communes (BAUDIERE et BONNET, 1963).

Cet aspect est très intéressant lorsque l'on envisage l'étude des talus d'éboulis en relation avec les changements environnementaux. Conformément à notre hypothèse de départ, le réchauffement climatique devrait être à l'origine d'une diminution en fréquence et en intensité des processus d'érosion nivéo-péglaciaires. Par conséquent, la géodynamique de surface devrait ralentir favorisant l'installation de certaines espèces pionnières appartenant ou non aux formations encadrantes (pelouse, prairie, forêt). Nous le verrons plus loin, certains talus d'éboulis cartusiens ont connu une colonisation végétale importante depuis le début du siècle dernier. Cette colonisation, ligneuse et herbacée, est liée à l'installation d'espèces, non principalement lithophiles, qui ont pu s'adapter aux conditions de vie sur des talus d'éboulis dont la géodynamique est en cours de ralentissement. L'analyse des valeurs indicatrices (ELLENBERG, 1974 ou LANDOLT, 1977), et notamment celle des types biologiques (Deuxième partie, Chapitre 5), devrait nous permettre de clarifier cet aspect. En effet, les types biologiques présents dans les milieux à éboulis sont essentiellement des hémicryptophytes (plante herbacée) et certains chaméphytes ligneux⁷ et/ou herbacés⁸. La présence de nanophanérophytes (buisson de 0.4-4 m) et de phanérophytes (plante ligneuse dépassant 4 m), pourrait indiquer que nous ne sommes plus sur un éboulis au sens d'un biotope composé d'associations spécialisées.

Seuls BEGUIN (1970), FAVARGER (1972) et NEGRE (1968) envisagent les éboulis dans leur originalité, leur diversité et leur hétérogénéité et font intervenir dans l'analyse végétale, la dynamique du support minéral.

Il semble que BAUDIERE et SERVE (1971, 1975) aient effleuré la question; leur approche a privilégié la composante géomorphologique du diptyque (SOUTADE, 1980); ils en ont, en revanche, négligé la composante phytosociologique : « *La phytosociologie, qui repose sur un fondement écologique puisqu'elle distingue les classes des rochers, des éboulis, des pelouses acidiphiles, des pelouses calcicoles, etc., ne peut ignorer plus longtemps celle qui réunirait les communautés vivant dans les milieux soumis à une activité péglaciaire intense. Pour l'admettre il faudrait délaisser la notion d'espèce caractéristique pour lui préférer celle d'ensemble d'espèces caractéristiques (...) C'est ainsi d'ailleurs que pourraient être envisagés les cas de certains groupements dits « d'éboulis » dont le maintien actuel dans la classe des *Thlaspeetea* relève plus d'un conditionnement écologique, lié à l'aspect du versant, que de la réalité des faits* ».

« *Par la multiplicité des adaptations qu'il exige, par l'inexorable succession des faciès qu'il abrite, l'éboulis est un milieu en perpétuelle évolution dont la dynamique rappelle étrangement celle de la dune* » (BAUDIERE et BONNET, 1963). Selon nous, un système de classification tenant compte à la fois des données phytosociologiques, écologiques et géomorphologiques rendrait sans aucun doute mieux compte de la réalité des faits. Comme le souligne SOMSON (1983), il faudrait pour cela créer un vocabulaire nouveau, l'utilisation dans ce cas-là du vocabulaire phytosociologique

⁷ Arbrisseau de moins de 0.4 m, dont les bourgeons passent l'hiver au-dessus du sol.

⁸ Plante herbacée, dont les bourgeons passent l'hiver au-dessus du sol sur des tiges persistantes.

existant déjà n'étant pas souhaitable car risquant d'engendrer des sources de confusion. Ces éléments nous ont incités à poursuivre notre recherche sur les éboulis non pas sous l'angle de la systématisation des associations végétales, mais sous celui de la dynamique de l'éboulis pris en tant que milieu. Par « milieu », nous rejoignons BAUDIERE et BONNET (1963) et entendons l'ensemble des facteurs qui, en un point déterminé, concourent à conditionner le développement et le maintien des organismes qui s'y trouvent; le végétal, lui-même, fait partie du milieu.

2.3.2. L'approche écologique de l'éboulis

BAUDIERE et BONNET (1963), dans une étude consacrée aux éboulis de la zone alpine des Pyrénées orientales reprennent à la lumière des données phytosociologiques le problème « éboulis » d'une manière plus écologique : « *L'éboulis, en haute montagne, est un milieu nettement caractérisé; la vie y est régie par de nombreux facteurs* ». Ils distinguent deux catégories de facteurs, largement transposables aux talus d'éboulis des Alpes :

- Les facteurs généraux (le régime des pluies, la nature du substrat, le facteur exposition) qui affectent non seulement la station plus spécialement considérée, mais également l'ensemble des stations du secteur envisagé; ce sont les grandes composantes du climat local.
- Les facteurs intrinsèques ou facteurs particuliers du milieu envisagé. Ce sont :
 - la gravité et la pente;
 - les formes du relief dominant la station;
 - le volume des blocs entrant dans la composition du pierrier, et par suite, la profondeur à laquelle pourront s'enraciner les végétaux. FROMARD (1978) souligne l'importance de la présence ou l'absence, à faible profondeur, d'un manteau de fines;
 - le végétal. Ils rejoignent ici FRANCOU (1981) en indiquant que la végétation permet de déterminer le degré d'évolution de l'éboulis. Elle est une des « *expressions synthétiques* » du milieu.

Ces facteurs intrinsèques sont les facteurs déterminants de la dynamique de l'éboulis.

BAUDIERE (1983) ajoute que pour l'éboulis oriento-pyrénéen, les auteurs ne prennent pas en considération la nature chimique, en considérant que la grosseur de l'élément constitutif est prépondérante : « *Si l'on peut admettre que dans certaines conditions la nature chimique du pierrier puisse jouer dans la répartition statique de la colonisation végétale, on doit cependant considérer que la morphométrie des éléments constitutifs minéraux est l'un des éléments moteurs commandant la dynamique* ».

BAUDIERE (1983), propose une nouvelle définition de l'éboulis : « *Tout type de milieu colonisé par un peuplement végétal discontinu (ou non colonisé du tout), constitué de matériaux détritiques plus ou moins colmatés par une matrice interstitielle, très pauvre en matière organique et dont l'agencement des débris résulte de l'action de plusieurs forces, dont la gravité et les changements d'état de l'eau interstitielle sont les plus actifs* ». L'aspect lié à la pauvreté en matière organique est très discutable dans le cas des talus d'éboulis cartusiens. Une distinction s'impose notamment en fonction de la zone observée (proximale, médiale, distale) ou de la micro-topographie locale (langues à fines...).

Les travaux de BAUDIERE et BONNET (1963), SERVE (1972), SOUTADE (1980), BAUDIERE (1983) et SOMSON (1983) montrent, en particulier, que la dynamique périglaciaire, responsable de la genèse de nombreuses formes d'éboulis, est un facteur éminemment sélectif pour les végétaux et que la seule présence d'une espèce pourrait parfois suffire à caractériser le milieu en terme d'écologie et de dynamique.

2.4. Conclusion

Finalement, les talus d'éboulis ont fait l'objet de nombreuses études géomorphologiques, phytosociologiques et écologiques. L'aspect géomorphologique est très bien documenté en général, pour les Alpes. Comme nous avons pu le constater (2.1., 2.2.), les aspects relatifs à la mise en place et à la définition de la structure et de la morphométrie des talus d'éboulis s'appliquent globalement aux versants à éboulis cartusiens. Cependant, comme nous le verrons plus loin (Troisième partie, Chapitre 6), dans l'étage infra-périglacière, vers 1550-1600 m, la structure de surface et le fonctionnement épidermique des talus d'éboulis sont plus complexes. En Chartreuse, s'ils intègrent quelques particularités développées par le modèle biphasé de FRANCOU (1988), ils se rapprochent essentiellement du modèle triphasé proposé par ROVERA (1990). Le talus d'éboulis cartusien résulte d'une construction polyphasée dont la dynamique de surface est partiellement influencée par la gravité et par les processus périglaciaires (gélireptation, gélifluxion) et niveaux (nivo-solifluxion, nivo-reptation). D'autre part, la présence végétale contribue au ralentissement des remaniements post-dépositionnels. Dans ce modèle, la zone médiale annonce la fragmentation du talus d'éboulis à moyenne altitude. Elle doit être particulièrement étudiée dans le contexte environnemental actuel car c'est au sein de celle-ci que de nombreux changements s'opèrent.

Malgré les lacunes concernant le peu d'études réalisées sur la flore des talus d'éboulis dans les Alpes françaises du Nord, les approches phytosociologiques et écologiques, développées dans les Pyrénées et les montagnes méditerranéennes, nous conduisent aussi à souligner la spécificité du talus d'éboulis de l'étage infra-périglacière. Si elles ne nous sont pas directement utiles en terme de classification systématique, d'un point de vue écologique elles permettent de mieux orienter notre étude des relations géomorphologie/végétation dans une perspective de dynamique évolutive (concurrence interspécifique, potentielle stabilisation du milieu...). Le talus d'éboulis est un milieu défini par des composantes climatiques, géomorphologiques, géodynamiques, édaphiques et biologiques particulières. Il doit être appréhendé simultanément de manière statique et dynamique. Il évolue dans l'espace et dans le temps. Dans le contexte environnemental actuel, il devient nécessaire de prendre en compte cette dimension spatio-temporelle et d'envisager l'étude des versants à éboulis sous l'angle de leur dynamique à différents niveaux d'organisation en interrelation: du paysage à la placette.

La partie qui suit présente justement la question des changements environnementaux en montagne. Le réchauffement climatique est abordé à l'échelle globale puis à l'échelle des Alpes. Nous présentons ensuite les tendances observées dans le massif de la Chartreuse. Puis, les effets du réchauffement climatique sur les processus morphogéniques et la végétation sont développés. Enfin, un paragraphe est consacré aux changements anthropiques.

III. Les changements environnementaux en montagne

Au cours des deux derniers siècles, deux phases climatiques se sont succédées : une période froide connue sous le nom de Petit Age Glaciaire (1250-1850), suivie d'un réchauffement global de la planète et une augmentation du taux de gaz carbonique dans l'atmosphère depuis la fin du XIX^{ème} siècle. Les zones soumises à l'érosion nivéo-périglaciaire, auxquelles sont associées les mosaïques biorhexistasiques des versants à éboulis de moyenne montagne, pourraient être particulièrement influencées par ce réchauffement. Leur structure résulte d'un équilibre complexe et dynamique entre le végétal et le minéral, autrement dit, entre la végétation et l'érosion. Cet équilibre est réglé à deux niveaux par le climat qui agit simultanément sur les systèmes écologiques, en intervenant comme facteur limitant (disponibilité hydrique, radiation, températures, précipitations, etc.), et sur les processus géomorphologiques (érosifs), en réglant leur répartition spatio-temporelle, leur fréquence et leur intensité. De plus, depuis la fin du XIX^{ème} siècle mais surtout depuis les années 1950, la déprise sylvo-pastorale a probablement eu un impact important, au moins localement sur ces milieux. Par conséquent, il est indispensable de distinguer dans l'évolution des mosaïques biorhexistasiques, la part respective de ces deux paramètres.

3.1. Fluctuations climatiques et changement global

Les cycles climatiques ont toujours existé et un réchauffement de la Terre n'est pas un phénomène nouveau. A l'échelle des temps géologiques, les glaciations quaternaires (entre 100 000 à 300 000 ans de durée pour chacune d'elles) enregistrent au minimum 10 °C d'amplitude thermique sous nos latitudes. La dernière glaciation quaternaire a culminé il y a 25 000 ans environ. La température moyenne en Europe centrale était alors de 10°C inférieure à l'actuelle. Elle a progressivement augmenté jusqu'à -15 000 ans environ, mais a présenté ensuite des oscillations d'une amplitude de 1°C à 2°C et d'une durée de l'ordre de quelques siècles (Figure 3). Outre ces cycles millénaires, d'autres se réalisent sur de courtes périodes (cycles de 11 ans) ou à l'échelle séculaire comme par exemple la période chaude des XI^e, XII^e et XIII^e siècles, avec un maximum de 1170 à 1270, et inversement avec la péjoration climatique du Petit Age Glaciaire, centré sur le XVIII^e siècle. Les fluctuations du front des glaciers sont révélatrices de ces changements. Le système climatique est instable et dans ce contexte, un réchauffement climatique est avant tout un phénomène naturel et non pas un scénario catastrophe soudain. Cependant, les activités anthropiques ont accéléré le phénomène et l'augmentation simultanée de CO₂ semble ne pas avoir d'équivalent depuis 150 000 ans.

3.1.1. Du postglaciaire à la fin du Petit Age Glaciaire (PAG)

Dans les Alpes, de nombreuses études ont été consacrées à la reconstitution des paléo-environnements montagnards à l'échelle du postglaciaire (ROGNON, 1983; BOREL *et al.*, 1984; LAMB, 1977 *in* CANNEL *et al.*, 1989; HANSEN *et al.*, 1984; BURGA, 1988; DAVID, 1993, 1995; TESSIER *et al.*, 1993; CARCAILLET, 1996). Dans la mesure où le climat conditionne en partie l'activité des processus (RAPP, 1960; KARTE, 1983; EYBERGEN et IMESON, 1989; NYBERG et LINDH, 1990; SCHLYTER *et al.*, 1993), ces travaux avaient également pour finalité de mettre en évidence des rythmes morphoclimatiques à l'échelle de la fin du Quaternaire (MIRAMONT,). Des recherches réalisées à différents étages morphoclimatiques (EDOUARD, 1978; COUTEAUX, 1983; LE ROY LADURIE, 1983; KAISER, 1987; TESSIER *et al.*, 1993; LAHOUSSE, 1994; BALLANDRAS, 1998) ont permis de reconstruire les grandes étapes de l'évolution morphogénique et biogéographique des régions alpines, depuis la fin de la dernière période glaciaire. Celles-ci sont aujourd'hui assez bien connues (DE BEAULIEU, 1977; PORTER et OROMBELLI, 1982; BOREL *et al.*, 1984; JORDA, 1993; JORDA et ROSIQUE, 1994; MAGNY, 1994, 1995; ROSIQUE, 1997).

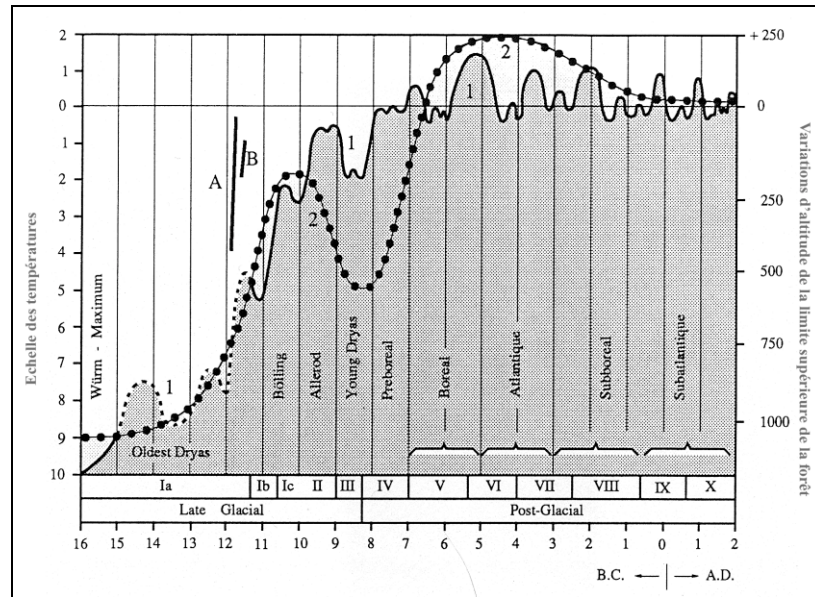


Figure 3 : Variations estimées de la température moyenne estivale par rapport à la température actuelle (ici le 0) en Europe centrale (courbe 1) et variations estimées de la limite supérieure des forêts dans les Alpes (courbe 2, en tirets). Echelle des températures de -10°C à $+2^{\circ}\text{C}$. Echelle des variations d'altitude de la limite supérieure des forêts de $-1\ 000\ \text{m}$ au-dessous du niveau actuel à $+250\ \text{m}$ au moment du maximum thermique boréal. La ligne supérieure de la figure correspond à la chronologie absolue par radiodatage au carbone 14, en milliers d'années. Les deux segments A et B représentent respectivement, à la précision de la figure près, un réchauffement de 4°C et de 1°C , intervenant en 50 ans (hypothèses concernant la période actuelle) (OZENDA et BOREL, 1991).

Entre 1250 et 1850 environ (HOLZHAUSER, 1995), la détérioration générale du climat en Europe a été qualifiée de Petit Age Glaciaire par les climatologues. Cette période est caractérisée par des hivers longs et rigoureux, des étés relativement frais et humides et une avancée notable des glaciers. La température moyenne aurait été inférieure de 1°C à 2°C , à la température moyenne que nous connaissons aujourd'hui (Encart 1).

Encart 1 – La durée du Petit Age Glaciaire (in FELTGEN DIDIER, 1998)

- POLLACK et CHAPMAN, 1993 : 14^{ème} – 18^{ème} siècle.
- SCOTT *et al.*, 1987 : 1430 à 1850.
- GRAUMLICH et KEIFER, 1994 : 1450 à 1850.
- DAVIS (1986) précise que le petit âge glaciaire a commencé en 1250, s'intensifiant à partir de 1450, culminant aux 17^{ème} et 18^{ème} siècles et se terminant en 1850.
- D'après ROGNON (1983), il y a eu une chute de la température moyenne annuelle de $1,5^{\circ}\text{C}$ par rapport à aujourd'hui, des précipitations légèrement plus élevées, avec des pics de froid de 1600 à 1610, 1690 à 1700 et 1740 à 1750.
- D'après GRAUMLICH et KEIFER (1994), une période chaude médiévale a précédé le petit âge glaciaire entre 1100 et 1375, tandis que VIVIAN (1991) parle d'une phase de climat régulier, doux et relativement sec entre 900 et 1250.

L'impact du PAG sur le domaine glaciaire est bien étudié, grâce aux traces morphologiques laissées dans les paysages (moraine, marges proglaciaires...), aux reconstitutions historiques et dendrochronologiques (ZUMBÜHL et HOLZHAUSER, 1988; HOLZHAUSER, 1995) et au suivi plus ou moins précis de l'avancée et du recul de quelques glaciers depuis plus d'un siècle dans les Alpes (KILIAN et FLUSIN, 1899; MOUGIN, 1910, 1934; VIVIAN, 1975; GROVE, 1988; EDOUARD, 1989; VALLA, 1989; MAISCH, 1994; HAEBERLI, 1995; REYNAUD, 1999; REYNAUD et VINCENT, 2000).

Les relations entre la dynamique des versants et les changements climatiques enregistrés sur la période PAG/Post PAG sont peu étudiées et donc mal connues sur les versants nivéo-périglaciaires non englacés (entre 1500 et 2500 m) dans les Alpes françaises (JOMELLI, 2002). Et c'est principalement l'étage infra-périglacière (1500-2000 m) qui nous intéresse ici. Nous reviendrons sur ce point dans le paragraphe (3.2).

3.1.2. La validation scientifique du « Global change »

3.1.2.1. Le réchauffement atmosphérique

Au PAG, succède une phase plus chaude (Figure 4, a). Celle-ci est caractérisée par une amélioration climatique, de plusieurs dixièmes de degrés Celsius. Une large majorité des experts pense que le réchauffement de ces 50 dernières années est lié au facteur anthropique (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), 2001). La tendance des températures moyennes annuelles planétaires à deux mètres est estimée à $0,6 \pm 0,2^\circ\text{C}$ sur le siècle, avec une confiance supérieure à 99% (MITCHEL, 1977; HANSEN *et al.*, 1981; JONES *et al.*, 1986; IPCC, 2001). Ce réchauffement n'est pas uniforme, ni dans l'espace, ni dans le temps : il s'est principalement produit lors des périodes 1910-1945 (alors concentré sur l'Atlantique nord et ses environs) et 1976-2000 (surtout aux moyennes et hautes latitudes continentales de l'hémisphère nord en hiver et au printemps, excepté le nord-ouest de l'Atlantique).

MITCHEL (1977) et HANSEN *et al.* (1981) font état d'un réchauffement de $0,6^\circ\text{C}$ dans l'hémisphère Nord entre 1880 et 1950, et d'un refroidissement de $0,3^\circ\text{C}$ entre 1950 et 1980. Ces observations sont confirmées par SCOTT *et al.* (1987) qui ont mis en évidence un maximum thermique entre 1920 et 1950 dans l'hémisphère Nord, puis un refroidissement et un nouveau réchauffement. En moyenne, entre 1950 et 1993, les températures journalières minimum de l'air relevées de nuit à la surface des sols ont augmenté d'environ $0,2^\circ\text{C}$ tous les 10 ans contre $0,1^\circ\text{C}$ pour les températures journalières diurnes. Dans de nombreuses régions situées sous des latitudes moyennes ou élevées, ce phénomène a allongé la saison sans gel. L'analyse des données paléoclimatiques montre que l'intensité du réchauffement au cours du XX^e siècle est sans précédent depuis mille ans, et sans doute au-delà (Figure 4, b). La période 1990-2000 constitue la décennie la plus chaude.

Dans les Alpes autrichiennes, AUER *et al.* (1992) ont calculé une augmentation de 1°C depuis la fin du PAG. Le tableau 1, résume les changements de température mis en évidence dans plusieurs stations d'altitude des Alpes et des Pyrénées. De nombreux auteurs associent généralement cette amélioration climatique à une diminution de la dynamique des versants (GARDNER, 1977; McCAROL, 1993; MATTHEW et McCAROL, 1994; ANDRE, 1995).

	station	altitude	période	réchauffement
1	Grand-Saint-Bernard	2472 m	<1860-1980	+ 0,6 à + 0,8 °C
2	Sankt Gotthard	2091 m		
3	Saulis	2503 m		
4	Pic du Midi de Bigorre	2862 m	1878-1994	+ 0,83 °C
5	Säntis	2500 m	1882-1970	+ 0,9 °C
6	Sonnblick	3106 m	1887-1970	+ 0,97 °C
7			1900-1950	+ 2 °C *
8			1910-1960	+ 2,5 °C **

* températures minimales et maximales en avril et juillet

** températures minimales et maximales en octobre

sources : 1-3 HOFER 1992

4-6 BÜCHER et DESSENS 1991

7-8 AUER 1990 cité par BENISTON *et al.* 1996

Tableau 1 : Augmentation de la température moyenne annuelle dans les stations météorologiques de haute altitude

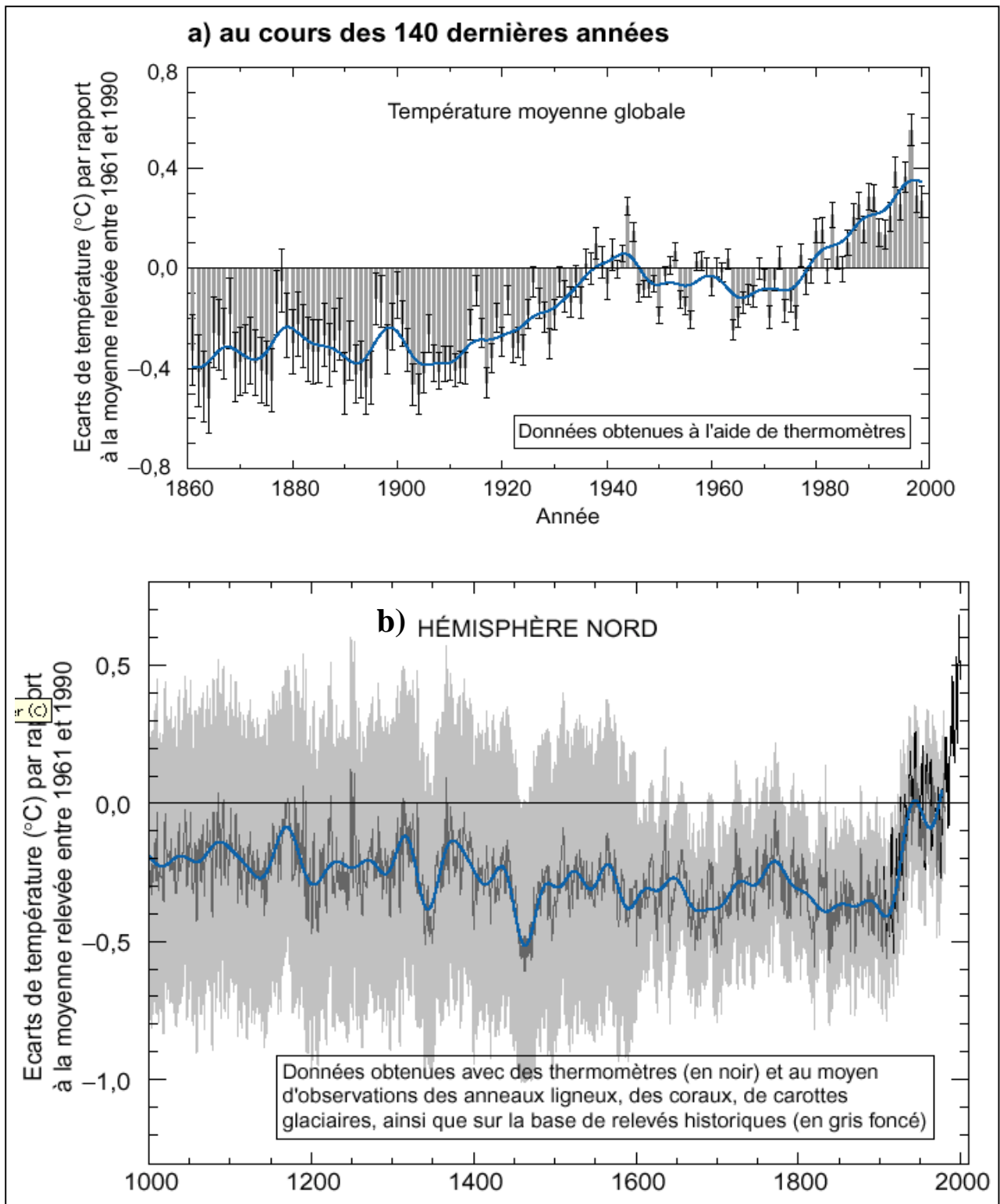


Figure 4 : Variations de la température à la surface de la terre au cours des 140 dernières années(a) et du dernier millénaire (b). a) La température à la surface de la terre est indiquée année par année (barres grises) et approximativement décennie par décennie (ligne bleue, la courbe annuelle filtrée supprimant les fluctuations au-dessous des échelles de temps quasi décennales). Les incertitudes concernant les données annuelles (insuffisance de données, erreurs instrumentales...) sont matérialisées par les fines barres noires représentant l'intervalle de confiance de 95% (GIEC, 2001). b) Variations année par année (courbe gris foncé) et variations moyennes sur 50 ans (courbe bleue, moyennes mobiles) de la température moyenne de la surface dans l'hémisphère Nord. Zone grise : intervalle de confiance de 95% pour les données annuelles (MANN *et al.*, 1999).

Les projections futures concernant le réchauffement climatique reposent sur l'hypothèse d'un réchauffement général de l'atmosphère terrestre induit, entre autre, par l'augmentation de CO₂. L'influence des activités humaines continuera à modifier la composition atmosphérique tout au long du XXI^{ème} siècle et les modèles envisagent un doublement de CO₂ atmosphérique vers les années 2030-2050. Le réchauffement résultant est estimé à $3 \pm 1,5^\circ\text{C}$ mais varie de $1,4^\circ\text{C}$ à $5,8^\circ\text{C}$ en fonction des modèles durant la période 1990-2100 (IPCC, 2001). Celui-ci devrait progresser de $0,1^\circ$ à $0,2^\circ\text{C}$ par décennie. Il est très probable que la quasi-totalité des terres connaîtront un réchauffement plus rapide que la moyenne mondiale, en particulier aux latitudes élevées de l'hémisphère Nord pendant la saison froide. De récentes simulations indiquent qu'en hiver, le réchauffement pour toutes ces régions dépasse la moyenne mondiale de plus de 40% dans tous les modèles ($1,3^\circ$ à $6,3^\circ\text{C}$ pour l'ensemble des modèles).

Pour l'Europe, BENISTON (2004a) s'est basé sur les simulations effectuées par l'Institut Météorologique Danois à l'aide du modèle climatologique régional HIRHAM (CHRISTENSEN *et al.*, 1998) pour illustrer les changements qui pourraient intervenir entre le « climat actuel » (1961-1990) et le « climat avec gaz à effet de serre » (projection pour la période 2070-2100). D'après BENISTON (2004a), un changement radical pourrait intervenir au cours des années 2070-2100.

Pour ces deux périodes, il a d'abord étudié les variations des moyennes des maxima journaliers des températures estivales de juillet à septembre pour la ville de Bâle (Nord-Est de la Suisse). Puis il a aussi analysé le nombre de jours avec une température supérieure à 30°C . Il en ressort que l'été 2003 a été le plus chaud depuis 1901. En appliquant le modèle aux autres régions d'Europe, les résultats montrent que pour la seconde moitié de ce siècle, les températures estivales vont augmenter dans une grande partie du continent conduisant à un « glissement vers le Nord » des zones climatiques. Cela signifie que la Suisse aurait un climat semblable à celui du Sud de la France actuellement.

Le modèle prévoit également une augmentation générale d'environ 4°C dans une bande s'étendant de l'Europe centrale à la Mer Noire, avec des augmentations plus marquées sur l'Espagne et le sud-ouest de la France. De plus, le nombre de jours chauds ($> 30^\circ\text{C}$) devrait croître de plus de 40 à 60 jours avec des températures en dessus de 30°C , en particulier dans les régions méditerranéennes et de l'est de l'Europe. En comparaison, pendant la période 1961-1990, il y a eu une moyenne de 10 jours chauds.

Du fait de leur maille espacée, les modèles de circulation générale, établis à l'échelle de l'hémisphère Nord ou de l'Europe, ne peuvent donner pour la chaîne alpine que des indications globales.

Les montagnes constituent des lieux privilégiés pour la détection et l'étude des impacts liés au changement climatique. Tout comme la dynamique végétale ou l'hydrologie, le climat change rapidement avec l'altitude et sur de courtes distances (WHITEMAN, 2000).

BENISTON (2004b) souligne que les effets du changement climatique ont des conséquences importantes dans les Alpes et les températures de la Suisse, l'Autriche, la France, l'Allemagne et l'Italie sont en constante augmentation. Sur la période 1901-2004, le réchauffement climatique a été extrêmement marqué sur les Alpes suisses et la Chartreuse par rapport à l'évolution globale (Figure 5).

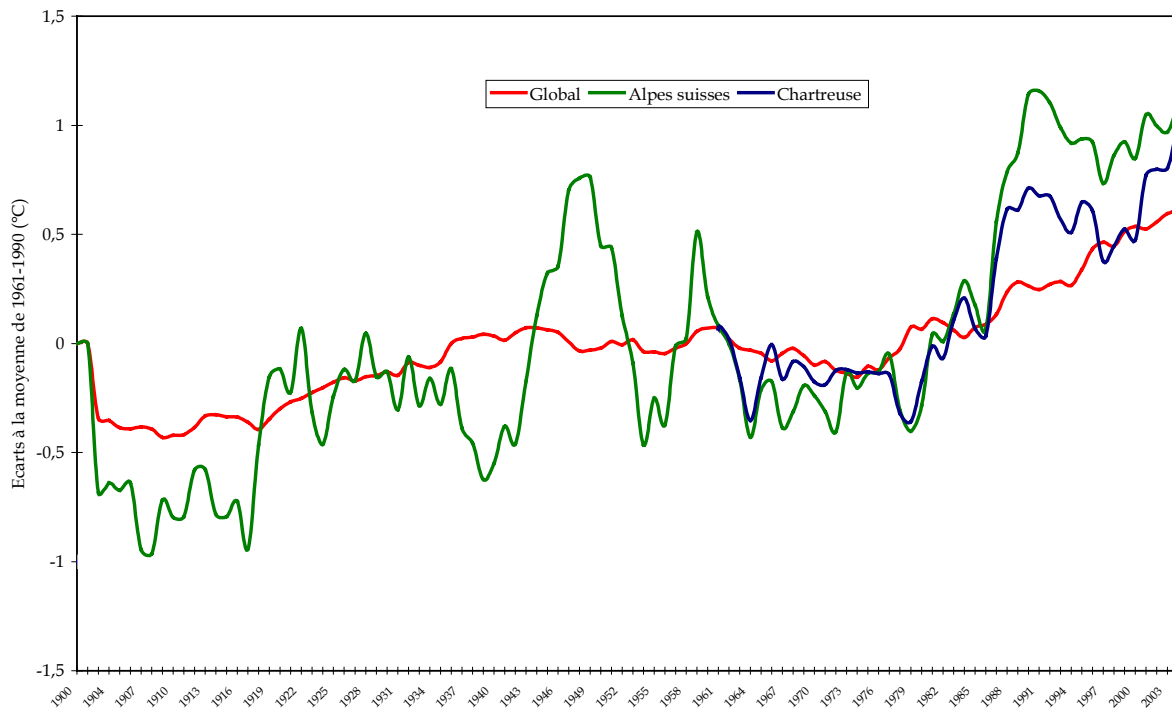


Figure 5 : Evolution des températures globale et alpines sur la période 1901-2004¹. Moyennes mobiles (5 périodes).

Le modèle HIRHAM (CHRISTENSEN *et al.*, 1998) prévoit pour 2070 une augmentation des températures alarmante sur l'ensemble des Alpes, avec notamment une récurrence du nombre de jours dont les températures seront supérieures à 30°C (sur la base d'une augmentation de 4°C en moyenne annuelle).

Les scénarios de réchauffement, réalisés pour la chaîne alpine par les modèles GISS (Goddard Institute of Space Studies) et BMO (British Meteorological Office) prévoyaient respectivement d'ici 2050, en moyennes annuelles, 3,8°C et 2,5°C (OZENDA et BOREL, 1991). De l'application du modèle GISS, établie pour cinq stations alpines d'altitude : Leysin, Davos et Santis en Suisse, San Martino di Castrozza dans le Trentin et Schmittenhöhe dans le Salzbourg, BACH *et al.* (1987) concluent uniformément à un réchauffement de 3,25°C (4°C en hiver et 3°C pour le reste de l'année) et une augmentation des précipitations de 90 mm/an, dont les 2/3 sur le semestre froid. Ces prévisions sont confirmées par GOTTFRIED *et al.* (1994 in FELGEN DIDIER, 1998) qui évaluent le réchauffement d'ici 2050 à 2-3°C pour les Alpes du Nord. Pour les massifs français, le Centre d'études de la neige (CEN) de Météo-France estime l'augmentation moyenne de la température de l'air à environ 1,8°C d'ici 2050 (MARTIN, 2001 in IPCC, 2001).

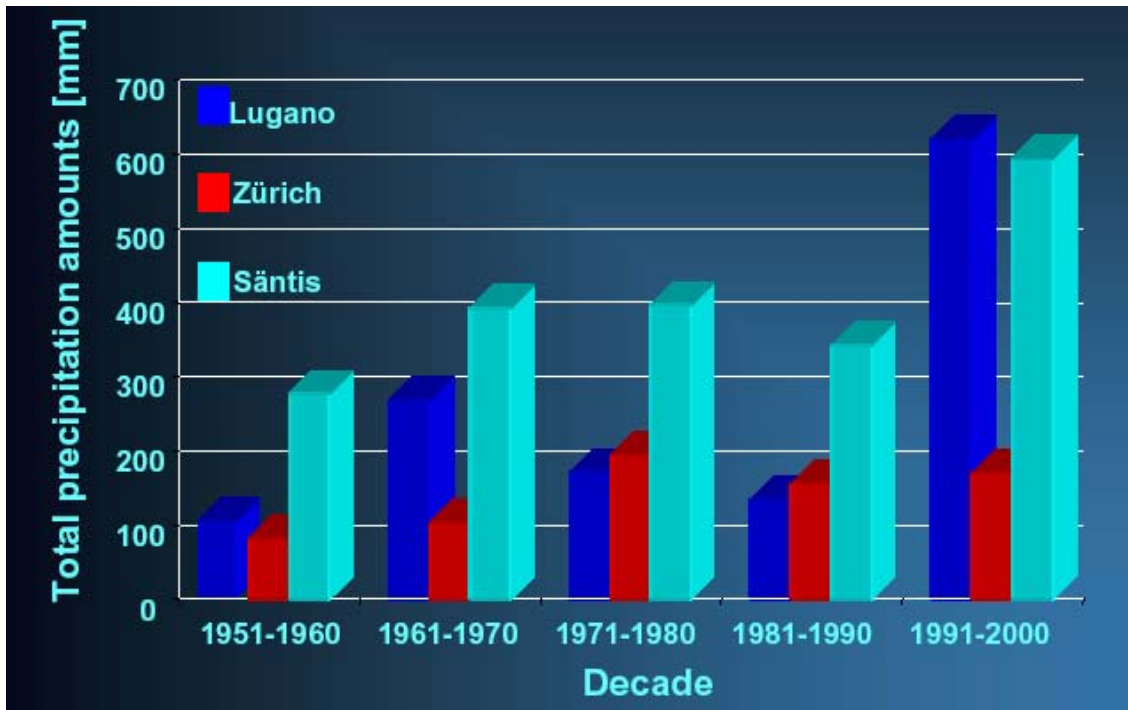
3.1.2.2. Les précipitations

Le réchauffement climatique s'est aussi traduit dans la modification du cycle hydrologique. Selon le GIEC (2001), deux phénomènes ont été observés au XX^{ème} siècle sous la plupart des latitudes moyennes et élevées des continents de l'hémisphère Nord :

¹ Les données concernant l'évolution globale ainsi que celle des Alpes suisses ont été gracieusement fournies par Mr Martin BENISTON. La courbe de la Chartreuse est issue du traitement des données du poste de la Grande Chartreuse (Météo France) sur la période 1961-2004. Nous renvoyons au paragraphe 3.1.3 (Chapitre 1) pour plus de précisions.

- une augmentation des précipitations de l'ordre de 0,5 à 1% par décennie (soit 5 à 10% sur le siècle);
- une augmentation vraisemblable des pluies intenses. Elle se chiffre de 2 à 4% par décennie au cours de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle, sur des valeurs de jours à très fortes précipitations soit 1 à 2 jours par an. Cet aspect est confirmé par BENISTON (2004a) pour la Suisse sur la période 1951-2000 (Figure 6).

Figure 6 : Tendances décennales des précipitations intenses en Suisse (1950-1990)



in BENISTON (2000).

Ces observations sont compatibles avec les résultats des modèles climatiques qui prévoient une intensification de certains flux du cycle hydrologique suite au réchauffement de la planète. Selon les projections, en moyenne et à l'échelle du globe, la vapeur d'eau, l'évaporation et les précipitations devraient augmenter.

Les dernières simulations indiquent qu'il est probable que les précipitations augmenteront été comme hiver aux latitudes élevées. On prévoit ainsi une augmentation des précipitations hivernales aux latitudes moyennes de l'hémisphère Nord (IPCC, 2001).

Dans l'hypothèse d'un doublement de CO₂, les calculs effectués à la plus haute résolution possible montrent, pour les Alpes occidentales, que les précipitations hivernales augmenteraient de 15% avec une augmentation simultanée des températures de 4°C d'ici 2050. Les précipitations estivales diminueraient tandis que les températures augmenteraient de près de 6°C (Tessier in IPCC, 2001).

Ces changements pourraient être accompagnés d'une modification des répartitions saisonnières, des proportions entre précipitations solides/liquides et de la fréquence des événements extrêmes. Éléments à prendre en compte pour le suivi à long terme de l'évolution des versants soumis à l'érosion nivéo-périglaciaires.

3.1.2.3. Modification de la couverture neigeuse

Les données obtenues par satellite montrent qu'il est très probable que la couverture neigeuse ait diminué d'environ 10% depuis la fin des années 60, et des observations au sol indiquent une réduction d'environ deux semaines de la durée annuelle du gel des lacs et des cours d'eau sous les latitudes moyennes et élevées de l'hémisphère Nord, pendant le XX^{ème} siècle (IPCC, 2001). Dans les régions autres que polaires, le recul des glaciers de montagne a été un phénomène largement répandu au XX^{ème} siècle. Dans les Alpes françaises et suisses ainsi que dans les Pyrénées, l'impact serait important en moyenne montagne (MARTIN et DURAND, 1998 ; MARTIN *in* IPCC, 2001 ; BENISTON *et al.*, 2003; KELLER et GOYETTE, 2003).

L'enneigement des montagnes est extrêmement variable, à la fois d'un massif à l'autre et d'un hiver à l'autre. La couverture neigeuse à un instant donné est déterminée par la succession des conditions météorologiques depuis le début de l'hiver. Il est donc tout à fait légitime de penser que celle-ci réagisse fortement en cas de changement climatique. Compte tenu des phénomènes physiques complexes entrant en jeu dans la physique de la neige, il n'est pas possible de relier l'enneigement à des paramètres simples tels que la température et les précipitations. Pour cela, Météo-France a recours aux modèles SAFRAN et CROCUS. SAFRAN est un système d'analyse des conditions météorologiques en montagne et CROCUS, un logiciel de simulation de l'évolution de la couverture neigeuse. SAFRAN est capable de fournir les données météorologiques d'entrée de CROCUS à différentes altitudes et pour différentes régions (MARTIN et DURAND, 1998; MARTIN *in* IPCC, 2001).

Encart 2 – Les modèles SAFRAN et CROCUS (Météo-France)

Ce système est actuellement implanté sur les Alpes et les Pyrénées. Il analyse des conditions météorologiques typiques sur un certain nombre de régions appelées « massifs » (23 pour les Alpes et 11 pour les Pyrénées françaises). Ces régions sont relativement homogènes du point de vue météorologique et par conséquent du point de vue nivologique. Les performances de ces modèles ont été vérifiées en comparant des hauteurs de neige mesurées et simulées sur plus d'une soixantaine de sites des Alpes et des Pyrénées sur une période de 10 ans. L'avantage de ces modèles dans le domaine de la climatologie nivale est la possibilité d'obtenir des données comparables (mêmes altitudes, expositions, pentes) d'une région à l'autre (MARTIN *in* IPCC, 2001).

Se basant sur le scénario climatique du CEN (MARTIN et DURAND, 1998; MARTIN *in* IPCC, 2001), c'est-à-dire une augmentation des températures de l'ordre de 1,8°C d'ici 2050, une simulation a été réalisée dans les Alpes et les Pyrénées sur la durée moyenne de l'enneigement à 1500 m (jour par an). Les modèles prévoient une réduction de l'enneigement, en moyenne montagne, dans les Alpes du nord de l'ordre de 20 à 25%, soit 30 jours par an (ces diminutions correspondent à un début d'enneigement retardé et une fonte de la neige avancée). Le sud des Alpes du Nord (Dévoluy), les Alpes internes (Haute-Tarentaise) et du Sud (Queyras) accusent une diminution de 30% (87 jours au lieu de 124 pour la région du Pelvoux par exemple). Les trois massifs les plus au sud (Alpes azuréennes, Ubaye et Mercantour) se détachent nettement avec une diminution de plus de 40% (59 jours au lieu de 107 pour le Mercantour). Dans les Pyrénées, la diminution est également très forte (30 à 49 jours par an), jusqu'à 45 % pour certains massifs. En haute montagne, au-dessus de 2500 m, un climat plus chaud est aussi plus humide et des précipitations neigeuses plus abondantes compenseraient, en partie, une fonte printanière accélérée, si bien que la perte ne serait que de l'ordre de 10 %. En cas de réchauffement, la couverture neigeuse serait fortement perturbée en début et fin d'hiver.

Il est bien établi à l'heure actuelle que le manteau neigeux serait très sensible à une augmentation de la température. Une augmentation des précipitations neigeuses hivernales ne compenserait que

très partiellement l'augmentation de la température. En cas d'augmentation des précipitations, il faut s'attendre à voir l'enneigement augmenter légèrement en haute montagne en hiver, en revanche, aux altitudes moyennes, l'effet sur l'enneigement sera très faible car le phénomène déterminant est la variation de températures. De même, la durée de l'enneigement dépend pratiquement uniquement de la variation de la température. Dans le cas d'une augmentation des températures de 1,8°C d'ici 2050, les altitudes les plus basses seraient fortement touchées.

Les conclusions d'un symposium organisé par l'université de Genève en 1995 sont, à ce sujet, sans équivoque « *Dans les cinquante années à venir, il faut s'attendre à une hausse moyenne de la température hivernale de 2°C, assortie d'une forte hausse des précipitations. Au-dessus de 2000 mètres, pas de grands changements mais des chutes de neige plus nombreuses. Au-dessous de cette altitude, il faudra compter avec des pluies plus importantes, mais une diminution de l'enneigement, surtout dans les Alpes : une dizaine de jours de neige en moins chaque année. L'hiver aura tendance à se déplacer vers le printemps, avec un mois de novembre gris et doux et des températures en baisse en avril.* » (Communiqué dans Terre Sauvage, n°92, février 1995 in FELTGEN DIDIER, 1998).

Les modèles SAFRAN et CROCUS prévoient, dans l'hypothèse d'un doublement de la concentration de CO₂ d'ici 2050, une réduction de moitié de l'enneigement dans les Alpes (Figure 7).

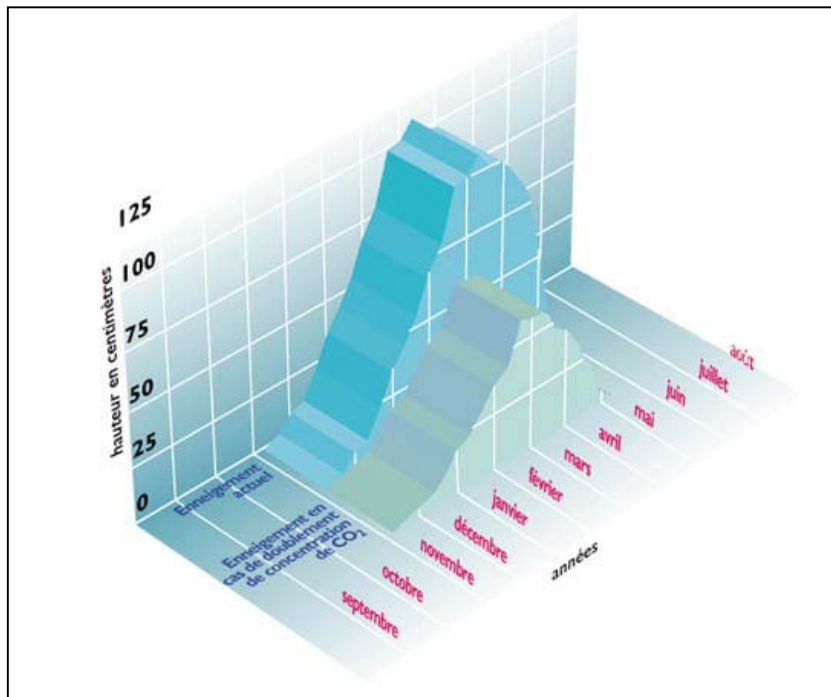


Figure 7: Evolution de l'enneigement dans les Alpes en cas de doublement de CO₂ d'ici 2050 (MARTIN et DURAND, 1998)

Dans ce contexte environnemental, et pour la Chartreuse, l'analyse des données météorologiques (températures, précipitations et enneigement), pour la période 1961-2004, confirme le réchauffement climatique récent.

3.1.3. Les tendances observées dans le massif de la Chartreuse

Nous analyserons dans ce paragraphe les tendances de l'évolution climatique en Chartreuse, sur la période 1961-2003, à partir des données enregistrées par deux postes Météo-France situés dans le massif de la Chartreuse (Tableau 2).

Tableau 2 : Stations météorologiques Météo France (Massif de la Chartreuse)

Poste	Altitude	Date de mise en service	Données utilisées	Période
Grande Chartreuse N°38442001 (Saint-Pierre- de-Chartreuse)	945 m	01/07/1921. Données disponibles depuis 1953.	Températures et précipitations	1961-2004
Col de Porte (Centre d'Etude de la Neige)	1325 m	1959	Enneigement	1961-2001

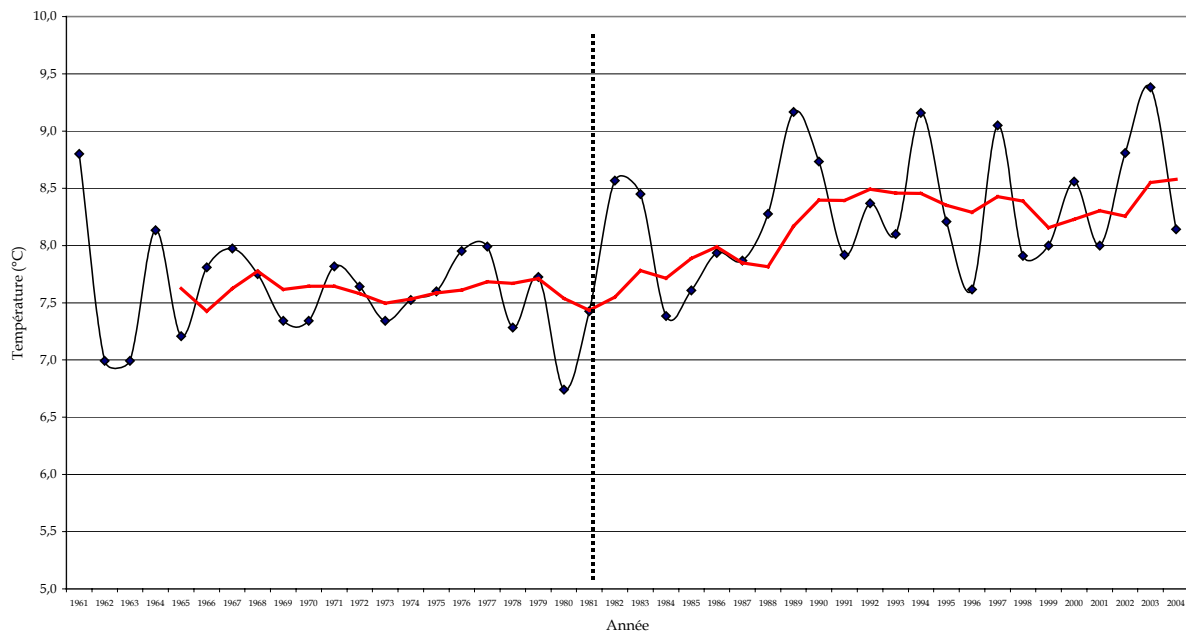
Différentes études réalisées dans les Alpes françaises du Nord par PETIT-RENAUD (1990), HANG (1994) et THEVENON (1999) ont mis en évidence le réchauffement climatique récent. La tendance au réchauffement thermique en Chartreuse est surtout attestée depuis la fin des années 80 (Graphiques 1, 1a et b et figure 5).

3.1.3.1. L'évolution thermique

A. Données générales

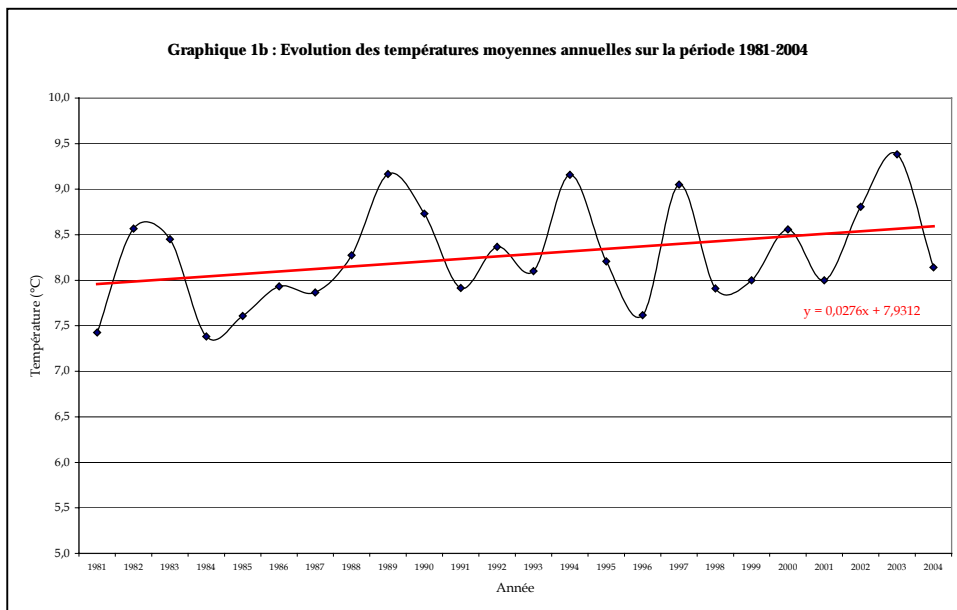
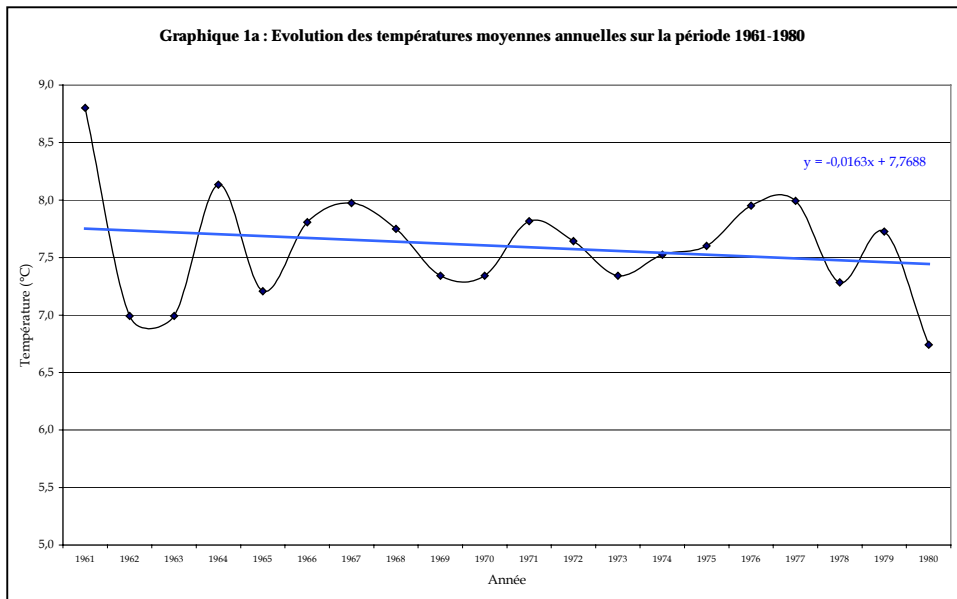
Dans le massif de la Chartreuse, l'élévation thermique des dernières décennies (1961 à 2004) est bien attestée par les enregistrements du poste Météo France de la Grande Chartreuse (945 m). Depuis 43 ans, les températures sont en constante augmentation (Graphique 1).

Graphique 1 : Evolution des températures moyennes annuelles sur la période 1961-2004



En rouge, courbe des moyennes mobiles (5 périodes).

Dans le détail, la période 1961-1980 est caractérisée par un léger refroidissement (Graphique 1a) suivi d'un réchauffement assez marqué depuis la fin des années 80 (Graphique 1b).



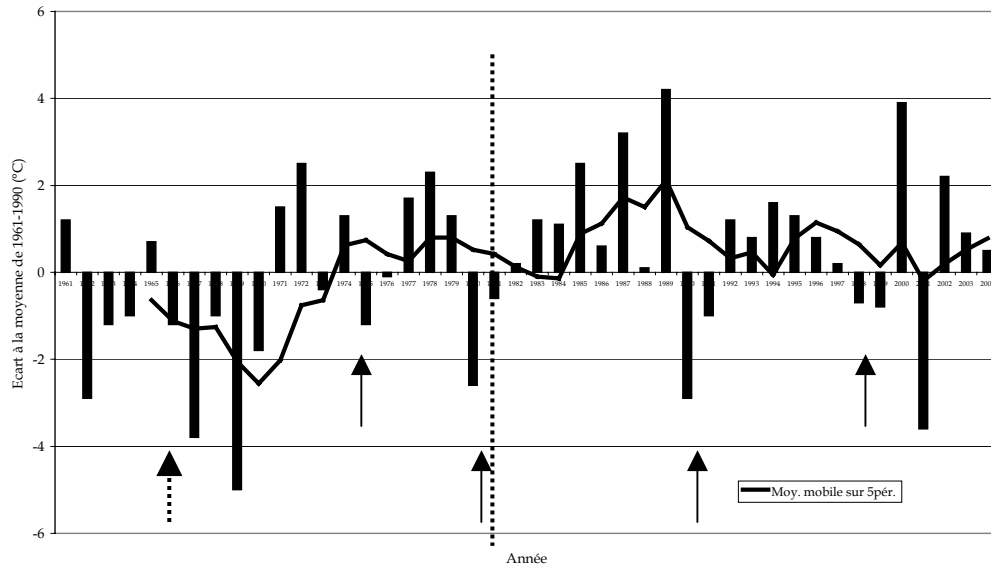
Les tendances du réchauffement observées à l'échelle de l'hémisphère Nord, des Pyrénées et des Alpes (3.1.2.1) sont ici confirmées. La température moyenne annuelle a été de 7,6°C pour la décennie 60 et de 8,3°C pour la décennie 90. La tendance sur 40 ans montre une croissance de + 0,7°C. Les températures moyennes annuelles ont varié entre 6,7°C en 1980 et 8,1°C en 2004.

Malgré une certaine variabilité interannuelle, cinq mois présentent une augmentation thermique significative : mars, décembre, août, mai et janvier. Les évolutions sont loin d'être linéaires mais quelques tendances générales sont observées. Conformément aux usages de l'Organisation Météorologique Mondiale, le calcul des écarts à la moyenne a été réalisé sur la période de référence climatologique 1961-1990 (Com. Orale, M. BENISTON, 2005).

Dans le détail on observe :

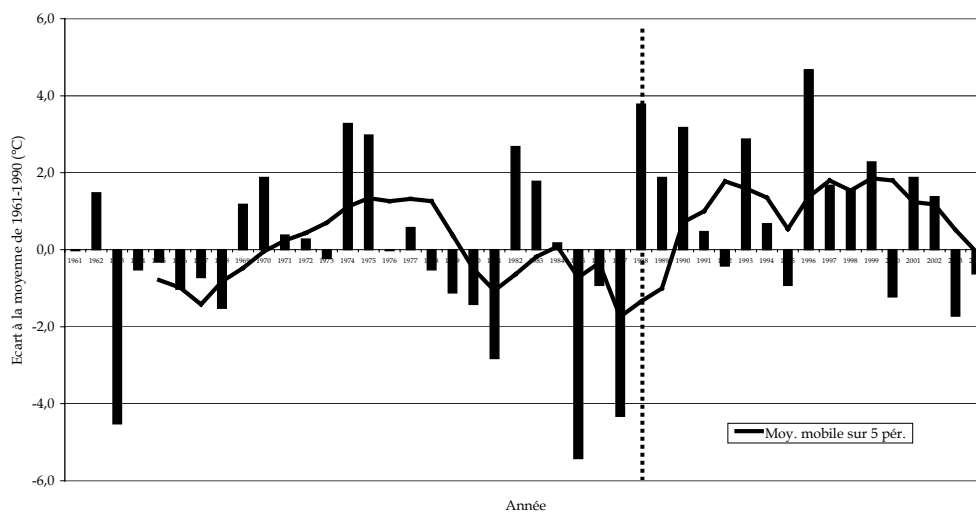
- une augmentation des températures hivernales : trois de ces cinq mois se situent au cours de la saison froide caractérisée par une fréquence/intensité importante des processus nivéo-périglaciaires (Graphiques 2, 3 et 4).

Graphique 2 : Evolution des écarts à la moyenne des températures moyennes mensuelles de décembre (1961-2004)



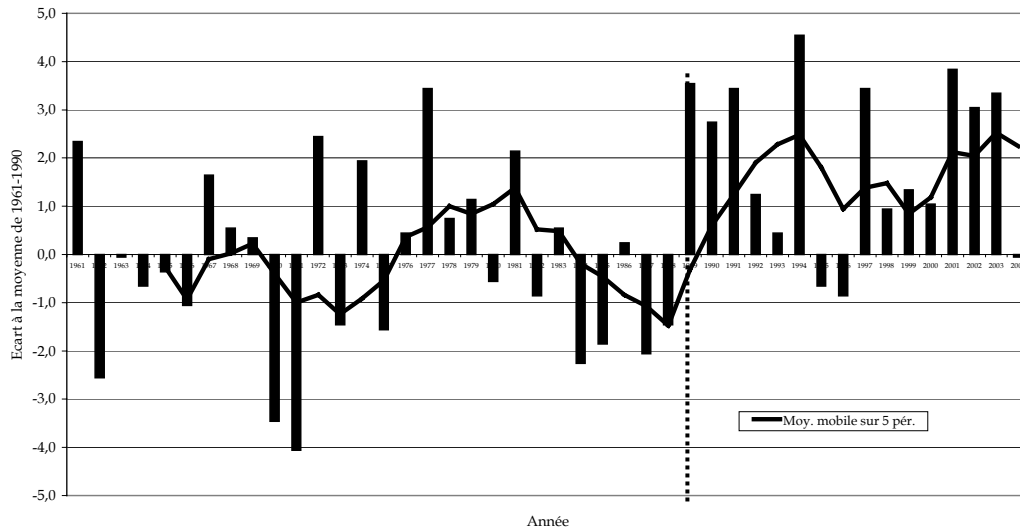
La tendance au réchauffement thermique en Chartreuse est ici confirmée pour le mois de décembre depuis le début des années 80 (ligne noire en pointillés). La variabilité interannuelle illustre parfaitement le phénomène. Le nombre de mois de décembre froids a fortement diminué depuis les années 60. Sur la période 1961-1970, la station enregistre un mois de décembre plutôt froid chaque année (flèche noire en pointillés), depuis 1970 les données montrent des cycles de 2 à 3 années, où le mois décembre a été plus froid, environ tous les 10 ans (flèches noires).

Graphique 3 : Evolution des écarts à la moyenne des températures moyennes mensuelles de janvier (1961-2004)



Le mois de janvier présente une variabilité interannuelle caractérisée par une alternance d'années froides et chaudes, sur des périodes de 3 à 6 ans, jusqu'au seuil (ligne noire en pointillés) correspondant à la fin des années 80 (1988) où le nombre de mois de janvier froids diminue fortement, en récurrence et en température.

Graphique 4 : Evolution des écarts à la moyenne des températures moyennes mensuelles de mars (1961-2004)

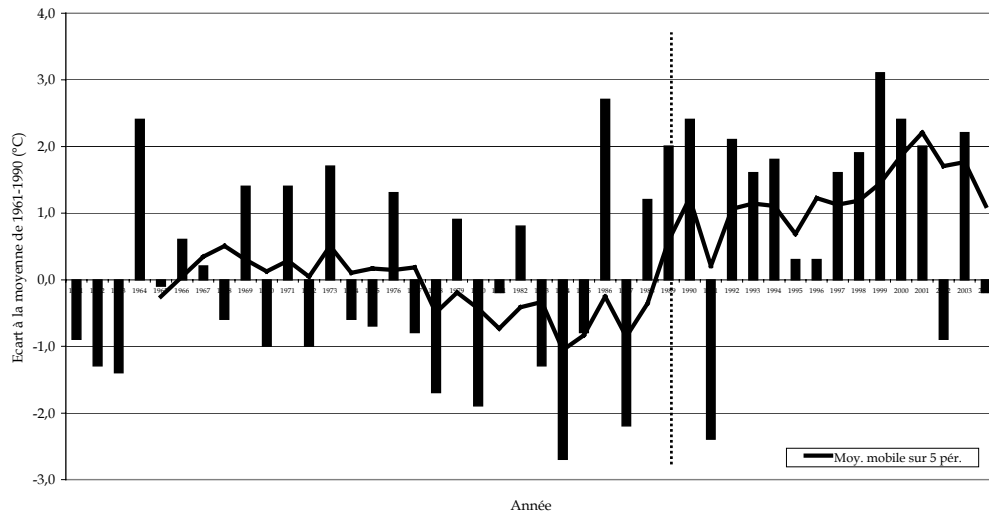


Pour le mois de mars, la tendance générale est proche de celle observée pour le mois de janvier avec cependant une succession d'années froides plus nombreuses jusqu'au milieu des années 70 et des années 80. Un changement « brutal » s'est opéré en 1989, la tendance au réchauffement est plus marquée que pour les mois précédents. Depuis la fin des années 80, les mois de mars sont assez chauds.

Ainsi, la température moyenne est passée, pour le mois de décembre de $-0,48^{\circ}\text{C}$ durant les années 60 à $1,15^{\circ}\text{C}$ durant les années 90, de $-0,54^{\circ}\text{C}$ à $1,73^{\circ}\text{C}$ pour janvier et de $2,78^{\circ}\text{C}$ à $4,42^{\circ}\text{C}$ pour mars. Le mois de mars, période de transition entre le régime hivernal et printanier, enregistre la plus forte augmentation des températures. Si cette tendance se poursuit, elle pourrait jouer un rôle important dans la modification des conditions nivales et végétatives printanières (réduction de la durée du manteau neigeux, déclenchement d'une phase de croissance plus précoce chez les végétaux...).

- une augmentation des températures printanières : augmentation significative surtout au mois de mai, en fin de printemps (Graphique 5). Cela devrait être favorable à la végétation et notamment aux espèces en début de période végétative mais aussi celles en milieu ou en fin de période qui verraient celle-ci certainement s'allonger.

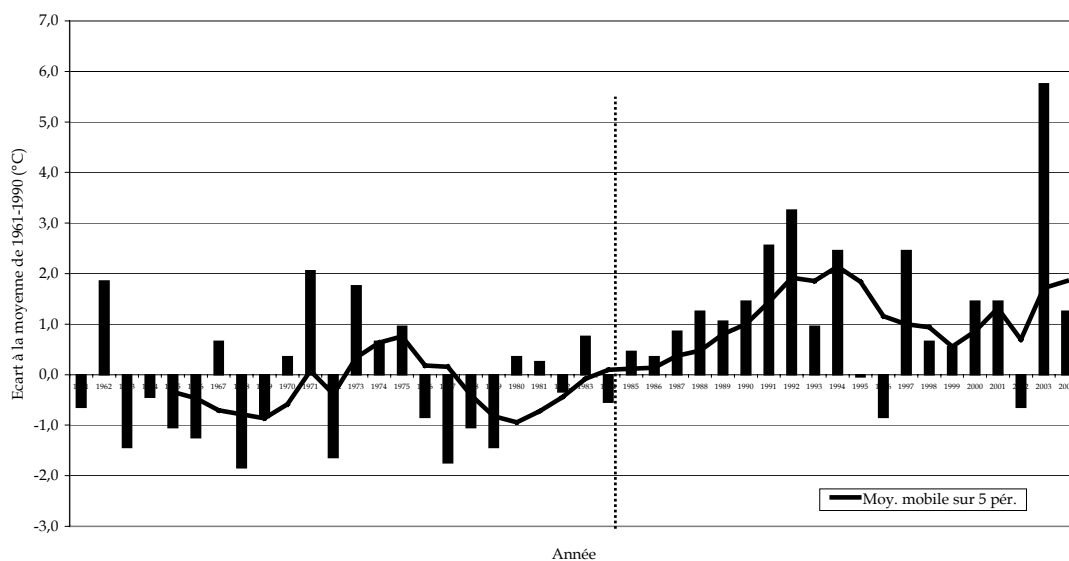
Graphique 5 : Evolution des écarts à la moyenne des températures moyennes mensuelles de mai (1961-2004)



Pour le mois de mai, l'alternance d'années fraîches et chaudes et assez régulière du milieu des années 60 jusqu'à la fin des années 80 (seuil). Les mois de mai sont beaucoup plus chauds depuis 1988. La température moyenne du mois de mai est passée de 10,13°C au cours de la décennie 60 à 11,4°C au cours de la décennie 90.

- une augmentation des températures estivales : très marquée au mois d'août (Graphique 6). Des étés plus chauds favoriseraient un stress hydrique important et augmenterait la xéricité des milieux et notamment des talus d'éboulis. Le développement de certaines espèces végétales telles que les mésoxérophytes et les xérophytes serait favorisé.

Graphique 6 : Evolution des écarts à la moyenne des températures moyennes mensuelles d'août (1961-1990)

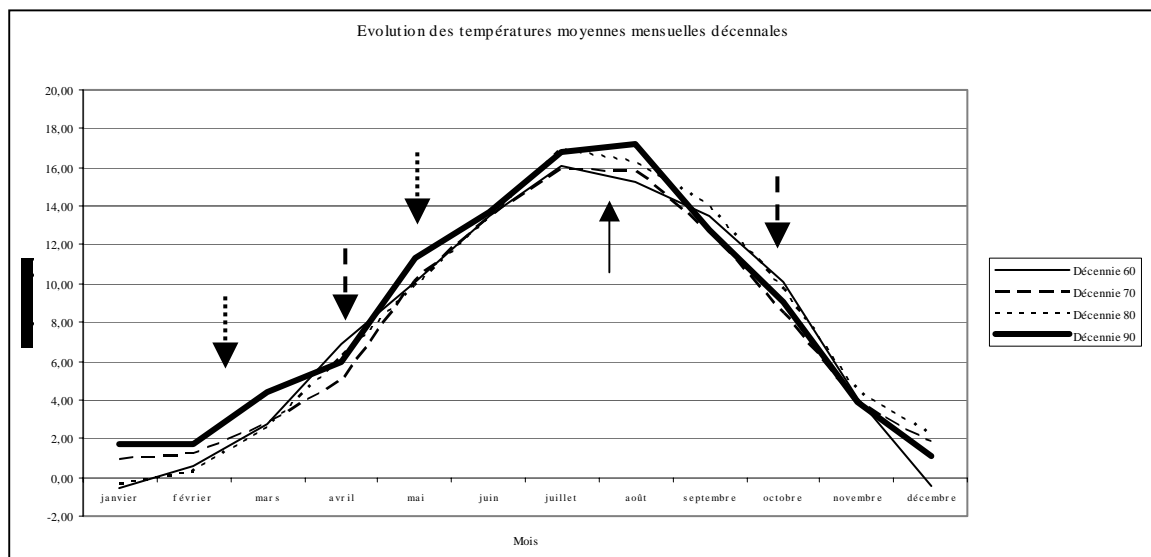


Les mois d'août sont plus chauds notamment depuis 1986. La canicule de 2003 a été parfaitement enregistrée.

La température moyenne du mois d'août est passée de 15,29°C au cours des années 60 à 17,2°C au cours des années 90 soit une augmentation de 2°C. L'année 2003 a été la plus chaude depuis 1961. Selon BENISTON (2004a) et BENISTON et DIAZ (2004), la vague de chaleur qui a affecté une grande partie de l'Europe en 2003 « a eu lieu 50 ans trop tôt » et souligne que cela annonce les conditions que l'on peut attendre pour la fin de ce siècle.

L'analyse des données décennales montre que la décennie 90 est la plus chaude depuis 1961 (Graphique 7).

Graphique 7 : Evolution des températures moyennes mensuelles décennales



Les mois d'été présentent une tendance continue au réchauffement (flèche noire). Les mois hivernaux et printaniers sont globalement plus chauds (flèches noires en pointillés). Seuls le mois d'avril, et la période automnale enregistrent des évolutions inverses (traits d'union).

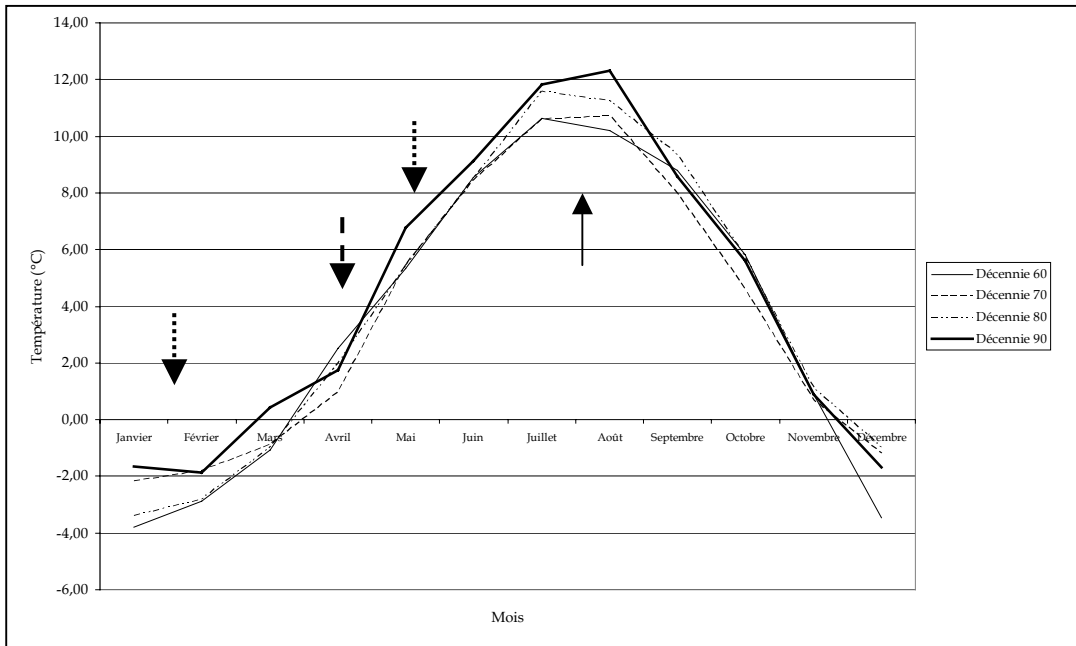
Cette tendance est confirmée par l'analyse des températures moyennes mensuelles des minima et des maxima journaliers (Graphique 8 et 9).

B. Températures minimales et maximales

L'analyse des séries montre une augmentation des températures moyennes annuelles et mensuelles des minima et des maxima journaliers sur 40 ans. L'augmentation thermique révélée par les mois de décembre, janvier et mars pour la période hivernale, mai pour la fin de la période printanière et août pour la période estivale est ici confirmée (Graphiques 8 et 9).

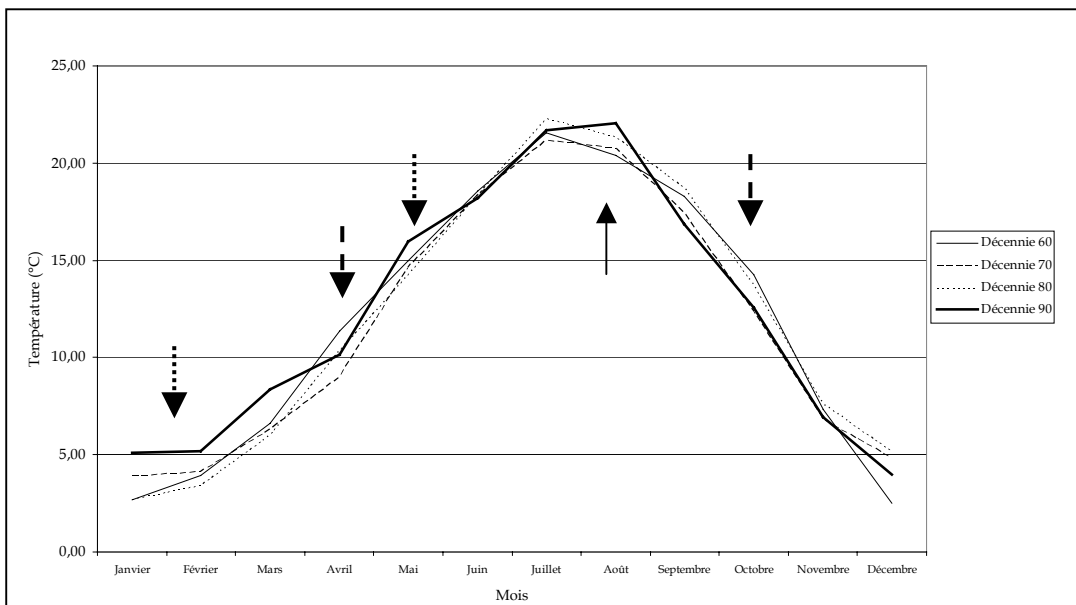
- La température moyenne annuelle des minima journaliers a été de 3,46°C pour la décennie 60 et de 4,34°C pour la décennie 90. La tendance sur 40 ans indique une croissance de + 0,8°C. Les températures moyennes annuelles des minima journaliers ont varié entre 2,6°C en 1962 et 5,4°C en 1994. Le réchauffement est surtout marqué pendant la période hivernale et secondairement en fin de printemps et en été. Pour les mois d'automne, la tendance est identique pour les décennies 60 et 90.

Graphique 8 : Evolution des températures moyennes mensuelles des minima journaliers par décennie



• La température moyenne annuelle des maxima journaliers a été de 11,88°C durant les années 60 et de 12,25°C au cours des années 90. Soit, une croissance de +0,37°C sur 40 ans. Les valeurs ont varié entre 10,51°C en 1980 et 13,56°C en 1997.

Graphique 9 : Evolution des températures moyennes mensuelles des maxima journaliers par décennie



Le réchauffement est surtout marqué en fin de printemps, en été (août surtout) et en hiver. Le mois d'avril et la saison automnale montrent une évolution inverse avec une tendance au refroidissement pour la décennie 90.

La récente augmentation des températures moyennes journalières, s'est accompagnée d'une augmentation plus rapide des minima journaliers que des maxima. Cela implique une diminution

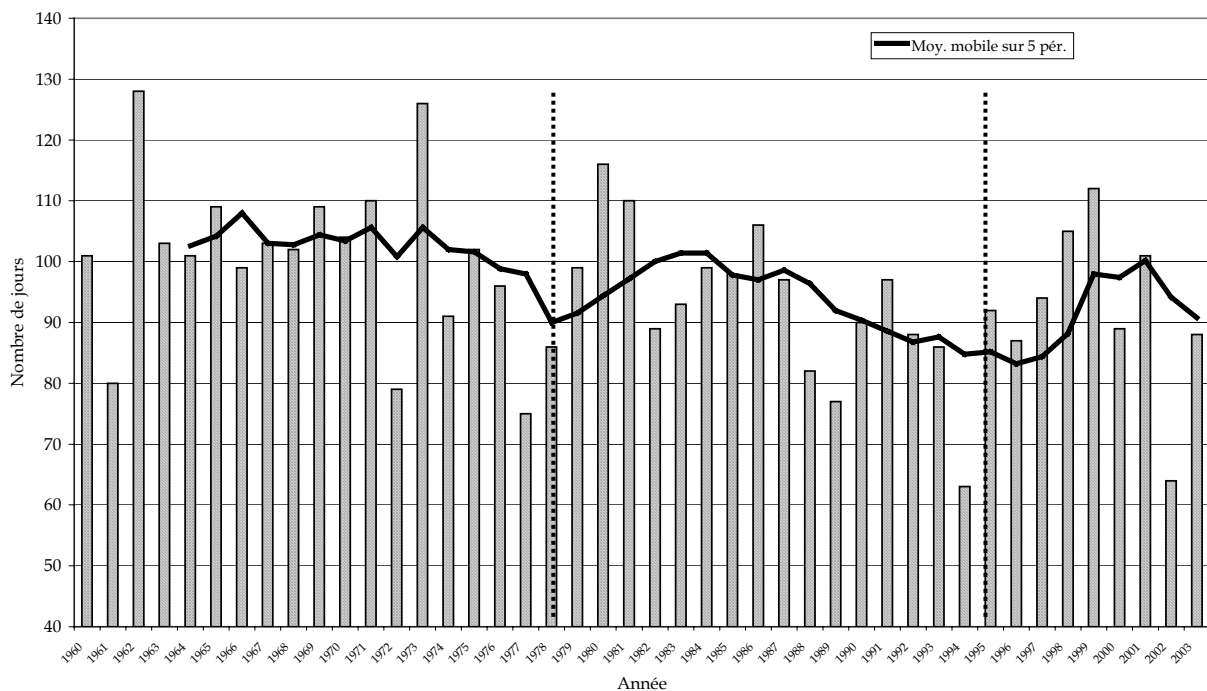
de l'amplitude du cycle diurne et confirme l'influence de l'augmentation de l'effet de serre sur les températures nocturnes (minima).

Cette tendance s'accompagne de modifications sensibles dans l'activité du gel.

C. Une diminution dans la fréquence et l'intensité du gel

L'analyse des données met en évidence une diminution du nombre annuel de jours de gel (Graphique 10), surtout les gels forts ($T_{\min} \leq -10\text{ °C}$), sur la période 1960-2003 avec en moyenne 103 jours pour la décennie 60 et 91 jours pour la décennie 90. Il y a eu 96 jours annuel de gel en moyenne au cours des 40 dernières années. Le nombre annuel de jours de gel enregistre une diminution de 12 jours sur 40 ans.

Graphique 10 : Evolution du nombre annuel de jours de gel moyen sur la période 1960-2003



Cette diminution devrait avoir une incidence sur les processus périglaciaires et notamment sur l'intensité et la fréquence de la gélifraction des corniches urgoniennes (3.2.1). De plus, celle-ci est supposée correspondre à une augmentation en nombre de jours équivalent, de la période végétative car lorsque la température minimale quotidienne passe au-dessus de 0 °C , la température moyenne quotidienne passe presque simultanément au-dessus de 5 °C dans les Alpes du Nord, valeur, « indicative », considérée par les biologistes (RICHARD et PAUTOU, 1982; KÖRNER *et al.*, 2003) comme le seuil de démarrage pour la majorité des végétaux (surtout les arbres) (3.2.2.).

• Une légère diminution des alternances gel/dégel

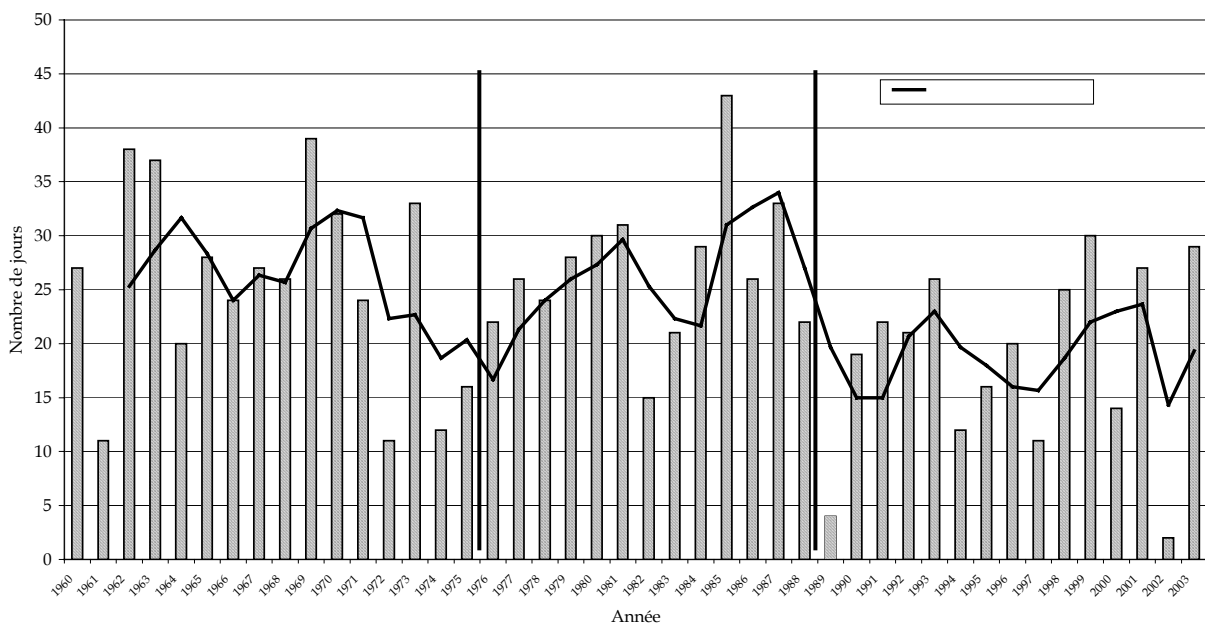
Le nombre d'alternances gel/dégel est passé de 80 jours en moyenne au cours de la décennie 60 à 77 pour la décennie 90. Pour la décennie 60, les périodes à alternance gel/dégel sur la journée sont les plus nombreuses (88 périodes). Suivent ensuite les périodes de deux jours consécutifs (66 périodes) puis 3 jours consécutifs (37 périodes) et enfin 4 jours consécutifs (29 périodes). Pour la décennie 90, les valeurs observées sont légèrement inférieures à celles de la décennie 60. Les alternances gel/dégel journalières, sont aussi les plus nombreuses (86 périodes). Viennent ensuite

les périodes de deux jours consécutifs (50 périodes), puis de trois jours (33 périodes) et enfin de 4 jours (28 périodes). Les types de périodes sont identiques pour les deux décennies et seul le nombre de périodes a légèrement diminué à cette altitude (945 m).

• Une diminution du nombre de jours de gel continu

Cette tendance est confirmée par la diminution enregistrée au niveau du nombre moyen de jours de gel continu qui est passé de 28 dans les années 60 à 20 dans les années 90 (Graphique 11). La décennie 60 totalise 92 périodes de gel continu, dont 39 périodes de gel continu journalier, 14 périodes de jours de gel consécutifs sur 2 journées, 11 périodes sur 3 jours et 8 périodes sur 4 jours. La décennie 90 enregistre une réduction notable du nombre de jours de gel continu et totalise 74 périodes. 23 périodes de jours de gel continu (sur 1 jour), 21 périodes de jours de gel continu sur 2 jours, 11 périodes sur 4 jours (tendance inversée) et 8 périodes sur 3 jours.

Graphique 11 : Evolution du nombre annuel de jours de gel continu sur la période 1960 – 2003 (moyennes)



Cela s'est bien évidemment traduit par une augmentation du nombre moyen de jours sans gel : 257 pour les années 60 et 268 pour les années 90.

• Une augmentation de la durée de gel

Selon **l'intensité du froid** on distingue :

• Une diminution très marquée du nombre de jours de gel fort ($T_{min} \leq -10\text{ °C}$)

11 jours annuels de gel fort en moyenne dans les années 60 contre 4 dans les années 90. Les données moyennes mensuelles révèlent une diminution significative du nombre de jours de gel fort pour les mois de décembre, janvier et février (Tableau 3). A cette altitude (945 m), les jours de gel fort sont peu nombreux à certaines périodes de l'année, ce qui explique le choix de ne pas comptabiliser les mois de mars et novembre, qui présentent des valeurs faibles mais qui enregistrent quand même une légère diminution (importance pour la durée de la période végétative).

Tableau 3 : Evolution du nombre de jours de gel fort (moyennes)

Mois	Années 60	Années 90
Janvier	4	1
Février	3	1
Décembre	3	1

- Une légère diminution du nombre de jours de gel moyen ($-5\text{ °C} \geq T_{\min} > -10\text{ °C}$)

25 jours annuels de gel moyen au cours des années 60 contre 22 pour les années 90. Les variations sont peu significatives (+ ou -1 jours), elles ne seront pas développées.

- Une stabilité du nombre de jours de gel faible ($0\text{ °C} \geq T_{\min} > -5\text{ °C}$)

Il y avait 72 jours annuels de gel faible en moyenne dans les années 60 contre 71 dans les années 90. Les variations sont de l'ordre de + ou - un jour, elles ne seront pas développées.

L'analyse des séries climatiques montre clairement une tendance à la diminution en fréquence et en intensité des épisodes de gel. Si le nombre d'alternances gel/dégel n'est pas très pertinent, l'intensité du gel et sa durée sont des facteurs fondamentaux. Concrètement, il gèle plus tardivement, en intensité moindre et moins longtemps.

Un seuil sur les températures apparaît régulièrement autour des années 1988-1989. Celui-ci pourrait bien être lié à l'Oscillation de l'Atlantique Nord (OAN)². A ce propos, HURRELL et VAN LOON (1997 *in* BENISTON, 2003) soulignent que pour la majeure partie de l'Europe de l'Ouest et 1/3 de l'est Nord Américain, l'OAN exerce des influences significatives sur le climat. WANNER *et al.* (2001 *in* BENISTON et STEPHENSON, 2004) et BENISTON (2005) ont montré que son influence était prédominante en hiver. Pour les Alpes suisses, BENISTON et JUNGO (2002) ont mis en évidence une corrélation entre la couverture nivale (notamment sa durée) et l'index de l'OAN. En terme d'effets indirects sur l'hydrologie, les auteurs ont montré que lorsque l'indice de l'OAN est élevé, la distribution des températures hivernales (à hautes altitudes dans les Alpes > à 1000 m) a tendance à se décaler vers des valeurs plus élevées, que lorsque l'indice OAN est faible. Par conséquent, la fréquence des températures qui excèdent le point de gel au cours de l'hiver est plus que doublée, cela a tendance à accroître la fonte des neiges précoce.

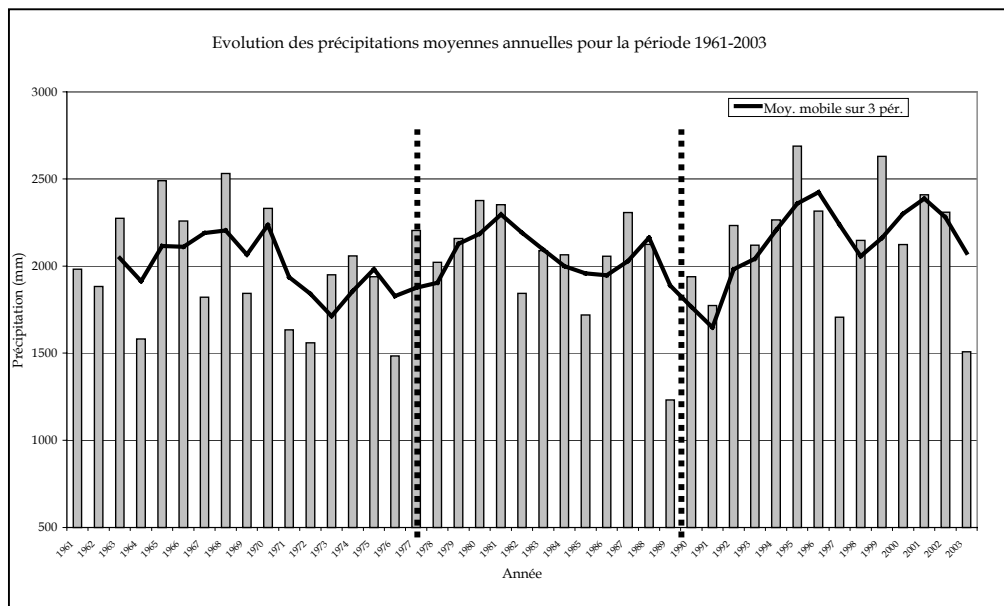
Les résultats des analyses concernant les précipitations sont moins significatifs.

3.1.3.2. Les précipitations

Les modèles généraux indiquent une augmentation probable des précipitations dans l'hémisphère Nord. En Chartreuse, les précipitations annuelles n'enregistrent pas de changement notable depuis les années 60 (tendance générale 3.1.2.2.), sinon une légère augmentation à partir des années 90 (Graphique 12).

² « L'OAN consiste en variations opposées de la pression barométrique près de l'Islande et près des Açores. En moyenne, un courant de l'Ouest, entre la zone de basse pression de l'Islande et la zone de haute pression des Açores, pousse des cyclones et leurs systèmes frontaux associés vers l'Europe. Cependant, la différence de pression entre l'Islande et les Açores fluctue sur des échelles temporelles allant de jours à des décennies, et peut quelques fois être inversée. C'est le mode dominant de variabilité climatique hivernale dans la région de l'Atlantique Nord, allant du centre de l'Amérique du Nord à l'Europe » (GIEC, 2001).

Graphique 12 : Evolution des précipitations moyennes annuelles sur 40 ans (1961-2003)



En terme décennal, les valeurs ont diminué pour la décennie 60 et légèrement augmenté entre 1970 et 2001. De 2073,8 mm pour les années 60, elles sont passées à 1934,8 mm pour les années 70 puis à 2016,6 mm pour les années 80 et enfin à 2182 mm pour les années 90. Soit, une petite augmentation d'environ 200 mm, depuis les années 60, mais la variabilité interannuelle incite à la prudence. En terme d'année extrême, cette station a connu un minimum pluviométrique en 1989 (1232,1 mm) et un maximum en 1995 (2688,1 mm).

En ce qui concerne les précipitations saisonnières moyennes, la Chartreuse connaît quelques évolutions remarquables entre 1961 et 2003.

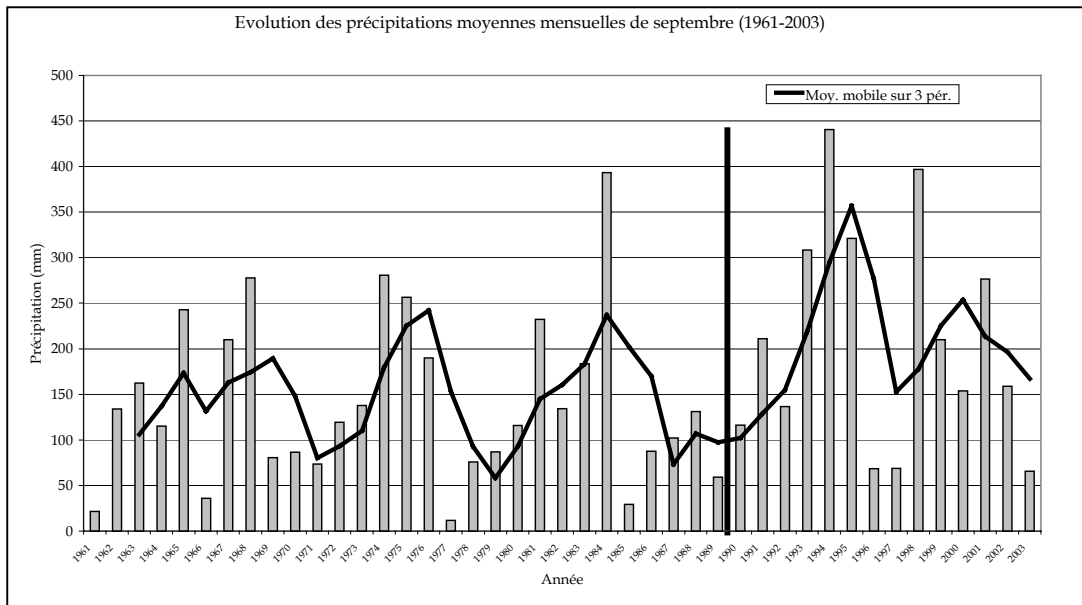
- Printemps (mars, avril et mai) : il s'agit de la saison la plus arrosée. La moyenne des précipitations printanières sur la période 1961 et 2003 est de 540,3 mm. On observe une diminution moyenne des précipitations pour le mois de mars et une stagnation pour les mois d'avril et mai.

Cette tendance est confirmée par l'analyse décennale qui ne montre pas d'évolution significative : les précipitations ont légèrement diminué entre les années 60 (571,50 mm) et les années 90 (522,96 mm). Les valeurs intermédiaires sont de 551,38 mm pour les années 70 et 568,45 mm pour les années 80.

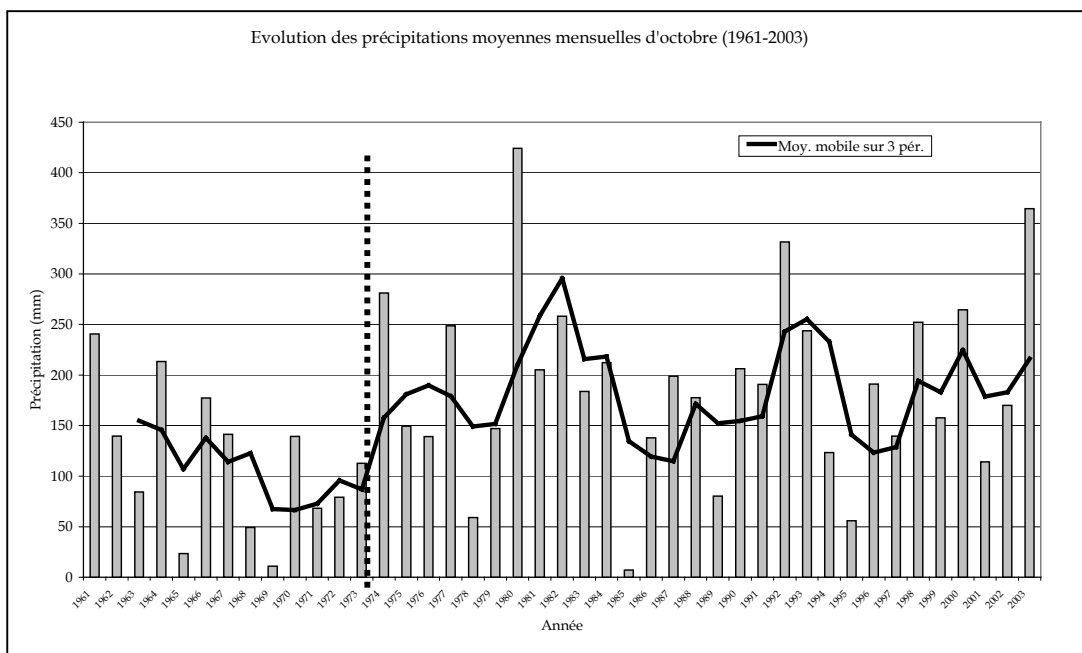
- Été (juin, juillet et août) : la moyenne des précipitations estivales sur la période 1961-2003 est de 471,7 mm. Les précipitations ont légèrement augmenté au mois de juin, stagné en juillet et diminué en août. On note une baisse relative, d'environ 70 mm, entre les années 60 (498,52 mm) et les années 80 (429,67 mm), puis une hausse d'environ 60 mm jusqu'aux années 90 (493,17 mm); saison la plus sèche.

- Automne (septembre, octobre, novembre) : la moyenne des précipitations automnales sur la période 1961-2003 est de 525,6 mm. Les précipitations automnales ont augmenté de manière significative en 40 ans. Ce sont surtout les mois de septembre (Graphique 13) et d'octobre (Graphique 14) qui enregistrent la plus forte hausse.

Graphique 13 : Evolution des précipitations moyennes mensuelles de septembre (1961-2003)



Graphique 14 : Evolution des précipitations moyennes mensuelles d'octobre (1961-2003)

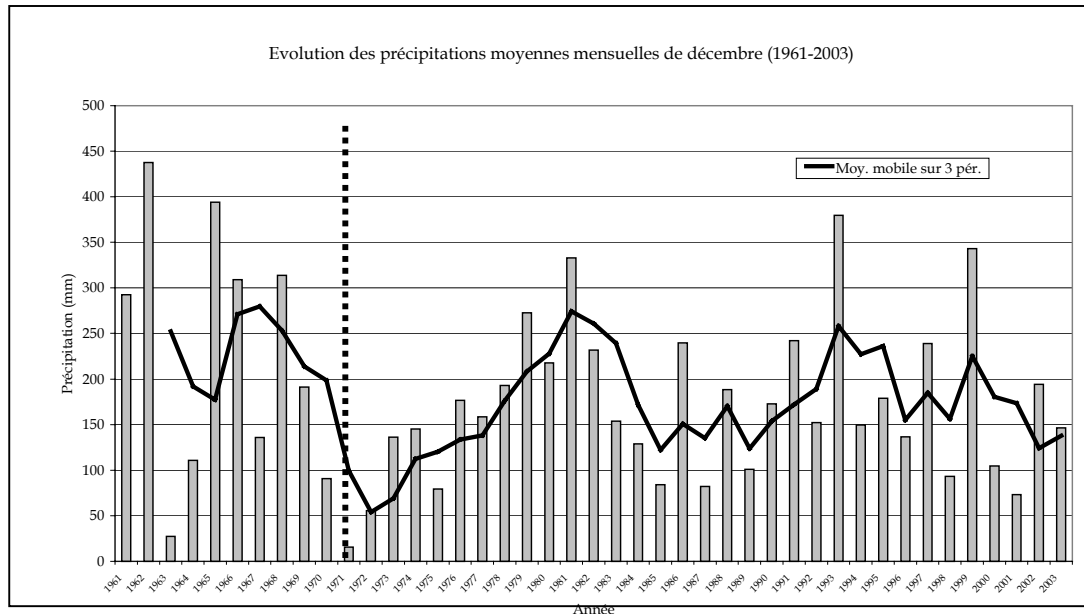


Les précipitations ont augmenté d'environ 193 mm entre les années 60 (443,28 mm) et les années 90 (636,46 mm). La tendance montre une diminution des valeurs pour la décennie 60 et une légère augmentation des précipitations à partir de 1973.

- Hiver (décembre, janvier et février) : la moyenne des précipitations hivernales sur la période 1961-2003 est de 517 mm. La tendance est caractérisée par une légère réduction des précipitations au mois de décembre (Graphique 15).

L'analyse des moyennes décennales montre une légère diminution des précipitations entre les années 60 (560,54 mm) et les années 90 (529,45 mm). Les valeurs intermédiaires confirment cette diminution : 480,82 mm dans les années 70 et 534,58 dans les années 80. Cette tendance est loin d'être linéaire lorsque l'on s'intéresse aux données mensuelles (Graphique 15).

Graphique 15 : Evolution des précipitations moyennes mensuelles de décembre (1961-2003)



L'allure générale de la courbe des moyennes mobiles est assez proche de celle observée pour le mois d'octobre. Les précipitations ont fortement diminué à partir de la fin des années 60 et jusqu'au début des années 70 (seuil en 1973). Sans toutefois dépasser les valeurs des autres décennies, la décennie 70 enregistre une forte progression avec un pic visible au début des années 80 (1981). Cette évolution « pyramidale » se poursuit sur les décennies suivantes et notamment sur la décennie 90 qui enregistre certaines années des moyennes comparables à celles des années 60 (1993 et 1999).

Finalement, en été, les précipitations ont diminué d'environ 70 mm entre les années 60 et 80 puis ont augmenté ensuite d'environ 60 mm jusqu'aux années 90. En automne, les années 90 sont plus arrosées que les décennies précédentes. Et enfin, en hiver, elles ont légèrement diminué surtout en début de saison.

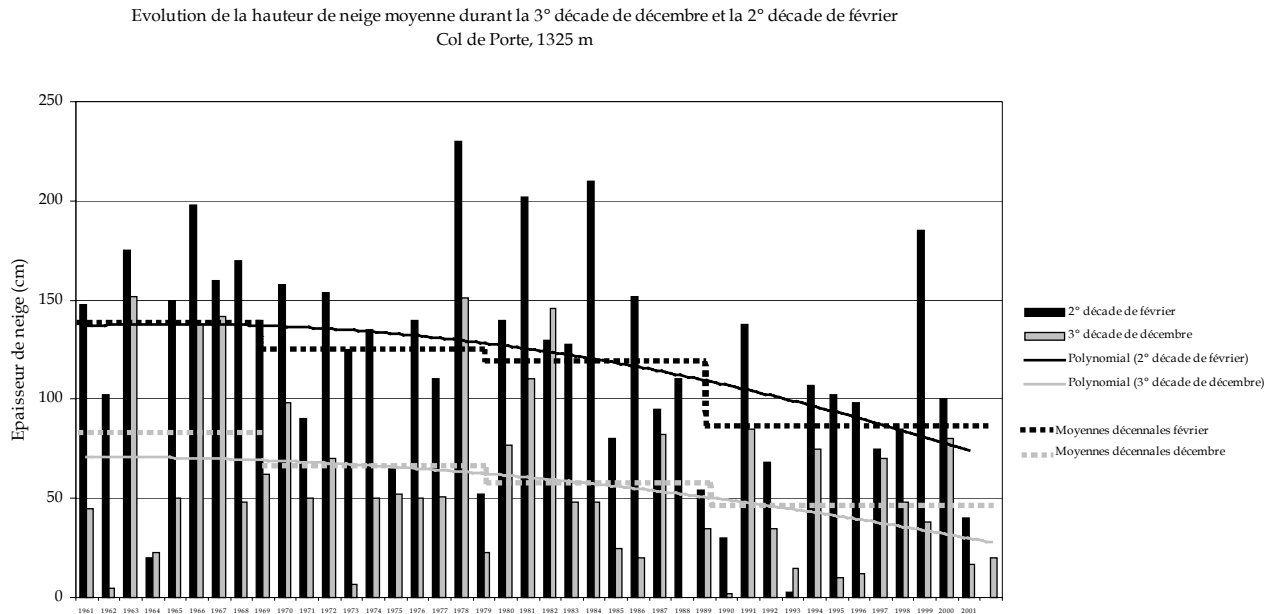
3.1.3.3. L'enneigement

Les modèles CROCUS et SAFRAN de Météo-France prévoient, dans l'hypothèse d'un doublement de CO₂ d'ici 2050, une réduction de moitié de l'enneigement dans les Alpes (3.1.2.3.). Cette réduction est déjà bien amorcée en Chartreuse. L'analyse des données du laboratoire Météo-France du Col de Porte, situé à 1325 m d'altitude, confirme la forte variabilité naturelle de l'enneigement, mais révèle également une diminution progressive du manteau neigeux au cours des 40 dernières années. Le réchauffement hivernal a influencé le coefficient de niviosité³. Les précipitations solides représentent à peine ¼ de la lame d'eau annuelle précipitée répartie sur environ 6 mois, et bien que le tapis nival soit constitué et entretenu de novembre à février, les neiges de printemps (mars et avril) sont plus aléatoires.

³ Part de la lame d'eau issue de la neige par rapport à celle totale sur l'année.

Les séries du Col de Porte montrent que, depuis la fin des années 80, les hivers sont plus doux et souvent peu enneigés à moyenne altitude (Graphique 16)⁴.

Graphique 16 : Evolution de la hauteur de neige moyenne sur la période 1961-2002 (Col de Porte) d'après Météo-France (2002)



Dans le détail on observe :

- 3^eme décennie de décembre : une diminution progressive du manteau neigeux de l'ordre de 34 cm, soit 45 à 50% au cours des 40 dernières années. La hauteur de neige moyenne au sol est passée de 76 cm pour la décennie 60 à 58 cm pour la décennie 70 puis 51 cm pour la décennie 80 et 42 cm pour la décennie 90.

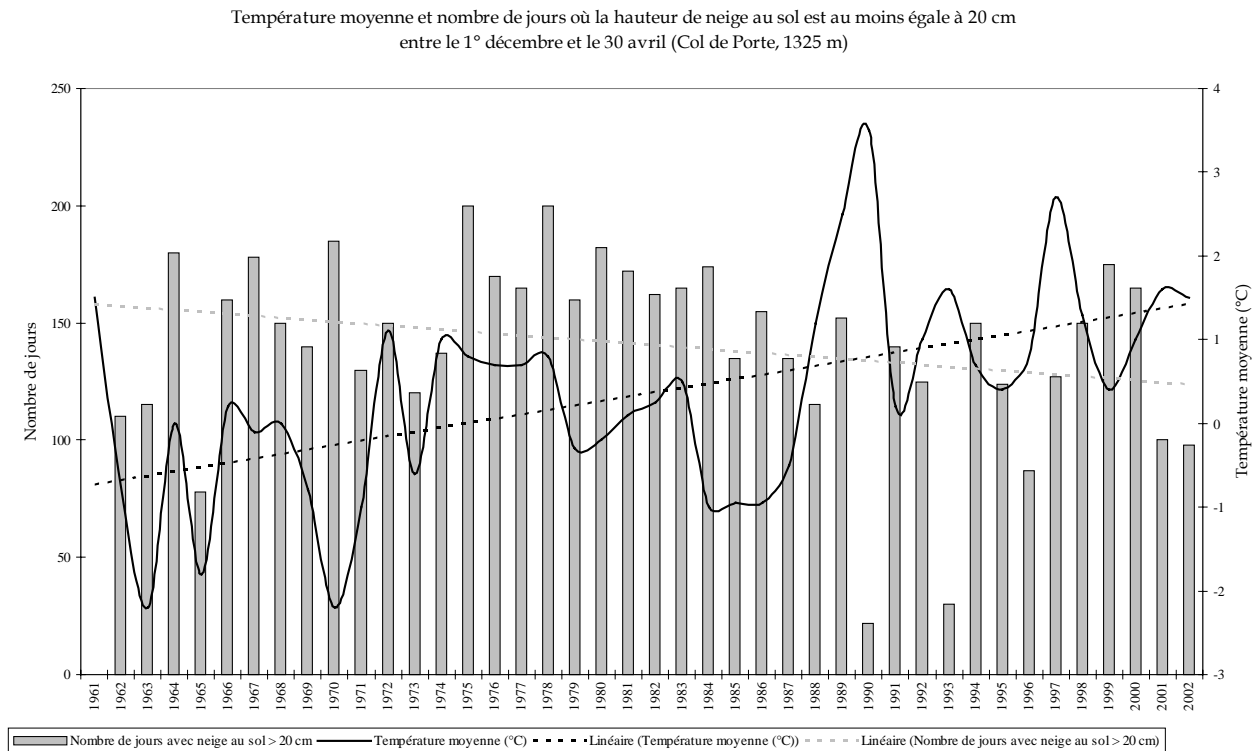
- 2^eme décennie de février : une diminution progressive du manteau neigeux de l'ordre de 50 cm, soit 35 à 40% au cours des 40 dernières années. La hauteur de neige moyenne au sol était de 142 cm pour la décennie 60, 124 cm pour la décennie 70, 119 cm pour la décennie 80 et 87 cm pour la décennie 90.

Deux autres indicateurs confirment cette tendance (Graphique 17) :

- une diminution de la durée au cours de laquelle le manteau neigeux au sol dépasse 20 cm;
- une augmentation des températures hivernales moyennes.

⁴ Nous avons repris, modifié et adapté une étude Météo-France réalisée en 2002 (<http://www.meteo-france.fr>)

Graphique 17 : Température hivernale moyenne et nombre de jours où la hauteur de neige au sol est au moins égale à 20 cm au Col de Porte (1961-2002) d'après Météo-France (2002)



Cette étude Météo-France, portant sur quatre indicateurs, confirme la variabilité interannuelle de l'enneigement :

- la hauteur moyenne de neige oscille entre 2 cm et 2.08 m.
- la tendance est à la diminution de l'enneigement entre le début de l'hiver (décembre) et le début du printemps (avril).
- les moyennes calculées sur la période 1990-2002 sont inférieures de 20 à 30% à celles calculées entre 1960-2002.
- le nombre d'hivers présentant un faible enneigement a augmenté depuis la fin des années 80, surtout les hivers 1990 et 1993.
- les hivers avec un enneigement abondant se situent entre le milieu des années 60 et le milieu des années 80.

Cette tendance est confirmée par les données provenant de la station de ski de Saint-Pierre-de-Chartreuse (la Scia, 1730 m), où l'on comptabilisait une hauteur cumulée moyenne de neige de 7,8m dans les années 60 contre 5,6 dans les années 90 avec un régime de chutes de neige de plus en plus séparées par des épisodes de redoux pluvieux au cœur de l'hiver (POULIN, 1994).

Un réchauffement climatique en Chartreuse, favorable à la dynamique de la végétation entre 1000 et 2000 m, ne confirme pas *ipso facto* l'hypothèse d'un ralentissement des processus nivéo-périglaciaires intervenant dans l'éboulisation des corniches urgoniennes et la géodynamique de surface des talus d'éboulis. Cependant, des mesures effectuées en corniche entre 1994 (POULIN) et 1997 (GERVAISE) et quelques données morphodynamiques au niveau des talus d'éboulis permettent de valider cette hypothèse (troisième partie).

3.1.4. Conclusion

Le réchauffement climatique, observé à l'échelle globale et des Alpes est attesté en Chartreuse depuis la fin des années 80.

Les printemps et les étés sont plus chauds et les hivers plus doux. La réduction de l'enneigement (en début d'hiver et en début de printemps), des périodes de gel et de l'intensité du gel (gel fort, alternances gel/dégel et gel continu) et l'augmentation thermique des maxima mais surtout des minima seraient théoriquement plutôt favorables (KÖRNER *et al.*, 2003) à la végétation (allongement de la période végétative et démarrage plus précoce) et défavorables aux processus nivéo-périglaciaires. Nous tenterons de préciser ces aspects (troisième partie, Chapitre 8) grâce à l'installation d'une station météorologique à 1647 m sur un tablier d'éboulis. L'étude saisonnière portera sur la période végétative et l'enneigement hivernal (et en début de printemps) ainsi que sur la géodynamique de surface. Les données collectées seront mises en relation avec les processus morphodynamiques mesurés, dans l'optique d'établir des chroniques révélant l'ampleur et la rythmicité morphoclimatique saisonnières et annuelles de l'érosion nivéo-périglaciaire. Cette mise en relation des mesures morphodynamiques et microclimatiques devrait permettre l'élaboration de scénarios d'évolution à l'échelle de la station (au sens écologique du terme) et de la placette et sur un pas de temps court, extrapolés avec toutes les réserves nécessaires à une période plus longue.

Les connaissances restent insuffisantes sur les réponses des zones soumises aux processus nivéo-périglaciaires et à leur potentielle colonisation végétale. On peut penser, au vu de l'analyse proposée précédemment, que leur réduction en terme de fréquence et d'intensité ainsi que l'allongement de la période végétative auront pour incidence une colonisation végétale des talus d'éboulis en Chartreuse et un réarrangement des mosaïques biorhexistatiques. Mais cette évolution est loin d'être linéaire.

Ceci nous conduit à développer, dans les paragraphes qui suivent, les effets du réchauffement climatique (températures de l'air, précipitations, durée du gel et enneigement) sur les processus morphogéniques et la végétation en montagne, sur les périodes PAG/post-PAG et actuelle. Puis, nous aborderons rapidement les conséquences de la déprise sylvo-pastorale en montagne depuis la fin du XIX^{ème} siècle.

3.2. Les effets morphogéniques et biologiques du réchauffement climatique

3.2.1. Effets du réchauffement climatique sur les processus géomorphologiques et morphogéniques en montagne

3.2.1.1. Synthèse des travaux effectués en haute montagne

Dans les Alpes, depuis une vingtaine d'années, de nombreux travaux ont été menés sur les processus d'érosion en haute montagne alpine périglaciaire à permafrost ou nivale. Le croisement d'analyses en laboratoire et sur le terrain a permis d'approfondir les connaissances sur les mécanismes qui régissent le fonctionnement de ces processus. Les travaux sur les chutes de pierres, les avalanches de neige humide (FRANCOU, 1988; COUTARD et FRANCOU, 1989; ROVERA, 1990, 1997; JOMELLI, 1997, 1999; JOMELLI et FRANCOU, 2000; ROVERA et NATON, 2000; JOMELLI et BERTRAN, 2001; PECH et JOMELLI, 2001) ou les debris flows (VAN STEIJN *et al.*, 1988; NIEUWENHUIZEN et VAN STEIJN, 1990; VAN STEIJN *et al.*, 1995) constituent quelques exemples. Ces travaux ont permis d'identifier le rôle que jouent les caractéristiques climatiques ou le contexte morphostructural sur le fonctionnement des différents processus morphogéniques. Plus récemment, certaines recherches sur la dynamique des versants ont été conduites sur le réchauffement climatique depuis la fin du Petit Age Glaciaire. Ces études portent essentiellement sur les debris flow en Europe du Nord (INNES, 1983; LUCKMAN, 1992; RAPP, 1995; NYBERG et RAPP, 1998) et dans les Alpes (EYBERGEN et IMESON, 1989; ZIMMERMAN et HAEBERLI, 1992; HAEBERLI *et al.*, 1993; EVAN et CLAGUE, 1994; REBETEZ *et al.*, 1997; HAEBERLI et BENISTON, 1998; JOMELLI, 1999; CHOCHILLON, 2002; JOMELLI *et al.*, 2003).

Peu d'études ont abordé l'évolution des talus d'éboulis dans le contexte climatique récent et encore moins en moyenne montagne. Comme le soulignait justement JOMELLI (2000), l'étage nivéo-périglaciaire est un étage morphoclimatique délaissé. L'essentiel des travaux consacrés à la dynamique des versants et au PAG dans les Alpes a été mené soit dans l'étage glaciaire soit à des altitudes beaucoup plus basses, dans les vallées. Ainsi, entre 1500 et 2500 m, l'étage intermédiaire dit infra-périglaciaire (CHARDON, 1984) a été délaissé, en raison des méconnaissances qui existaient jusqu'à aujourd'hui sur les processus et leurs dépôts.

3.2.1.2. Synthèse des travaux effectués dans l'étage nivéo-périglaciaire

Dans les Alpes françaises, les travaux consacrés à la dynamique des versants sur la période PAG/Post PAG à cette tranche d'altitude sont donc rares. Signalons tout au plus des recensements d'évènements catastrophiques menés dans différents secteurs des Alpes (COUREL et DELAUNAY, 1980; FANTHOU, 1994; LAHOUSSE, 1996). Les réponses des processus aux changements climatiques enregistrés depuis le PAG ne sont pas identifiées. Pourtant, des travaux menés en Europe (GROVE, 1972; RAPP, 1986; NYBERG et LINDH, 1990; McCARROLL *et al.*, 1995; HESTNES et SANDERSEN, 1987) ou sur d'autres continents (WHITEHOUSE et SAVENEY, 1983; HETU, 1990; HETU et GRAY, 2000) montrent que l'activité de certains processus, en terme d'intensité et de fréquence, a connu un « paroxysme » d'activité au PAG, suivi d'une accalmie morphogénique. Dans les Alpes françaises, peu d'études ont été menées sur ce thème. Ainsi, JOMELLI (1997, 1999) met en évidence sur des dépôts de pentes nivéo-périglaciaires des signes morphologiques traduisant une variation de l'activité des avalanches depuis la fin du PAG. Dans le même sens, des recherches réalisées en Chartreuse, dans l'Oisans et les Ecrins mettent en valeur une tendance biostasique depuis la fin du PAG, sur talus d'éboulis (ARQUES, 1999; ARQUES *et al.*, 2003 a, b; LAURENT, 2004) et sur dépôts détritiques polygéniques (TURC, 1998; COMBE, 2002; CORONA et ARQUES, 2002; ANDREAU, 2003) dans la tranche d'altitude 1500-2000 m.

3.2.1.3. Effets du réchauffement climatique sur le fonctionnement gravitaire et nival des talus d'éboulis en milieu nivéo-périglacière

Comme nous l'avons souligné plus haut (Introduction, § II) le milieu nivéo-périglacière est extrêmement sensible aux variations climatiques même de faible ampleur. Les talus d'éboulis de Chartreuse sont soumis aux processus géomorphologiques et morphogéniques nivéo-périglaciaires qui se manifestent essentiellement par l'action du gel et de la neige sur la roche et les substrats colluviaux.

A. Incidences sur le fonctionnement gravitaire

L'analyse des données climatiques sur la période 1961-2004 met en évidence en Chartreuse, outre une augmentation des températures, une nette diminution dans la fréquence et surtout l'intensité du gel. Or, nous savons par exemple, que l'inclinaison de la paroi et l'alternance gel/dégel conditionnent la relation fréquence/intensité des chutes de pierres (FRANCOU, 1982, 1983, 1988; ROVERA, 1990; POULIN, 1994; GERVAISE, 1997). Par conséquent, le réchauffement climatique devrait avoir une influence directe sur le fonctionnement des éboulis en limitant les chutes de pierres ou en modifiant le calibre des matériaux ainsi que le transit des blocs et des débris. Nous reviendrons sur ces aspects dans la troisième partie de ce mémoire.

B. Incidences sur le fonctionnement avalancheux

Dans le cadre du programme « Gestion et impact du changement climatique », soutenu par le Ministère l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, le Centre d'Etude de la Neige (CEN) a réalisé une étude visant à évaluer l'impact du réchauffement sur le risque d'avalanche naturelle dans les Alpes (CEN, Météo France, 2000). Les chercheurs ont défini un indice quotidien d'instabilité du manteau neigeux à l'échelle d'un massif, permettant de déterminer trois niveaux de risque de déclenchement d'avalanche naturelle : « faible », « modéré » et « fort ». En hiver, cette classification donne 75% des journées en risque « faible », 15% en risque « modéré » et 10% en risque « fort ». En prenant comme hypothèse une augmentation de la température de 2°C et une augmentation des précipitations hivernales de 10%, ils ont utilisé SAFRAN-CROCUS-MEPRA¹, la chaîne opérationnelle de prévision de risque d'avalanche, pour produire des scénarios d'évolution. Ils ont pu ensuite examiner les variations de l'indice d'instabilité pour chaque massif alpin.

D'après les conclusions de cette étude, une augmentation de la température aurait plutôt tendance à limiter le risque d'avalanche. En basse et moyenne montagne, la baisse probable de l'enneigement et le raccourcissement de la « saison du blanc » devraient diminuer le risque avalancheux : les précipitations neigeuses seraient moins abondantes et le manteau neigeux évoluerait rapidement vers des structures stables. En revanche, au printemps, lors du redoux, les coulées de fonte pourraient être légèrement plus précoces et plus nombreuses. Une augmentation des précipitations aurait quant à elle un effet plutôt aggravant sur le risque d'avalanche.

Globalement, une augmentation de la température de 2°C associée à une augmentation des précipitations hivernales de 10%, diminuerait le risque d'avalanche. Cela se traduirait par une réduction du nombre de jours avec un risque d'avalanche " modéré " ou " fort " de 16% en moyenne sur l'ensemble des massifs alpins. Le tableau est toutefois contrasté : la diminution du risque est très significative pour les reliefs peu élevés du Vercors (- 34 %), de la Chartreuse (- 32 %)

¹ SAFRAN analyse les conditions météorologiques en montagne, CROCUS simule l'évolution du manteau neigeux et MEPRA analyse la stabilité du manteau neigeux.

ou des Bauges (- 26 %), mais elle est plus faible à plus haute altitude, comme dans le massif du Mont-Blanc (- 10 %), le Beaufortin (- 7 %) ou la chaîne de Belledonne (- 5 %).

Encore faut-il réaliser des distinctions entre les différents types d'avalanche. C'est ce qu'ont fait les experts du CEN, en prenant comme cas d'école le massif du Mont-Blanc. Les coulées de neige fraîche, survenant pendant ou immédiatement après une chute de flocons, voient leur risque d'occurrence baisser. En revanche, celles de fonte, qui se produisent lors des phases de redoux et surtout au printemps - et qui sont les plus nombreuses -, voient leur probabilité augmenter légèrement, en même temps que leur pic d'intensité est anticipé de quelques semaines. Les modèles, qui ne prennent en compte que les avalanches spontanées, ne disent rien, toutefois, du danger le plus redoutable en montagne : les avalanches dites " de plaques ", souvent déclenchées accidentellement par le passage d'un skieur.

En conclusion, l'impact d'un réchauffement climatique sur le risque d'avalanche naturelle au cours du siècle serait assez faible. Une étude réalisée en 1997 (« Argument de la recherche », revue de l'Institut Fédéral Suisse sur la forêt, la neige et le paysage) par le service météorologique suisse constate par ailleurs que le risque d'avalanche dans les Alpes suisses a peu varié au cours du siècle passé. De plus, Météo France souligne que la fréquence des épisodes avalancheux extrêmes, tels que la gigantesque avalanche poudreuse qui, le 9 février 1999, avait soufflé quatorze chalets dans la vallée de Chamonix et enseveli douze personnes, sont liés à des situations météorologiques extrêmes (fortes précipitations et températures basses), dont l'évolution n'est pas prévisible dans l'état actuel des connaissances. Peut être doit on dissocier ici, la fréquence et l'intensité du phénomène. La fréquence a diminué mais il existe toujours des épisodes de forte intensité et donc un risque possible.

La Chartreuse enregistre une réduction hautement significative du manteau neigeux entre 1960 et 2002, ce qui devrait limiter les avalanches de grande ampleur. Les témoignages sur les 40-50 dernières années sont rares. La Carte de Localisation Probable des Avalanches (CLPA) est incomplète et les fiches signalétiques difficiles d'accès... Nos connaissances sont minces sur l'ensemble du massif. Signalons, l'avalanche de 1132 qui a détruit le couvent de la Grande Chartreuse (BLACHE, 1931). Celle de 1978, qui a eu lieu sur le versant occidental de Chamechaude puis aux environs de 1980 près du nouveau refuge de l'Emeindras (refuge détruit puis reconstruit), malgré la présence des paravalanches. Enfin, celle de 1981, qui a détruit le Centre de Rééducation des Petites Roches (Saint-Hilaire-du-Touvet). Les observations menées en hiver et en début de fonte des neiges, au cours des quatre dernières années, montrent que, selon les talus d'éboulis considérés (talus d'éboulis occidentaux de Chamechaude, Grand Som, Grande Sure, tabliers d'éboulis de La Plagne, des « Pelloux » et cône de l'Aulp du Seuil), les avalanches atteignent rarement le front forestier situé à environ 100-150 mètres de la corniche. Ce sont essentiellement des avalanches de fonte qui ont un rôle non négligeable dans l'érosion des zones apicales à fines des talus d'éboulis.

Le manteau neigeux joue aussi un rôle dans la dissolution, le ravinement et la solifluxion car la fonte des neiges au printemps libère d'énormes volumes d'eau sur de courtes périodes. La diminution du manteau neigeux devrait limiter les processus nivo-torrentiels sur talus d'éboulis. Les observations menées en 1999 (ARQUES, 1999) et aux cours des quatre dernières années indiquent que la plupart des ravines qui disséquaient les talus d'éboulis, à l'exception des badlands marneux, ne sont plus fonctionnelles. L'analyse des photos aériennes sur la période 1956-2001 confirme cette tendance, de nombreuses ravines ont été progressivement colmatées par des matériaux ou par la végétation et les couloirs avalancheux autrefois empruntés par les eaux courantes sont aussi en voie de végétalisation. Cependant, les différents scénarios climatiques ont mis en évidence une possible recrudescence des phénomènes extrêmes et notamment

l'augmentation probable des averses de forte intensité et des précipitations. La Chartreuse est un des massifs préalpins les plus humides, dans ce contexte, une modification du régime des précipitations pourrait rompre l'équilibre actuel et peut être réactiver le fonctionnement torrentiel passé.

Ces observations sont assez générales. Il convient de les nuancer et de s'intéresser surtout, en plus des facteurs microclimatiques et topographiques, au géosystème corniche-talus d'éboulis. Ainsi, les processus s'avèrent être sensiblement différents dans le cas d'un tablier ou d'un cône, surmontés d'une corniche incisé par un couloir d'alimentation ou à sangles² étagées. Nous reviendrons sur ces aspects dans le chapitre consacré à la présentation du terrain d'étude.

En Chartreuse, la réduction de la fréquence et de l'intensité des processus nivéo-périglaciaires sur talus d'éboulis a probablement favorisé la colonisation végétale observée.

3.2.2. Effets du réchauffement climatique sur la végétation³

En montagne, les facteurs abiotiques, climatiques en particulier, et la pression partielle de CO₂, jouent un rôle plus important qu'à basse altitude. Ils gouvernent les processus biologiques et expliquent en grande partie le dynamisme de la végétation. (KÖRNER, 1994; GUIBAN *et al.*, 1996, KÖRNER *et al.*, 2003). Les incidences possibles d'une future évolution du climat sur les écosystèmes d'altitude prennent de plus en plus d'importance dans l'étude de la gestion et de la protection de la biodiversité à long terme (PETERS et DARLING, 1985; HALPIN, 1994; OTA, 1993 *in* BENISTON *et al.*, 1996a et b; GIEC, 2002; BENISTON, 2003). Trois axes de recherche sont privilégiés : la paléocologie, la réponse écophysologique et les réactions migratoires.

3.2.2.1. Les enseignements issus des données paléocologiques

Les données paléocologiques, et notamment les séries dendrométriques et l'analyse pollinique, permettent de se faire une idée des rapports existant entre le climat et la végétation (TESSIER *in* IPCC, 2001).

La comparaison entre données sur la dynamique de la végétation et simulations paléoclimatiques obtenues à partir de modèles de circulation générale ont permis de mieux comprendre le rôle du climat dans la transformation de la végétation (WEBB *et al.*, 1985). Plusieurs découvertes de la recherche paléocologique ont permis d'axer l'étude des effets de l'évolution future du climat sur les divers biomes de la planète. Ces découvertes portent en particulier sur l'évolution du caractère saisonnier, qui peut aboutir à des caractéristiques végétales inattendues (PRENTICE *et al.*, 1991) et sur l'évolution rapide du climat et de la végétation à l'échelle de l'écosystème (GEAR et HUNTLEY, 1991).

3.2.2.2. La réponse écophysologique

Le sens commun et la recherche paléocologique (HUNTLEY, 1991) indiquent que les communautés végétales réagissent à un réchauffement global en se déplaçant vers des latitudes et des altitudes plus élevées. Cependant, cette migration est gérée, au niveau de chaque plante (HUNTLEY, 1991; POSSINGHAM, 1993; GRAUMLICH, 1994; DUKES et MOONEY, 1999) par des

² Vires.

³ Certains éléments de ce paragraphe sont issus d'une synthèse bibliographique, réalisée par CORONA et ARQUES (2002) dans le cadre du Programme PAG (*in* JOMELLI, 2002), qui repose essentiellement sur les travaux menés par OZENDA et BOREL (1991), GUIBAN *et al.*, 1995, BENISTON *et al.*, 1996a; BENISTON *et al.*, 1996b, BENISTON, 2000 et le rapport de l'IPCC (2001).

processus écophysologiques qui dépendent des effets directs et indirects de l'augmentation de la pression partielle de CO₂, de la modification de la température et des précipitations, de la photopériode et des processus de concurrence entre espèces ainsi que des conditions édaphiques variables sur de courtes distances.

A. Accroissement de la productivité des végétaux et augmentation de la pression partielle de CO₂ : des résultats incertains

De nombreuses études expérimentales en atmosphère contrôlée en laboratoire ou sous serre ont montré le lien existant entre la pression partielle de CO₂ et l'activité photosynthétique (Mc DOWELL, 1972; PEARCY et BJÖRKMAN, 1983, KÖRNER, 1995. BILLINGS *et al.*, 1983; WOODWARD *et al.*, 1991; GARBUTT et BAZZAZ, 1984; EAMUS et JARVIS, 1989) et ont mis en évidence l'influence de la teneur en CO₂ sur la production de matière sèche. Selon OZENDA et BOREL (1991), ces résultats valables pour une espèce isolée sont difficilement transposables aux écosystèmes naturels. Ils semblent pourtant confirmés par des mesures réalisées *in situ*. Dans les Alpes, TRANQUILLINI (1979) attribue la baisse de 10 à 20% de l'activité photosynthétique des arbres au niveau de la limite supraforestière à la diminution de la disponibilité en CO₂. NICOLUSSI *et al.*, (1994) dans les Alpes centrales, BECKER *et al.*, (1995) dans les Vosges, LAMARCHE *et al.* (1984), au Colorado et au Nouveau-Mexique, expliquent l'augmentation de la croissance radiale des arbres depuis 1850 par l'augmentation de la teneur en CO₂. Cependant, pour KÖRNER (1995), ces observations ne constituent pas des preuves formelles d'un lien direct entre le développement accéléré des communautés végétales d'altitude et l'augmentation de la pression partielle de CO₂ dans l'atmosphère.

B. Végétation d'altitude et augmentation des températures : la primauté des effets indirects

En altitude, la température par ses impacts directs (températures extrêmes, variations thermiques rapides et importantes) et indirects (photopériodisme, durée de la période végétative, disponibilité du sol en eau et en nutriments) apparaît comme facteur de stress primordial pour la végétation (BENISTON *et al.*, 1996a et b; BENISTON, 2003). Les réponses écophysologiques de la végétation aux conditions climatiques extrêmes sont multiples. On citera sans être exhaustif les adaptations morphologiques (TRANQUILLINI, 1979; LAMARCHE et MOONEY, 1972; ARQUILLIERE, 1986; SCOTT *et al.*, 1987; LAVOIE et PAYETTE, 1992; BEGIN et FILION, 1994 *in* FELTGEN DIDIER, 1998), physiologiques (LAMARCHE et MOONEY, 1972; TRANQUILLINI, 1979; BILLINGS, 1987; LARCHER, 1995), métaboliques (TRANQUILLINI, 1979; LARCHER, 1995) ou concernant le mode de reproduction (MOIROUD et GONNET, 1977; TRANQUILLINI, 1979; PAYETTE *et al.*, 1982; KUDO, 1991).

En montagne, la répartition de la végétation est tellement liée à des paramètres climatiques qu'on utilise régulièrement une typologie des étages de végétation pour déterminer les influences du climat (TROLL, 1968a; OZENDA, 1985; OZENDA et BOREL, 1991). Selon KÖRNER (1992 *in* GUIGAN *et al.*, 1995) et KÖRNER *et al.* (2003), un des principaux facteurs de stress déterminant l'établissement et l'évolution de la végétation en région alpine est certainement la température minimale qui détermine le seuil de tolérance des plantes vis à vis du gel. Il ajoute qu'il s'agit essentiellement des températures mesurées dans la canopée de la plante ou dans le sol. DAHL (1951 *in* GUIGAN *et al.*, 1995) souligne que ce sont surtout les températures d'été, et non celles d'hiver, qui contrôlent la distribution des plantes.

La tendance à une augmentation des minima hivernaux et estivaux est attestée en Chartreuse vers 950 m. Certes, il s'agit de la température de l'air (1m50) mais l'installation d'une station météorologique (type AUTEQ), vers 1650 m, devrait nous permettre de préciser, notamment au

cours de la période végétative, l'évolution thermique microclimatique à -10 cm et +20 cm au pas de temps annuel. Nous tenterons d'extrapoler les résultats, avec toutes les réserves nécessaires, sur une période plus longue.

Le gel, détermine une limite sélective dans l'établissement et le développement de la végétation, en fonction de la saison ou du moment de la journée dans lequel il intervient. On peut dire que les températures agissent de trois manières différentes :

-de façon directe, à travers les températures extrêmes et les fortes variations thermiques qui perturbent le métabolisme des plantes, via l'état de l'eau intra- et intercellulaire;

-influences indirectes sur le développement du sol et les disponibilités nutritives;

-influences sur la durée de la période sans neige, qui correspond à la période végétative de la végétation alpine (BRAUN BLANQUET, 1954; ELLENBERG, 1978; TRANQUILLINI, 1979; KÖRNER, 1995 *in* GUI SAN *et al.*, 1995; LARCHER, 1995; BENISTON *et al.*, 1996a et b).

En général, les effets directs de la température sur la végétation alpine sont moins importants que les effets indirects qui dépendent de la durée du manteau neigeux, des précipitations et du vent (GUI SAN *et al.*, 1995; BENISTON, 2003).

L'influence indirecte du froid conditionne la période végétative. La période de végétation est la période où la température de l'air est supérieure à 5°C (RICHARD et PAUTOU, 1982; FOURNIER, 1985). Sa durée est largement influencée par l'exposition et la topographie qui jouent sur la durée du manteau neigeux. Cependant, il s'agit d'une valeur indicative. HOLTMEIER (1973) considère qu'il est plus correct de parler de plusieurs périodes de végétation, puisqu'il y a une diversité d'espèces dans la nature, dont certaines peuvent commencer à assimiler beaucoup plus tôt que d'autres. KUDO (1991) propose une classification de la phénologie des plantes par rapport à la durée de la période sans gel. Elle dépend : 1- de leur forme de croissance, 2- de la durée de leur préfloraison, 3- du temps nécessaire à la maturation de leur graines. Ainsi, quand la période de végétation est réduite, la production de nouvelles pousses, d'organes de reproduction et de diaspores, ainsi que leur maturation est limitée dans le temps.

KÖRNER *et al.*, (2003) insistent sur la variabilité des impacts selon les espèces et les températures considérées (moyennes, extrêmes, saisonnières, diurnes/nocturnes). De nombreux auteurs soulignent que c'est la durée de la couverture neigeuse et notamment la réduction de la durée d'enneigement liée à la hausse des températures qui devrait avoir les incidences les plus sensibles sur la végétation (MYNENI *et al.*, 1997; KELLER et KÖRNER, 2003; KÖRNER *et al.*, 2003). C'est un facteur déterminant pour l'amorce de la période végétative de nombreuses espèces alpines, par conséquent sa quantification est nécessaire lorsque l'on veut évaluer la réponse de la végétation au changement climatique.

C. Réponses de la végétation à la modification des précipitations : importance de la durée de la couverture neigeuse

La durée d'enneigement et l'épaisseur de la couche de neige, qui sont souvent fonction de la température et des précipitations moyennes, constituent l'un des principaux éléments climatiques des écosystèmes alpins (BARRY et VAN WIE, 1974; AULITZKY *et al.*, 1982 *in* BENISTON *et al.*, 1996a; OZENDA, 1985; BURROWS, 1990; MUSSELMANN, 1994). KÖRNER *et al.*, (2003) soulignent que les précipitations ne constituent pas un facteur limitant pour les plantes, mais exercent plutôt une influence sur la période végétative en fonction de la durée de la couverture neigeuse.

Durée qui peut être évaluée en mesurant la température du sol. Nous développerons cet aspect plus loin (Troisième partie, Chapitre 8). La couverture neigeuse protège les plantes du gel en hiver et assure leur alimentation en eau au printemps. Les communautés de plantes alpines, qui se caractérisent par une saison de végétation très brève (correspondant à la période sans neige), ont besoin d'eau pour amorcer leur croissance. OZENDA et BOREL (1991) prévoient que les communautés végétales les plus menacées seront celles qui vivent dans des combes à neige, dans des dépressions ou au niveau des tourbières et des zones humides, car elles sont sujettes à un dessèchement estival. La catégorie la plus favorisée, qui peut connaître une sensible extension, est celle des groupements à très faible enneigement occupant les crêtes ou les microreliefs très exposés au vent.

OZENDA et BOREL (1991); GUIBAN *et al.* (1995); BENISTON (2003); KÖRNER *et al.* (2003) soulignent la diversité des impacts écophysologiques liés à l'évolution des températures et des précipitations et l'individualisme de la réponse des espèces. La réponse des plantes vasculaires reste difficile à préciser (THEURILLAT, 1995). D'autre part, les auteurs insistent sur la complexité des phénomènes météorologiques et des effets écophysologiques dans les écosystèmes de montagne, liée aux effets de la pente, du recouvrement végétal et de la topographie locale (microtopographie, microrelief), créant des « topoclimats ». Le diptyque température-neige est prépondérant pour déterminer les conditions de croissance de la végétation alpine.

3.2.2.3. Distribution géographique et réactions migratoires

Les travaux actuels accordent beaucoup d'importance aux déplacements possibles (shifts), des écosystèmes sous l'effet des modifications climatiques, comme ce fut le cas pendant les glaciations et au cours de l'Holocène. Vers 6000 BP, pendant l'optimum thermique de la période atlantique, la température estivale aurait été de 2 °C supérieure à celle d'aujourd'hui (LAMB, 1977 *in* CANNELL *et al.*, 1989). Dans les Alpes, la limite supérieure de la forêt est actuellement de 150 à 300 m (HOLTMEIER, 1993, 1994), voire de 400 m (DE BEAULIEU et DAVID, 1995) inférieure à la limite bioclimatique, correspondant à cet optimum thermique de l'Holocène.

Les données paléoécologiques analysées par HUNTLEY (1991) montrent qu'une majorité des taxons répond à un changement climatique rapide et continu par une réaction migratoire. Ces déplacements n'excluent pas les effets physiologiques mais s'ajoutent à eux. Selon OZENDA et BOREL (1991), ils posent un certain nombre de problèmes quant à :

- leur direction et leur sens;
- leur amplitude;
- leur chronologie (temps de latence, puis durée);
- le processus de leur déroulement;
- enfin et surtout, leurs conséquences pour l'homme et le paysage.

La direction, l'amplitude spatiale et la vitesse des réactions migratoires sont liées à l'ampleur et à l'intensité des modifications climatiques.

A. Déplacements des étages de végétation : menaces sur les écosystèmes de haute altitude

PETERS et DARLING (1985) ainsi que d'autres auteurs ont présenté une hypothèse générale concernant l'éventuel déplacement des étages de végétation vers des altitudes plus élevées. Ce modèle conceptuel suppose que les niveaux actuels évolueront en fonction du gradient adiabatique de la température. La règle biogéographique générale sur laquelle repose le modèle est déduite de la " loi bioclimatique de Hopkins " (MacARTHUR, 1972; PETERS et DARLING, 1985),

selon laquelle une variation de température de 3 °C correspond à une variation d'altitude de 500 m. D'après ce modèle, un réchauffement moyen de 1 à 4 °C pourrait entraîner une remontée altitudinale des étages de végétation de 200 à 500 mètres. L'évolution du climat entraînerait la disparition des zones climatiques les plus froides situées aux sommets, ainsi que le déplacement « linéaire » des autres zones de végétation vers le haut. Comme les sommets sont moins étendus que les bases des montagnes, les zones actuellement situées à haute altitude occuperaient une superficie de plus en plus réduite et les espèces correspondantes auraient une population moins importante, d'où un risque de sensibilisation accrue aux pressions génétiques et écologiques (PETERS et DARLING, 1985; HANSEN-BRISTOV *et al.*, 1988). Dans les Alpes, cette contraction concernerait essentiellement les étages alpin et nival. OZENDA et BOREL (1991, 1995 *in* GUIBAN *et al.*, 1995) soulignent que l'on peut s'attendre à voir ces étages se déplacer vers le haut, chacun prenant théoriquement la place de celui qui le surmontait avant le réchauffement.

B. Une migration individuelle des espèces

A l'échelle des séries de végétation, le processus de migration est cependant beaucoup plus complexe que ne le laisse supposer le modèle de PETERS et DARLING. **Un étage de végétation ne peut pas migrer en altitude dans son ensemble** pour quatre raisons (HOLTEN et CAREY, 1992; GUIBAN *al.*, 1995) :

- la réponse de la végétation sera le résultat de réponses individuelles à l'échelle des espèces. Une étude menée en Suède centrale (KULLMAN, 1981 cité par DAVIS, 1986) a montré par exemple une élévation de cent mètres d'une population de bouleaux au cours de ce siècle tandis que les épicéas présents au même endroit n'ont pas colonisé de nouveaux espaces mais ont sensiblement amélioré et accéléré leur croissance. Globalement, pour ce qui est des potentialités de migration, les plantes zoochores sont favorisées face aux anémochores, tandis que celles qui se reproduisent végétativement devraient migrer très peu (HOLTEN et CAREY, 1992). Ces migrations différentielles laissent présager des changements à l'échelle de l'association et des écosystèmes (DAVIS, 1986; HUNTLEY, 1991; OZENDA et BOREL, 1991);
- en montagne, la diversité des microclimats et des microhabitats accroît la complexité du processus de migration. Il semble par exemple que la croissance des arbres au-dessus de la forêt fermée soit inhibée surtout par des conditions microstationnelles défavorables et qu'une fluctuation climatique brève ne puisse pas compenser la disparition du couvert forestier préexistant (HOLTMEIER, 1994). Certains habitats d'altitude, au substrat très spécifique par exemple, peu favorables aux espèces « invasives », peuvent permettre la subsistance d'espèces hautement spécialisées (THEURILLAT et SCHLÜSSEL, sous presse);
- la viabilité à long terme n'est pas seulement une question de plasticité écologique, mais le résultat de la compétition affectée par le changement climatique;
- dans des communautés fermées et denses, il n'y aura pas d'espace vide pour permettre l'établissement d'espèces plus compétitives⁴.

Ces considérations, appliquées aux milieux de hautes altitudes, méritent d'être nuancées. Selon nous, les menaces ne pèsent pas seulement sur les seuls écosystèmes de haute altitude. Les mosaïques biorhexistatiques d'éboulis cartusiennes se situent dans une tranche altitudinale (1500-

⁴ Sauf en cas de perturbations érosives.

1800) clairement délimitée en aval, par la présence de la forêt et en amont, par l'imposante corniche de calcaire urgonien. Cette configuration place les mosaïques en situation d'écotone au contact des étages bioclimatiques du montagnard supérieur et du subalpin inférieur. Il peut être assimilé à une zone de combat (kampfzone).

Si la tendance biostatique observée, depuis le début du siècle dernier se confirme dans les futures décennies, on pourrait alors assister à une régression des espèces spécialisées d'éboulis au profit d'espèces plus compétitives, provenant d'écosystèmes périphériques (forêt, pelouse...) ou non (espèces pionnières) et dont l'adaptation serait favorisée par une morphodynamique ralentie. Les conséquences seraient assez importantes en terme de biodiversité car, à la différence de ce que l'on peut prévoir pour les grands versants des Alpes (ci-dessus), en Chartreuse, un déplacement des espèces est limité par la géomorphologie du massif qui rend impossible un décalage en altitude des biotopes d'éboulis établis au pied des escarpements urgoniens (Troisième partie, Chapitre 6). Ce modèle n'est pas fondamentalement différent de celui présenté plus haut (A.) et ces remarques s'appliquent également aux paragraphes qui suivent. De plus, il n'est pas seulement applicable en Chartreuse mais aussi dans le Vercors ou les Bauges.

C. Evolution de la biodiversité

On peut espérer que la diversité écologique de la haute montagne, qui détermine une mosaïque de microclimats et une parcellisation extrême du tapis végétal, laisserait subsister des stations permettant la survivance d'espèces rares ou endémiques (KÖRNER et COCHRANE, 1983; KÖRNER et LARCHER, 1988; LARCHER, 1995). Mais on sait aujourd'hui que cette survivance n'est pas affaire de résistance de la population spécifique ou des individus, et qu'elle est liée à la persistance des biotopes et des écosystèmes. Or ceux-ci seraient inévitablement modifiés et l'équilibre entre eux perturbé, entraînant la disparition de milieux entiers et des associations qu'ils abritent.

Dans les Alpes, la réduction et le morcellement de l'habitat se produiraient dans les étages alpin et nival où des espèces rares, ayant une faible capacité de migration, disparaîtraient. Comme l'étage alpin contient une partie non négligeable de la flore alpine naturelle (15% selon OZENDA et BOREL, 1991), l'incidence de l'évolution du climat sur la diversité floristique des Alpes pourrait être importante (une augmentation de 4°C provoquerait la disparition de 100 espèces de haute montagne selon OZENDA et BOREL, 1991). Nous renvoyons à notre remarque précédente.

Selon THEURILLAT (1995 *in* GUISAN *et al.*, 1995) certains habitats, occupant des milieux hostiles (falaises, éboulis actifs, crêtes ventées, versants pentus) peu accessibles ou peu accueillants, seront moins affectés et les espèces pourront continuer à se développer et résister à la pression des changements climatiques tant que leurs amplitudes physiologiques et leur faculté de compétition par rapport à des espèces provenant d'habitats identiques à plus basse altitude le permettront. Par le passé, notamment au cours des glaciations du Pléistocène, ces habitats ont joué le rôle « clé » de refuge dans la conservation de nombreuses espèces paléo-endémiques dans les zones non englacées (BRAUN BLANQUET, 1948; RIOUX et QUEZEL, 1949; DAVIS, 1951; PAWLOWSKI, 1970; SNOGERUP, 1971). De plus, paradoxalement, certains de ces habitats (versants rocheux très pentus par exemple), peuvent jouer le rôle de corridors de développement pour certaines espèces (les arbres par exemple) et accélérer le processus de migration en altitude.

Si ce modèle est valable pour les talus d'éboulis de haute montagne, faiblement végétalisés actuellement, dans le cas de la Chartreuse, la tendance est plutôt inversée. De plus, il semble que l'aspect lié à la morphodynamique ait été occulté, ce n'est pas uniquement une question d'amplitude physiologique ou de faculté de compétition.

Les espèces les plus menacées d'extinction sont les endémiques et les orophytes des Alpes orientales, qui occupent des niches écologiques situées sur des sommets peu élevés, dans des massifs d'extension réduite, qui n'offrent qu'un nombre réduit de micro-habitats et limitent la possibilité de migration (GOTTFRIED *et al.*, 1994; KÖRNER, 1995). Cet aspect est plus proche du cas cartusien et les talus d'éboulis abritent des espèces endémiques, comme la Vulnéraire des Chartreux (*Hypericum nummularium*). D'une manière générale, les espèces devraient réagir individuellement aux changements climatiques et aux régimes de perturbations, avec des décalages temporels et des périodes de réorganisation considérables. Cette tendance perturbera les écosystèmes établis et créera de nouveaux ensembles d'espèces moins diversifiés et à caractère proliférateur (GIEC, 2002).

Selon le dernier rapport du GIEC (2002) relatif à l'impact des changements climatiques sur la biodiversité et les systèmes biologiques, sur un total de 59 plantes, 47 invertébrés, 29 amphibiens et reptiles, 388 oiseaux, et 10 espèces de mammifères, il y a eu pour environ 80% d'entre eux changement du paramètre physique mesuré (début et fin de la saison de reproduction, variations des régimes migratoires, et changements de la taille des corps) correspondant aux effets prévus du réchauffement planétaire. La plupart de ces études ont été effectuées dans des zones tempérées à latitude élevée et dans certaines zones à haute altitude. Celles-ci montrent que certains écosystèmes, particulièrement sensibles aux changements climatiques régionaux (à latitude et altitude élevées), ont déjà répondu.

Si les effets du réchauffement climatique sur la végétation en montagne concernent directement notre sujet, force est de constater que les modèles développés occultent régulièrement la moyenne montagne. Pourtant, dans le cas des talus d'éboulis cartusiens ou encore de certains écosystèmes relictuels tels que les pinèdes abyssales (ARQUES *et al.*, 2001), les enjeux sont parfaitement identiques.

En dehors des facteurs climatiques, l'occupation humaine joue un rôle prépondérant en montagne. Dans ce contexte, l'évaluation des effets des changements climatiques actuels et futurs sur les mosaïques biorhexistatiques d'éboulis doit prendre en compte l'histoire et l'utilisation de ces milieux par l'homme. Les activités anthropiques créent des conditions stationnelles, dont l'hétérogénéité influence la structure des mosaïques.

3.3. Les changements anthropiques dans les Alpes du Nord

Les changements anthropiques constituent le deuxième volet des changements environnementaux. Nous n'allons pas retracer, ici, l'histoire de l'occupation humaine dans les Alpes françaises car de nombreux auteurs ont traité le sujet. Citons sans être exhaustif les travaux de SCLAFERT (1926); BLACHE (1931); BLANCHARD (1943, 1947, 1948); VEYRET et VEYRET (1967, 1979); ALLIX (1975); BOUTONNET (1992); FELTGEN DIDIER (1998). Il s'agit dans ce paragraphe de faire le point sur l'évolution des pratiques agro-sylvo-pastorales dans les Alpes, et en montagne en général, depuis le milieu du XIX^{ème} siècle et surtout depuis les années 50. Il est fondamental d'étudier l'impact anthropique sur l'évolution des milieux naturels, en particulier dans le domaine montagnard marqué par la forte variabilité de ses facteurs écologiques. Nous précisons cet aspect pour les versants à éboulis de la Chartreuse dans le Chapitre 3 (§ V).

FELTGEN DIDIER (1998) résume en huit points les grandes étapes de l'occupation humaine dans les Alpes (Encart 3).

Encart 3 – Les grandes étapes de l’occupation humaine

- | | | |
|---|--|---|
| - | >5000 av. J.C. | Néolithique, premières communautés permanentes sédentaires (agriculture); |
| - | 5000 à 2000 av. J.C. | Développement de l'élevage bovin et caprin; |
| - | >2000 av. J.C. | Premiers grands déboisements; |
| - | pendant 3 millénaires | Alternance de phases de défrichement et d'abandon; |
| - | 17 ^{ème} et 18 ^{ème} siècles | Extension minimale de la forêt; |
| - | 1850 | Fin de l'économie de subsistance; |
| - | dès 1850 | Modification des systèmes agropastoraux; |
| - | dès 1950 | Abandon de nombreux alpages. |

La pression exercée par des effectifs croissants de population, avec la multiplication de communautés rurales montagnardes mettant en place des systèmes agro-sylvo-pastoraux en prise directe sur les écosystèmes, va s'étendre sur plusieurs siècles et culminer au XIX^{ème}, où, on assiste à la modification, à l'appauvrissement des écosystèmes naturels et parfois à leur destruction. Ces activités ont profondément modifié les paysages montagnards.

Depuis le milieu du XIX^{ème} siècle, deux facteurs ont favorisé la colonisation forestière sur les talus d'éboulis cartusiens : l'effondrement du système agro-pastoral et les reboisements. Ce changement dans le régime des perturbations anthropiques a affecté l'ensemble des Alpes. Ses conséquences sur l'occupation du sol en Chartreuse seront développées dans le Chapitre 3.

3.4. Conclusion

Dans les Alpes, vis-à-vis du contexte environnemental actuel, la Chartreuse est loin d'être un massif isolé. Le réchauffement climatique est attesté et contrairement à ce que l'on pourrait penser, les conséquences sur les processus morphogéniques et biologiques, sur les talus d'éboulis de l'étage infra-péglaciaire, ne sont pas fondamentalement différentes de celles envisagées à haute altitude⁵. Bien au contraire, certaines tendances sont inversées et il est même fortement probable que des changements aient déjà été amorcés (Troisième partie, Chapitres 6 et 7).

Les talus d'éboulis du massif de la Chartreuse constituent des mosaïques biorhexistatiques complexes dont la structure et la dynamique sont régies par l'interaction des facteurs climatique (topoclimatiques), écologique (biotiques et abiotiques), géodynamique et anthropique s'exerçant selon des intensités variables et agissant à plusieurs échelles spatio-temporelles. Au vu des éléments présentés dans les paragraphes précédents, nous sommes en droit de penser que la réduction de la fréquence et de l'intensité des processus d'érosion nivéo-péglaciaires, l'allongement de la période végétative et le changement dans le régime des perturbations anthropiques sont probablement à l'origine de la tendance biostatique observée sur les talus d'éboulis et, par conséquent, des modifications dans la structure et le fonctionnement des mosaïques paysagères. De nombreux facteurs concourent à diminuer les processus érosifs et à favoriser la colonisation végétale.

De plus, dans ce processus d'évolution, la biodiversité des mosaïques risque d'être menacée si la réponse des espèces et des écosystèmes est conforme aux prévisions de la communauté scientifique.

Dans le chapitre qui suit, nous allons présenter les principales bases théoriques et conceptuelles nécessaires à une approche pluriscalaire et spatialisée de l'évolution des mosaïques biorhexistatiques d'éboulis.

⁵ A l'exception, par exemple, du plus grand dynamisme de la forêt qui n'est pas en limite climatique.

Chapitre 2

Bases théoriques pour une étude géo-écologique des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis et de leur évolution dynamique

Comme nous l'avons souligné précédemment, dans le massif de la Chartreuse, la dynamique des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis est régie par l'interaction des facteurs topoclimatique, géodynamique et écologique. Le facteur anthropique est précisé dans le Chapitre 3. Ces milieux se situent à l'interface des interactions homme/biosphère/lithosphère/atmosphère. Dans le contexte environnemental actuel, ils s'inscrivent dans une approche globale des interactions homme/milieu et des composantes du milieu entre elles. Leur dynamique doit être appréhendée à différentes échelles spatio-temporelles. La prise en compte de ces différents facteurs, place notre sujet à l'interface de la géographie et de l'écologie, et doit nécessairement aboutir à l'utilisation d'un certain nombre de concepts, notions, méthodologies qui relèvent de chacune de ces deux disciplines. Cette approche, que nous qualifierons de géo-écologique (TROLL, 1971; McARTHUR, 1972; HOLTMEIER, 1973; TRICART, 1982) s'inscrit dans le prolongement de la tradition naturaliste de la géomorphologie, engagée à partir des années 60 sous l'impulsion des travaux menés en biogéographie par BERTRAND (1966, 1968); ROUGERIE (1967); SOUTADE et BAUDIERE (1970); SOUTADE (1972, 1980) et TRICART (1982), où le milieu est alors sujet à des approches globales qui mettent l'accent sur les composantes physiques, abiotiques et biotiques.

I. La théorie de la biorhexistasie

Elle a été mise au point par ERHART (1967) et appliquée à l'échelle des continents et des temps géologiques. D'inspiration pédologique, elle lie l'évolution des sols à celle du tapis végétal et de certains modelés. Elle permet d'expliquer certains types de cycles sédimentaires et phases morphogénétiques. On distingue :

- **la biostasie** (de *bios*, la vie) : c'est une phase de stabilité biologique pendant laquelle se réalise, sous couvert forestier, l'altération sur place du matériel rocheux avec mobilisation des éléments minéraux solubles; le couvert végétal est développé;
- **la rhexistasie** (de *rhexein*, rompre) : il s'agit d'une phase au cours de laquelle les équilibres biopédologiques antérieurs se rompent, sous l'effet de causes climatiques ou tectoniques. C'est une phase de glyptogenèse qui débute par l'évacuation des sols et des débris accumulés sur place pendant la période antérieure de biostasie. Le couvert végétal disparaît, entraînant l'érosion des sols et l'attaque des versants par les eaux courantes et le gel, qui fournissent des débris grossiers ;

Il y a **hétérostasie** quand interfèrent les effets atténués de la biostasie et de la rhexistasie (TRICART *in* GEORGE, 1970). Il s'agit d'un stade transitoire entre biostasie et rhexistasie, dans un sens comme dans l'autre.

Les formes de relief et des dépôts corrélatifs témoignent de la succession de ces cycles morphogéniques.

Cette théorie, élaborée à très petite échelle sur un pas de temps relativement long a été adaptée aux besoins de notre recherche. Elle sera donc envisagée, pour les mosaïques biorhexistasiques d'éboulis, à très grande échelle et sur un pas de temps court.

La complexité des interactions topoclimatiques, géodynamiques, édaphiques et végétales s'exerçant, selon des intensités variables et à des échelles spatio-temporelles différentes, expliquent certainement la structure, la dynamique et le caractère polygénique des talus d'éboulis cartusiens. Pour appréhender cette complexité, nous avons défini une approche systémique de la biorhexistasie que nous allons appliquer à différents niveaux d'organisation et échelles d'observation spatio-temporelles.

1.1. Biorhexistasie et modelage paysager

En montagne, au sein d'un même étage, l'équilibre morphodynamique résulte du rapport « érosion-végétation » et les systèmes sont soit biostasiques, soit rhexi- ou hétérostasiques. Aborder la théorie de la biorhexistasie revient à s'intéresser aux relations entre la végétation et son modelé support, ou son substrat plus ou moins affecté par les processus d'érosion.

A différents niveau d'organisation (écocomplexes, station, placette de mesure⁶) et d'observation (spatio-temporels), les versants à éboulis cartusiens se présentent sous la forme de mosaïques biorhexistasiques complexes au sein desquelles se côtoient des portions végétalisées (biostasiques) et des secteurs dénudés (rhexistasiques) (ARQUES, 1999). Comme nous le verrons plus loin (Troisième Partie), depuis plusieurs décennies, ces mosaïques sont en voie de colonisation végétale. Cette expansion se traduit par la colonisation progressive de certains secteurs d'éboulis autrefois rhexistasiques (piquetage arbustif et/ou herbacé) et/ou par le déplacement progressif des contacts (écotones) biorhexistasiques (lisières forestières, îlot herbacé, arbustif, arboré). Ce processus complexe se caractérise par une forte variabilité spatio-temporelle inter- et intra-mosaïque. La multiplicité des facteurs contrôlant le mécanisme de colonisation végétale sur versants érodés (facteurs pluriscalaires : climatiques, géomorphologiques, géodynamiques, édaphiques, végétaux, anthropiques...) explique probablement les disparités dans l'ampleur, les rythmes et les modalités du phénomène.

Par extension, cette théorie sera donc utilisée dans notre recherche, à des échelles spatio-temporelles très grandes, comme celles de l'écocomplexe et du siècle (ou de la décennie) puis de la station, de la parcelle et de l'année, pour caractériser la relation existante entre l'état morphodynamique et le recouvrement végétal. A l'échelle de l'écocomplexe et de la station (au sens écologique du terme, c'est-à-dire le talus d'éboulis), elle est appréhendée de manière qualitative (cartographie diachronique) et quantitative (évolution des surfaces végétalisées, indices d'écologie du paysage). Son appréciation et sa mesure stationnelle, au sens méthodologique (placettes de mesure), sont réalisées par l'intermédiaire de l'approche géodynamique et floristique. Cette dernière étant basée sur la méthode des transects phyto-écologiques et sur les informations

⁶ Ces termes sont expliqués plus loin (II. Chapitre 1 et Deuxième partie).

apportées par l'utilisation des valeurs indicatrices de LANDOLT (1977). Nous développons ces aspects méthodologiques dans la deuxième partie de ce mémoire.

Appliquée aux différents niveaux d'organisation des versants à éboulis, elle permet d'en proposer une zonation en fonction de l'intensité des phases, de la potentielle stabilité et du recouvrement végétal. C'est ce que nous appelons le gradient biorhexistasique :

- **la zone biostasique** : zone (s) ou portion (s) stable (s), végétalisée (s) dont le pourcentage de recouvrement de la végétation est supérieur à 75%. Le choix de cette valeur correspond à la nécessité de bien dissocier le talus d'éboulis, dans ses portions non végétalisées, des écosystèmes périphériques (pelouse, prairie...) dont le couvert végétal est très développé et où l'érosion est faible;

- **la zone rhexistasique** : zone (s) ou portion (s) instable (s), dont le pourcentage de recouvrement par la végétation est inférieur à 10%. Il s'agit de la zone la moins végétalisée. Les processus d'érosion nivéo-périglaciaires sont très actifs notamment dans les secteurs à matériaux fins et les contraintes exercées sur les végétaux sont importantes. Nous sommes sur le talus d'éboulis *sensu stricto*, c'est le domaine des espèces spécialisées. A ce propos, nous signalons ici le cas particulier des zones à gros blocs souvent rhexistasiques mais stables d'un point de vue géodynamique. Leur localisation sur le talus d'éboulis, la granulométrie des matériaux et la prise en compte de cette variable dans le cas des transects phyto-écologiques, permet de les dissocier des secteurs rhexistasiques plutôt actifs à matériaux fins et moyens. D'autre part, elles sont susceptibles d'être colonisées par des végétaux non spécialisés.

- **la zone hétéroostasique** : zone (s) ou portion (s) pénestable (s) située (s) au sein du talus d'éboulis au contact des zones biostasique et rhexistasique. Le pourcentage de recouvrement de la végétation oscille entre 10 et 75% et les processus d'érosion nivéo-périglaciaires sont plus ou moins actifs. Cette fourchette est découpée en trois classes [10; 25%], [25; 50%] et [50; 75%] permettant de mettre en évidence, au sein même du talus d'éboulis, un gradient écologique susceptible d'annoncer ou de caractériser des changements en cours. La zone hétéroostasique constitue une clé pour l'observation de transitions (écotones), d'évolutions ou de successions. Nous le verrons plus loin (Troisième Partie), il s'agit d'une zone ou de portions complexes à l'image de la zone médiale des talus d'éboulis qui, par ailleurs, envisagée d'un point de vue purement qualitatif est souvent une zone hétéroostasique.

Génératrice d'hétérogénéité, la biorhexistasie est supposée être créatrice de biodiversité à l'échelle des mosaïques d'éboulis (ARQUES, 1999; ARQUES *et al.*, 2001).

1.2. La biorhexistasie comme facteur de biodiversité

Nous pensons que la biorhexistasie est un facteur de biodiversité à l'échelle des mosaïques d'éboulis. Elle participe au modelage des paysages et induit des degrés d'hétérogénéité divers à chaque niveau d'organisation et d'observation. Tout processus qui modifie la structure spatiale des mosaïques aura une influence sur la diversité. Ces structures peuvent se modifier sous l'action des processus nivéo-périglaciaires, du changement climatique et/ou des impacts anthropiques. Dans le contexte environnemental actuel, elles constituent des marqueurs originaux pour le suivi des changements en cours. Nous tenterons de préciser cet aspect grâce aux approches paysagères et stationnelles (Troisième Partie).

II. Les apports de l'écologie du paysage

En 1982, TRICART soulignait la médiocre insertion de l'écologie dans le corps des disciplines qui interviennent dans l'explication des paysages. Basée sur le concept fondateur d'écosystème, il s'agissait d'une écologie des systèmes qui se cantonnait à l'étude de milieux homogènes statiques sans trop se poser de question au sujet de leurs modifications, de leurs dynamiques... (TRICART, 1982). TRICART (1982), reprenant une citation de LAMOTTE (1982) : « (...) *le but majeur de l'écologie qui est de comprendre le fonctionnement d'ensemble de la communauté des êtres vivants d'un milieu* », préconisait d'ajouter *et avant* « d'un » pour que l'écosystème apparaisse centré sur ce qu'il doit être et qu'il est, en réalité, c'est-à-dire sur les relations entre les êtres vivants *et leur milieu*. Il ajoutait que, sans cela, l'approche systémique était tronquée, limitée à un seul sous-système, celui de la biocénose et c'était ici que la géographie pouvait et devait intervenir. Ces considérations soulignent clairement l'opposition, peut être un peu moins stricte aujourd'hui, entre les spécialistes du vivant (biocentrisme) et les généralistes (géographes). LAMOTTE (1982) parle de « *fonctionnement d'ensemble* », rien ne dit qu'il fait uniquement référence au facteur biotique.

TRICART (1982) soulignait qu'il convenait d'aborder l'étude du milieu, de l'habitat de la même manière que celle des biocénoses, c'est à dire en pratiquant l'analyse systémique pour déterminer les interactions entre phénomènes naturels et en introduisant une dimension spatiale et dynamique (écodynamique). Il concluait en insistant sur le fait que l'écologie nous a aidé à affermir notre approche, nous a enrichi au plan conceptuel mais, par une rétroaction positive, nous l'avons enrichie en introduisant le concept spatial, fondement même de la biogéographie, et surtout l'écodynamique (F. GAUSSEN *in* TRICART, 1982) qui apporte aujourd'hui un précieux élargissement à l'écologie elle-même en lui permettant de comprendre les écosystèmes dans leur totalité et non plus sous le seul aspect des biocénoses.

Il faut attendre les années 80, pour que le dialogue entre l'écologie et la géographie s'instaure autour de problématiques communes comme l'Écologie du Paysage. Avec l'avènement de l'Écologie du Paysage (*Landscape Ecology*), sous l'impulsion du géographe allemand TROLL (1950, 1968b, 1971) puis de NAVEH (1982); PICKETT et WHITE (1985); RISSER (1987) et FORMAN et GODRON (1986), l'écologue s'éloigne de son sujet de prédilection (même si l'approche biocentrée demeure), l'écosystème, pour s'intéresser au paysage (ROUGERIE et BEROUTCHACHVILI, 1991).

2.1. Généralités

Dans le cadre de notre recherche, la notion de paysage est utilisée pour désigner un système écologique en mettant l'accent sur **sa composante spatiale et historique**, conformément aux préoccupations de l'Écologie du Paysage. Nous considérons le paysage comme étant un élément fondamental, premier niveau de perception et d'organisation, permettant d'appréhender la dynamique biorhexistatique des mosaïques d'éboulis. Nous n'allons pas approfondir ici la définition du paysage et les caractéristiques des paysages d'altitude, nous renvoyons pour cela à DELCROS (1993) et FELTGEN DIDIER (1998).

Le terme « d'écologie du paysage » a été inventé par TROLL (1950, 1968b), 20 ans après que TANSLEY (1935) ait introduit celui d'écosystème (FORMAN et GODRON, 1986). Ce géographe allemand combinait simultanément la géographie et l'écologie (géo-écologie, TROLL, 1968a, 1971). Son objectif était de relier les structures spatiales, objets de la géographie, aux processus écologiques. Pour lui, le paysage était ainsi la traduction spatiale de l'écosystème.

L'écologie du paysage aborde les liens fonctionnels entre les éléments du paysage (*landscape entities*). La géographie, où le paysage joue un rôle central et où il est peut être même considéré

comme étant un élément spatial et dynamique fondamental, se concentre essentiellement sur la relation dynamique entre (a) les modelés ou les régions physiographiques et (b) les groupes humains (MIKESELL, 1968; GROSSMAN, 1977; LUDER, 1981 cités par FORMAN et GODRON, 1986). Les écologues du paysage, largement issus des milieux géographiques et biologiques, définissent l'écologie du paysage comme étant l'étude des relations physico-biologiques qui gouvernent les différentes unités spatiales d'une région. Ils prennent en considération à la fois la dimension verticale (à l'intérieur de l'unité spatiale) et horizontale (entre les unités spatiales) (TROLL, 1950, 1968b, 1971).

Selon FORMAN et GODRON (1986), lorsque l'on s'intéresse au paysage, il convient d'étudier :

- sa structure : c'est-à-dire l'agencement dans l'espace des éléments et des objets écologiques du paysage. Il s'agit de s'intéresser à la distribution d'énergie, des matériaux, des espèces en relation avec la taille, la forme, le nombre, le type et la configuration des éléments paysagers (écosystèmes, mosaïques paysagères);
- son fonctionnement : caractérisé par des flux d'objets entre les éléments paysagers : flux d'énergie, de matière et des espèces au sein des écosystèmes constitutifs du paysage;
- le changement : on s'intéresse aux modifications de la mosaïque au cours du temps.

FELTGEN DIDIER (1998) souligne l'évolution récente de l'écologie du paysage, passant par l'étude de taches dans une matrice à celle d'une véritable mosaïque (WIENS, 1995).

Une des caractéristiques principales de l'écologie du paysage réside dans la prise en compte des modifications que l'homme impose au milieu par ses activités. Le problème est celui de la reconnaissance sur le terrain d'unités spatiales et temporelles à l'échelle desquelles la dynamique des interactions homme-milieu puisse être saisie efficacement car nous travaillons sur un milieu « naturel anthropisé ».

2.2. L'éco-complexe : un ensemble d'écosystèmes en interaction

Le terme d'écosystème a été proposé par le botaniste TANSLEY en 1935. Il tenait à souligner la totale interdépendance des êtres vivants et du milieu inorganique. « *Bien que les organismes puissent réclamer en priorité notre attention, nous ne pouvons pas quand nous tentons de penser en terme de principes les séparer de leur milieu propre avec lesquels ils forment un système physique unique (...) Il y a un échange constant dans les formes les plus variées à l'intérieur de chaque système entre les organismes entre eux mais aussi entre l'organique et l'inorganique* ». « *Un écosystème est par définition un système, c'est-à-dire un ensemble d'éléments en interaction les uns avec les autres, formant un tout cohérent et ordonné. C'est un système hiérarchisé dans lequel les éléments constitutifs sont eux-mêmes des sous-systèmes structurés* » (DAJOZ, 1996).

Mais, « *Un écosystème n'est pas autonome par rapport aux écosystèmes voisins, aucun écosystème ne peut être appréhendé dans sa totalité. Lorsque des interactions homme-milieu sont en jeu, les systèmes véritablement intelligibles en terme d'organisation et de dynamique, intègrent le plus souvent de multiples écosystèmes plus ou moins étroitement imbriqués et interactifs* » (BLANDIN in JOLLIVET, 1992).

La nécessité d'un cadre conceptuel adapté, permettant de prendre en compte l'hétérogénéité du système, s'est donc imposée d'où la création du concept d'éco-complexe.

L'écologie du paysage considère les paysages comme des **écocomplexes**, « *une portion de territoire hétérogène composée d'ensembles d'écosystèmes en interaction* » (FORMAN et GODRON, 1986). En raison de l'ambiguïté et de l'imprécision fréquentes du terme paysage, le terme écocomplexe plus précis et à connotation écologique a été proposé par BLANDIN et LAMOTTE (1988). « *Sur le plan conceptuel, en évoquant la nature écologique - c'est-à-dire spatiale, temporelle et relationnelle - des assemblages d'écosystèmes, le terme d'écocomplexe désigne ceux-ci exclusivement en tant qu'objets d'une analyse systémique. Celle-ci ne prend pas en compte les multiples perceptions que peuvent avoir d'un écocomplexe tous ceux qui, à titres divers s'y déplacent ou le survolent* ».

BLANDIN et LAMOTTE (1988) ont insisté sur l'importance de l'hétérogénéité et de l'histoire humaine dans l'étude des écocomplexes.

« *De multiples interdépendances physiques, chimiques, biologiques et humaines associent les divers écosystèmes d'un territoire, chacun devenant un élément d'un système spatial à l'échelle duquel il devient impossible de développer une analyse structurale et fonctionnelle. Admettre l'existence de tels systèmes d'écosystèmes, c'est du même coup poser le problème de leur délimitation sur le terrain. La solution peut être simple, lorsque les limites sont à l'évidence géomorphologiques, donc clairement inscrites dans l'espace. Mais d'autres critères peuvent être importants et obliger à considérer des étendues plus vastes, par exemple lorsque toute une région a été modelée par une histoire humaine. C'est du même coup admettre que ces interactions sont au moins en partie déterminées par l'organisation spatiale des hommes et des milieux et qu'en retour elles entretiennent ou modifient cette organisation* » (BLANDIN in JOLLIVET, 1992).

L'écocomplexe est donc un espace porteur d'un ensemble plus ou moins anthropisé d'écosystèmes interactifs. C'est un niveau d'intégration supérieur à celui de l'écosystème. « *Il a été créé pour pouvoir prendre en compte la présence des sociétés humaines, leur rôle dans l'histoire et dans la dynamique des systèmes écologiques et contribuer à donner des bases rationnelles à l'aménagement des territoires* » (BLANDIN in JOLLIVET, 1992). Il prend en compte la nature hétérogène du paysage et permet d'approfondir la complexité des interrelations entre potentiel écologique (géomorphologie, pédologie, hydrologie, climat), potentiel biologique (végétation, faune) et action anthropique.

Ce passage de l'écosystème à l'écocomplexe, traduit, outre la prise en compte de l'homme, le passage progressif d'une homogénéité structurelle des systèmes à la reconnaissance d'une hétérogénéité fonctionnelle.

2.3. Les éléments de la mosaïque paysagère

L'écologie du paysage (FORMAN et GODRON, 1986) définit trois unités fondamentales dans une mosaïque paysagère (Figure 8) :

-**la matrice** (« *matrix* ») : partie la plus étendue et la plus connectée du paysage, elle lui donne sa physionomie. Elle joue un rôle prédominant dans les dynamiques paysagères;

-**la tache** (« *patch* ») : ou les taches (ilot, parcelle, rocher...), ce sont des surfaces non linéaires qui diffèrent par leur physionomie des éléments de la matrice qui les entourent. Elles varient en taille, forme, type, hétérogénéité;

-**le corridor** (« *corridor* ») : il s'agit d'une structure linéaire qui diffère de la matrice et l'entoure des deux côtés. Il réalise quatre fonctions vis-à-vis des espèces :

- un habitat;
- une voie de communication;

- un rôle de filtre ou barrière pour les espèces vivant dans les milieux de part et d'autre du corridor;
- une source d'effets biotiques et environnementaux pour la matrice.

Ils sont classés en corridors linéaires, en bande et fluviaux (FORMAN et GODRON, 1986).

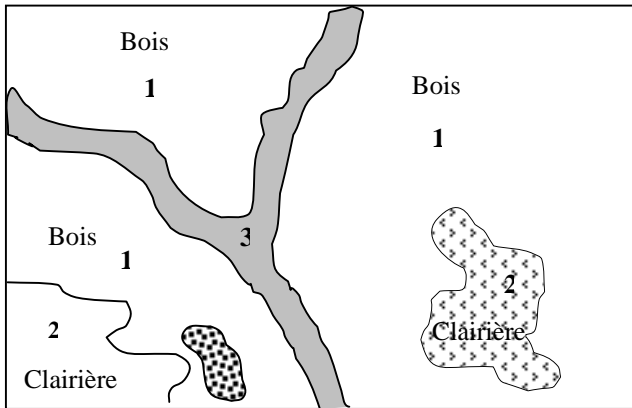


Figure 8 : Les éléments constitutifs du paysage

1 matrice, 2 taches, 3 corridor

2.4. L'écotone : un concept récent de l'écologie du paysage

2.4.1. Définition

L'étymologie du mot écotone est grecque, il est composé de « *oikos* », maison et de « *tonos* », tension. La plupart des auteurs (HOLLAND, 1988; JENIK, 1992) attribuent la paternité du terme à CLEMENT (1905) même si des travaux antérieurs ont eu lieu sur les zones de transition (VANPEENE BRUHIER, 1998). CLEMENT (1905), définit l'écotone comme « *une zone de tension où les principales espèces des communautés adjacentes atteignent leurs limites* ». Il complète cette définition, en 1907, par « *ligne de tension qui connecte les points d'accumulation de changements ou de changement abrupt (...) habituellement bien marquée entre formations, spécialement quand le milieu change, comme entre un étang et une prairie (...) moins évident entre deux formations* » (JENIK, 1992 in VANPEENE BRUHIER, 1998).

VANPEENE BRUHIER (1998) souligne que les premières définitions du mot restent descriptives jusqu'en 1983, où, elles s'orientent vers une approche plus fonctionnelle, insistant sur les notions de flux.

Une définition de vulgarisation (Grand Larousse, 1984 in VANPEENE BRUHIER, 1998) insiste sur la notion de changement d'échelle et le rôle fondamental de l'écotone dans les transferts d'énergie et de matière : « *Zone de transition et de contact entre deux écosystèmes ou deux communautés écologiques voisines. L'écotone peut être de taille et de structure très variées selon que l'on s'adresse à la zone de transition entre deux biomes, tels que la forêt boréale de conifères et la toundra, à la lisière d'une forêt ou aux zones situées entre l'eau libre d'un étang et sa rive. Du fait de la multiplicité des niches écologiques sur ces petits espaces, les écotones sont généralement plus riches en espèces et ont une diversité plus importante que les écosystèmes voisins. Ainsi, la végétation des lisières forestières comporte plus d'espèces que la forêt, la prairie ou le champ cultivé avoisinants. Ces écotones jouent donc un rôle fondamental dans le maintien des écosystèmes et assurent les transferts d'énergie et de matière entre ceux-ci.* »

La définition issue des réflexions du groupe de travail MAB/SCOPE, engagées en 1985, dans le cadre de la problématique des changements globaux amorce un véritable changement dans le

concept d'écotone. L'écotone y est défini⁷ comme « *une zone de transition entre systèmes écologiques adjacents, ayant un jeu de caractéristiques définies de manière unique par des échelles de temps et d'espaces, et par la force des interactions entre systèmes écologiques adjacents* » (HOLLAND, 1988 in HERITIER, 1995).

Les avancées conceptuelles apportées par cette définition concernent :

- la prise en compte d'une dimension spatio-temporelle;
- l'extension du concept à toutes les échelles hiérarchiques;
- la prise en compte de la force des interactions entre systèmes écologiques adjacents.

En 1988, les groupes de travail MAB/SCOPE avaient défini les hypothèses et les raisons retenues pour l'étude des écotones et notamment, l'importance des caractéristiques des écotones dans la compréhension des systèmes écologiques et le postulat que les écotones sont fortement sensibles et pourraient, par conséquent, être des indicateurs précoces des changements.

Dans le cas des mosaïques d'éboulis, les écotones constituent des zones de bordure des écosystèmes susceptibles d'être très sensibles et très affectées par les variations environnementales car les populations végétales correspondantes poussent près de leurs limites de tolérance par rapport à certains facteurs du milieu.

Cette évolution du concept d'écotone traduit parfaitement les préoccupations actuelles de la communauté scientifique. VANPEENE BRUHIER (1998), insiste sur le fait que les écotones ne peuvent plus être considérés comme de simples limites entre taches d'une mosaïque paysagère, mais ils ont désormais un rôle prépondérant tant au niveau de la dynamique paysagère que de la répartition des espèces.

2.4.2. Un concept applicable aux mosaïques biorhexistatiques d'éboulis

BAUDIERE et GAUQUELIN (1990), dans des travaux consacrés aux espaces supraforestiers des Pyrénées, ont développé une approche dynamique de l'écotone. Ils définissent l'écotone comme « *un enchaînement progressif de milieux et des végétations qui leurs sont associées le long d'un gradient paramétrique à coefficient d'atténuation plus ou moins accentué. La notion d'écotone repose en premier lieu sur une perception spatiale des faits. L'étude des écotones peut être abordée de deux façons : statique, en analysant la nature des relations qui conduisent au passage progressif d'un faciès au faciès juxtaposé; dynamique, en envisageant les possibles déplacements spatiaux de l'écotone dans le temps, c'est-à-dire en complétant de façon ponctuelle la nature des transformations susceptibles de se manifester et qui relèvent, selon les cas, d'un mécanisme de succession ou de substitution* ». Ils ajoutent que, du point de vue purement statique, l'intérêt d'un écotone est de permettre de bien cerner, dans des conditions de concurrence interspécifiques déterminées, l'amplitude de tolérance d'une population vis-à-vis de tel ou tel paramètre mésologique. L'écotone est donc une réalité spatiale relativement bien délimitée exigeant la présence d'un gradient et le déplacement d'un écotone relève de mécanismes de succession ou de substitution.

Selon eux, envisagés d'un point de vue statique, à l'échelle de la station (talus d'éboulis) certains passages latéraux de la pelouse à l'éboulis, présentent des écotones bien caractérisés. En revanche, l'interprétation dynamique de ces enchaînements est plus délicate.

⁷ « Zone of transition between adjacent ecological systems, having a set of characteristics uniquely defined by space and time scales, and by strength of interactions between adjacent ecological systems» (HOLLAND, 1988).

Ils s'attachent à démontrer qu'une zonation spatiale des écotones ne peut pas toujours être assimilée à une « *suite chronologique de faciès devant inéluctablement s'enchaîner les uns aux autres dans un sens déterminé* ». En effet, nous rejoignons ici les auteurs et pensons comme VANPEENE BRUHIER (1998) que l'hypothèse implicite utilisée dans les études synchrodiachroniques, à savoir que la synchronie (étude de plusieurs placettes d'âge différent au même moment) renseigne sur la diachronie (étude de la même placette au cours du temps), n'est pas forcément valable pour l'étude des écotones. Appliquée aux écotones, cette hypothèse revient à considérer que « *l'observation spatiale d'un écotone permettrait la visualisation instantanée de l'ensemble des successions qui sont théoriquement possibles dans le temps en un point donné* » (BAUDIERE et GAUQUELIN, 1990). Il convient donc d'utiliser cette hypothèse avec précaution.

Ainsi, le passage latéral d'un éboulis semi-végétalisé à la pelouse encadrante a presque toujours été perçu comme celui du passage d'une végétation pionnière à la végétation stabilisée proche d'un climax stationnel local. Ici, « *le point de vue classique consiste à considérer l'emprise progressive de la pelouse sur le milieu minéral par le truchement de végétaux dits stabilisateurs et l'on parle à juste titre de succession* ». Mais, ils nuancent ce point de vue en soulignant qu'il existe « *pourtant des cas, dans la chaîne pyrénéenne, bien plus fréquents que le précédent, où la modification de certains paramètres mésoclimatiques a eu pour conséquence de déclencher la mise en œuvre de processus érosifs et le passage latéral observé ne traduit pas un état de succession vers un stade « climacique », mais un phénomène inverse de substitution, irréversible dans les circonstances présentes, allant dans le sens de l'emprise du minéral sur un milieu autrefois humifère* ». Nous sommes parfaitement d'accord sur ce point et ajoutons que ce phénomène n'est pas propre à la chaîne pyrénéenne. En Chartreuse et dans les Alpes, les deux cas coexistent et dans le contexte environnemental actuel, nous sommes en droit de penser qu'il est possible qu'une dynamique l'emporte sur l'autre.

Dans l'étude des écotones, et notamment lorsque l'on s'intéresse à leur interprétation dynamique, BAUDIERE et GAUQUELIN (1990) ajoutent qu'il est fondamental, d'une part, de prendre en compte les paramètres mésoclimatiques (BAUDIERE, 1983) et, d'autre part, de caractériser l'influence humaine : « *L'approche doit être menée avec une extrême prudence et la description statique du phénomène écotone ne doit céder la place à son interprétation dynamique que dans la mesure où toute la lumière aura été faite sur l'histoire* » (BAUDIERE et GAUQUELIN, 1990).

Finalement, selon BAUDIERE et GAUQUELIN (1990), la réalité spatiale (écotone statique) peut donc traduire trois phénomènes :

- une **équilibre écotonique** : l'écotone ne bouge pas, il est constamment rajeuni par des modifications des paramètres mésoclimatiques ou anthropiques. Nous ajoutons aussi géomorphologiques;
- un **mécanisme de succession** : sur un site déterminé (ici, l'écotone dans sa position spatiale actuelle) le peuplement végétal va subir des modifications qualitatives et quantitatives de la structure et de la composition floristique : « *les transformations perçues s'inscrivant dans le cadre d'une évolution logique du couvert végétal de la parcelle en direction de la végétation potentielle que celle-ci serait en mesure d'abriter* » (BAUDIERE et GAUQUELIN, 1990);
- un **mécanisme de substitution** qui « *conduit à l'installation sur un emplacement donné, selon un mode irréversible, d'une végétation potentielle différente de la végétation climacique ayant pu exister préalablement* » (BAUDIERE et GAUQUELIN, 1990). Cette bifurcation de la succession peut être induite par des modifications directement dues à l'utilisation de

l'espace par l'homme (défrichage, drainage...) ou par des changements plus globaux (augmentation des températures...) (VANPEENE BRUHIER, 1998).

Dans ces deux derniers cas, il y a forcément un déséquilibre.

A l'issue de l'analyse développée ci-dessus, le concept d'écotone est sans aucun doute applicable aux mosaïques biorhexistatiques d'éboulis. Dans le cadre de notre recherche, nous étudierons la dynamique d'un écotone biorhexistatique représentatif, à l'échelle de la station, par le biais de parcelles instrumentées. Nous définissons les écotones biorhexistatiques comme étant des zones de transition plus ou moins graduelles entre des écosystèmes biostatiques - à couvert végétal dense et érosion ralentie - et des écosystèmes rhexistatiques faiblement végétalisés à activité morphogénique intense (ARQUES, 1999; CORONA *et al.*, 2003; ARQUES *et al.*, 2003 a). Au niveau de ces écotones, la contrainte climatique s'exerce simultanément sur deux paramètres en interrelation : la fréquence/intensité des processus d'érosion et l'écophysologie des espèces végétales. A partir d'études stationnelles du fonctionnement géodynamique et microclimatique annuel et intra-annuel, sur des parcelles instrumentées représentant différents stades de la colonisation végétale, une approche synchronodiachronique est menée pour tenter de conforter notre hypothèse principale (Introduction, paragraphe II).

Nous verrons, dans le paragraphe IV du chapitre 4 (deuxième partie) comment adapter plus précisément ce concept et les apports de l'Écologie du paysage à l'étude des mosaïques biorhexistatiques d'éboulis.

III. La biodiversité : un concept omniprésent, complexe et dynamique

Les talus d'éboulis cartusiens n'ont pas subi de gros aménagements ou impacts par le passé et ce sont les cycles sédimentaires qui influencent l'évolution du paysage à l'échelle de plusieurs décennies. Ces éboulis constituent donc des mosaïques de milieux soumis aux cycles sédimentaires. On parle ainsi de mosaïques biorhexistatiques où la diversité des facteurs abiotiques, à grande échelle, entraîne une diversité biologique.

Notre objectif n'est pas de présenter le débat dont fait l'objet la biodiversité, sur ses différentes facettes selon l'appartenance à tel ou tel groupe scientifique (écologues, biologistes, géographes...) mais d'essayer d'en donner une définition aussi claire et complète que possible.

3.1. Un concept polysémique

« *En moins de 10 ans, la biodiversité est devenue un concept central dans le champ de l'environnement, rejoignant d'autres concepts-clés comme le développement durable, les changements globaux...* » (PARIZEAU, 1997). Les études relatives à ce sujet sont de plus en plus nombreuses et portent sur des milieux divers à petites ou à grandes échelles : bocages, coteaux, territoires agricoles, forêts de montagne, stations, versants, région, biosphère ...

Comme le soulignait LEPART lors de l'édition 1996 du colloque « Forêtterranée », la biodiversité est d'abord un concept politique qui préoccupe l'ensemble de la société et ouvre un large champ de recherches scientifiques relatif à la diversité du vivant, des écosystèmes et des interactions entre les systèmes biologiques. « *La biodiversité n'est donc plus seulement une préoccupation des scientifiques mais un véritable fait de société* » (LEVEQUE, 1994). Les conférences et conventions qui se sont multipliées sur ce thème illustrent ce propos et la prise de conscience progressive par les nations du monde de la diversité biologique, des menaces auxquelles elle est exposée, et de la nécessité de mettre en place des stratégies volontaristes à long terme pour protéger cette ressource essentielle

(Conférence de Ramsar, 1971; Conférence de Rio, 1992; Convention de Berne et Directive Communautaire « Habitats, faune, flore », 1992; Réseau Natura 2000).

Ce sujet, bien que relativement récent, a déjà fait l'objet de très nombreuses publications, et devant cette masse importante d'informations, il paraît indispensable de positionner notre recherche. Ainsi, c'est au travers de quelques définitions avancées par des écologues, des géographes et des biologistes que nous poserons les bases de notre approche.

Dans son acception la plus courante, le terme de biodiversité dérive d'une expression simple : « variabilité du vivant ou des formes de vie » (GOSSELIN et LAROUSSINIE (2004). Il s'agit alors de la richesse en espèces de la planète. La définition la plus largement citée est celle du US Congress Office of Technology Assessment (OTA, 1987) : « *Biological diversity refers to the variability among living organisms and the ecological complexes in which they occur. Diversity can be defined as the number of different items and their relative frequency. For biological diversity, these items are organized at many levels, ranging from complete ecosystems to the chemical structures that are the molecular basis of heredity. Thus, the term encompasses different ecosystems, species, genes, and their relative abundance* ».⁸ La biodiversité peut donc être schématiquement présentée sous trois facettes interdépendantes (BARBAULT, 1995) : elle prend ses racines dans les systèmes moléculaires (diversité intraspécifique, variabilité génétique), elle se déploie dans la variabilité interindividuelle (diversité spécifique, groupes fonctionnels) et elle s'exprime dans la structuration, la dynamique et la complexité des écosystèmes (diversité écologique, variété des écosystèmes).

A côté de cette définition, il existe de nombreuses autres expressions de la biodiversité. Certains auteurs ajoutent un quatrième niveau d'organisation : la diversité des écosystèmes (mosaïques d'écosystèmes en interaction) (DUBOURDIEU *et al.*, 1995); ou d'autres dimensions : « *La biodiversité est un concept qui a une réalité biogéographique. Elle est liée à une portion d'espace localisée, avec une histoire, un contexte, des contraintes...* » (DECONCHAT *et al.*, 1998b). Elle a donc une réalité spatio-temporelle.

Pour LEVEQUE (1994) elle recouvre trois dimensions qui tendent vers un même objectif, celui du développement durable :

- une dimension éthique : c'est un héritage de l'Humanité;
- une dimension écologique : rôle de la diversité dans le fonctionnement des écosystèmes et conséquences d'une réduction de celle-ci;
- une dimension économique : quantification en terme financier des usages actuels et potentiels de la biodiversité.

Ou lui attribuent certaines fonctions : « *La biodiversité est un médiateur : elle permet de visualiser les impacts des activités humaines, ainsi il est possible d'identifier les conséquences de certaines activités pas forcément visibles* » (LEVEQUE, 1998). « *La biodiversité c'est conjointement un « capital biologique » à conserver comme patrimoine et un ensemble de ressources biologiques à valoriser au niveau d'une gestion durable des espaces* » (CHAUVET et OLIVIER, 1993). C'est une ressource naturelle comme l'eau et le sol, cependant à la différence de ces autres ressources, elle possède une dynamique évolutive et c'est là pour nous un point essentiel.

⁸ « *La diversité biologique représente la variété et la variabilité des organismes vivants et des écosystèmes dans lesquels ils se développent. La diversité peut être définie comme le nombre et la relative abondance des éléments considérés. Les composantes de la diversité biologique sont organisées en plusieurs niveaux, depuis les écosystèmes jusqu'aux structures chimiques qui sont les bases moléculaires de l'hérédité. Ce terme englobe donc les écosystème, les espèces, les gènes, et leur abondance relative* ».

Enfin, nous aimerions terminer cette définition par la mise en évidence d'une notion que peu de définitions laissent apparaître « *La biodiversité est l'ensemble des interrelations entre les espèces, leur variabilité génétique, et les écosystèmes. La biodiversité n'est pas la systématique, ni la génétique, ni l'écologie. La biodiversité utilise ces différentes disciplines dans une approche globale. La biodiversité est **une notion dynamique du monde vivant*** » (LEVEQUE, 1998).

Mesurer la biodiversité telle qu'elle a été définie à l'origine par WILSON (1988) signifie compter l'ensemble des espèces animales et végétales présentes en un endroit donné. De telles études, prenant en compte la totalité de la diversité du vivant, depuis les organismes cellulaires jusqu'aux vertébrés sont irréalisables. Ainsi, notre attention portera plus particulièrement sur la phytodiversité en termes de diversité spécifique et de richesse spécifique.

3.2. Biodiversité et niveaux de perception

Nous tenterons d'évaluer la biodiversité actuelle des talus d'éboulis à deux niveaux scalaires :

- la diversité écosystémique à l'échelle des mosaïques paysagères (écocomplexes = versants à talus d'éboulis);
- la diversité spécifique à l'échelle de la station (talus d'éboulis) et de la parcelle.

Ce travail vise à évaluer l'impact de la structure paysagère, en mosaïque biorhexistasique, des talus d'éboulis sur la répartition de la richesse et de la diversité spécifiques. Ceci, dans l'optique de souligner les changements potentiels futurs de biodiversité induits par les changements environnementaux.

IV. Conclusion

Finalement, aborder l'étude géo-écologique de la structure et du fonctionnement des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis, dans une perspective de dynamique évolutive, nécessite l'utilisation d'un certain nombre de concepts et notions empruntées à la géographie et l'écologie. Dans le contexte environnemental actuel, que l'on s'intéresse à la théorie de la biorhexistasie, à l'écologie du paysage où à la biodiversité, l'étude géo-écologique repose sur trois éléments fondamentaux : la dimension spatiale du phénomène, la nécessité d'adopter une démarche systémique pour appréhender l'étude des mosaïques à plusieurs niveaux d'organisation (de l'écocomplexe paysager à la parcelle) et enfin, l'obligation de prendre en compte les facteurs mésologiques et l'histoire de l'occupation humaine qui agissent à des échelles spatio-temporelles diverses.

La démarche adoptée sera détaillée dans la deuxième partie de ce travail. Auparavant, nous allons présenter le terrain d'application, notamment en insistant sur ses caractéristiques géomorphologique, végétale, climatique et humaine. Cela nous permettra de définir les facteurs qui sont à l'origine de la structure biorhexistasique des mosaïques paysagères d'éboulis.

CHAPITRE 3

Le terrain d'application : Le massif de la Chartreuse (Parc Naturel Régional et Réserve Naturelle des Hauts).

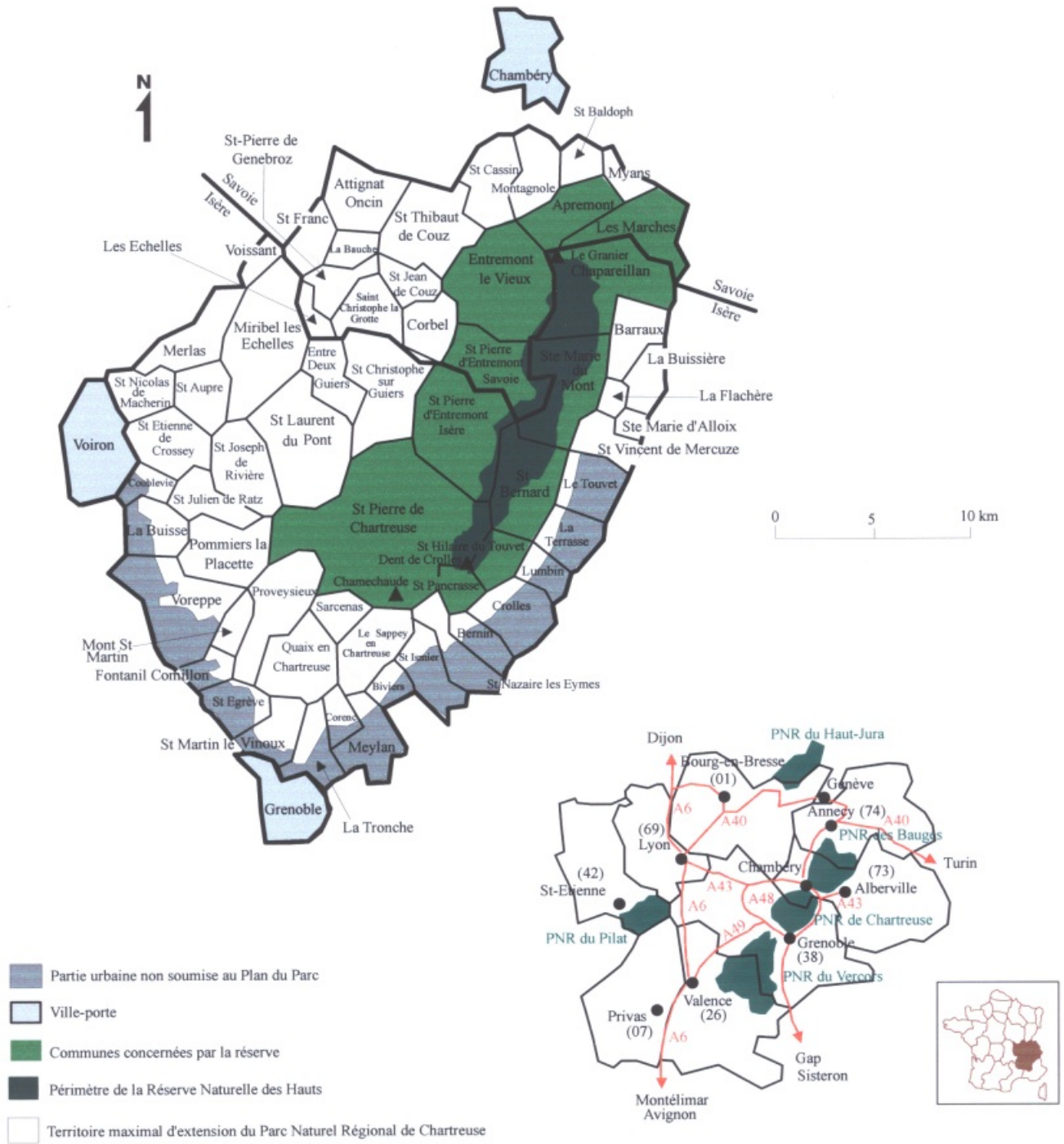
I. Localisation du terrain d'étude

Le massif de la Chartreuse est situé dans les Alpes françaises du Nord. Il est délimité au sud-ouest par la cluse de Voreppe et au nord par celle de Chambéry et s'étend sur environ 40 kilomètres de long. Il est situé « à cheval » entre les départements de l'Isère et de la Savoie dans la région Rhône - Alpes (Carte 1). Les talus d'éboulis cartusiens font partie intégrante du Parc Naturel Régional de Chartreuse et certains sont situés dans la Réserve Naturelle des Hauts (Carte 1).

Le massif de la Chartreuse est le plus petit des massifs préalpins. Il s'agit d'un massif calcaire fortement individualisé dans la géomorphologie des Alpes du Nord et qui contraste avec les régions voisines. Tout comme le Vercors au sud et les Bauges, au nord-est, c'est un territoire de moyenne montagne (Carte 2) :

- l'ouest est caractérisé par un ensemble de plis de calcaire urgonien assez élevés (1500 à 2000 m) et présente une série de barrières abruptes : Grande Sure, Grand Som...;
- la région centrale, au contraire, est constituée de dépressions larges et profondes, creusées dans des marnes et des calcaires gréseux (bassin de Saint-Pierre-de-Chartreuse, vallée des Entremonts) et dominées par de grands escarpements tournés vers l'Ouest;
- la bordure orientale du massif est caractérisée par un système d'anticlinaux érodés et de synclinaux perchés. Le plus caractéristique est le synclinal perché des Hauts Plateaux qui s'étend de la Dent de Crolles au Mont Granier sur environ 15 km et dont les crêts urgoniens surplombent le Grésivaudan de près de 1800 m. C'est le domaine des corniches calcaires, dominant des versants marneux ou marno-calcaires couvert d'éboulis, des espaces forestiers et des pelouses subalpines. Ces différents milieux présentent des enjeux biologiques importants.

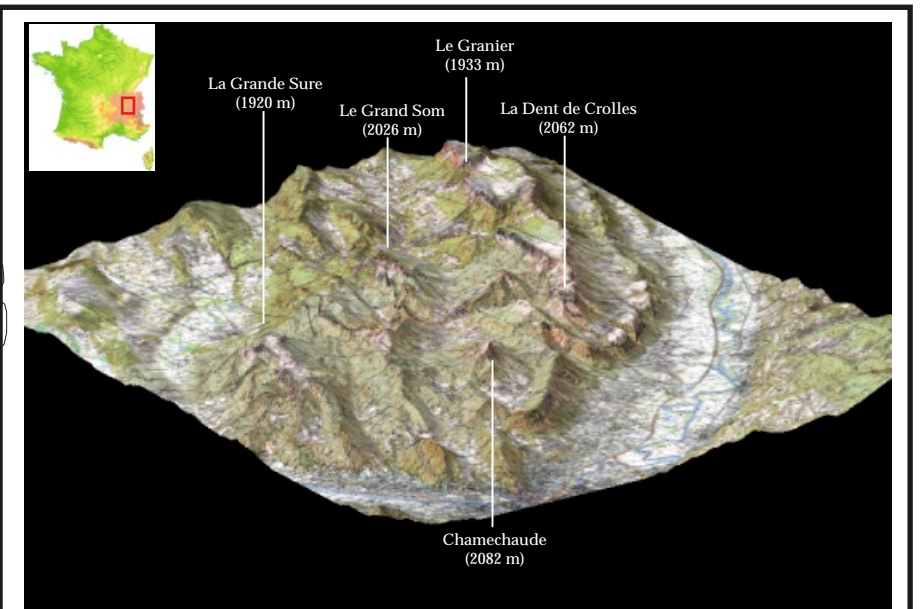
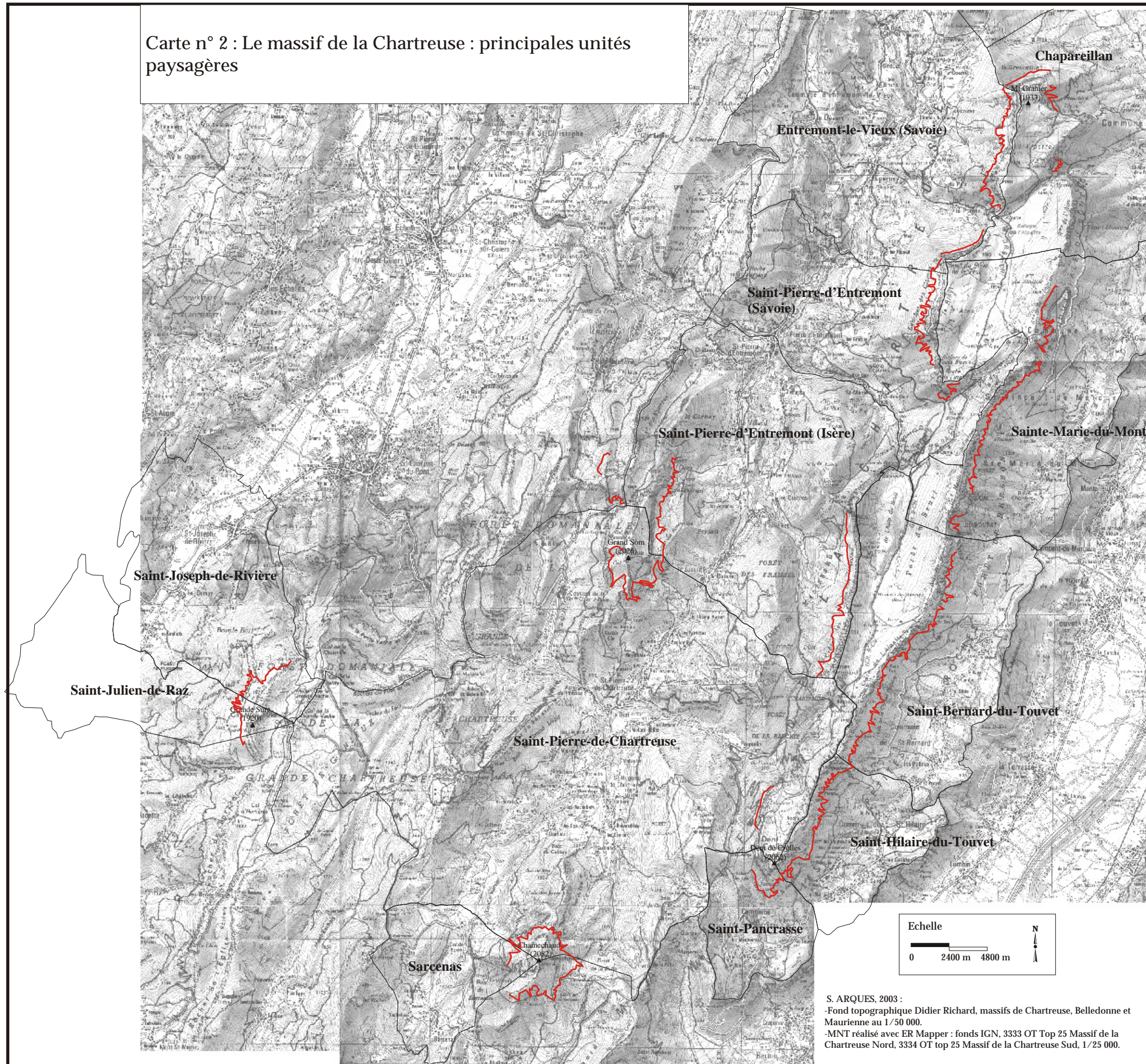
Carte n° 1 : Le massif de la Chartreuse et ses espaces protégés





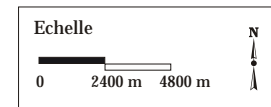
tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2006

d'après la Charte du PNR de Chartreuse (Charte d'objectifs), 1995.

Carte n° 2 : Le massif de la Chartreuse : principales unités paysagères



-  Limite communale
-  Talus d'éboulis vifs actuels



S. ARQUES, 2003 :
 -Fond topographique Didier Richard, massifs de Chartreuse, Belledonne et Maurienne au 1/50 000.
 -MNT réalisé avec ER Mapper : fonds IGN, 3333 OT Top 25 Massif de la Chartreuse Nord, 3334 OT top 25 Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000.

Les altitudes s'échelonnent entre 300 et 2082 m (Chamechaude). La topographie est marquée par de fortes variations d'expositions et de micro-expositions. Vers 900 m, les versants marneux offrent successivement des pentes douces occupées par la hêtraie-sapinière-pessièrè mésophile (ubac) ou mésoxérophile (adret) et les anciennes clairières pastorales et des versants à pente plus forte (de 1600 à 1800 m), fréquemment entaillés de couloirs avalancheux, et occupés par les talus d'éboulis. Au-delà de 1800 mètres, la corniche de calcaire urgonien forme les hauts sommets et la pinède de pins à crochets laisse parfois la place aux landes subalpines et aux alpages.

Un intérêt particulier à ce terrain d'étude est qu'il appartient au Parc Naturel Régional de Chartreuse et à la Réserve Naturelle des Hauts (Carte 1). Celle-ci englobe l'ensemble du synclinal perché des Hauts Plateaux c'est-à-dire la totalité des pelouses subalpines et des forêts sommitales, les corniches de calcaire urgonien et l'ensemble des talus d'éboulis. La limite « administrative » de la Réserve se confond souvent avec les courbes de niveau situées au contact de la zone distale des éboulis et du front forestier, vers 1500 m (Carte 2).

II. Géomorphologie structurale et géomorphologie dynamique externe

2.1. La structure géologique

Le massif de la Chartreuse provient du soulèvement profond et de la déformation de la couverture sédimentaire d'âge mésozoïque. Elle a été plissée, faillée et déversée vers le nord-ouest suite à une orogénèse datant du tertiaire. Elle est formée exclusivement de terrains sédimentaires, des plus anciens (Jurassique) aux terrains quaternaires les plus récents et notamment les talus d'éboulis. Le massif est divisé en trois domaines structuraux dont le plus remarquable est probablement celui où règne l'inversion de relief, « *à l'est du front de chevauchement des massifs subalpins, les plis se caractérisent par des charnières anticlinales aiguës, déversées vers l'est (Roc d'Arguille, Col de Porte) et de larges synclinaux aux pendages subhorizontaux* » (DEBELMAS, 1970). On distingue (Figure 9) :

-la Chartreuse occidentale : elle est occupée par un anticlinal, délimité à l'Ouest par une faille de chevauchement, et souligné par la conformité du relief. Les plus hauts sommets sont en partie portés par les calcaires du Fontanil (Grande Sure, 1920 m; Rochers de Lorzier, 1838 m).

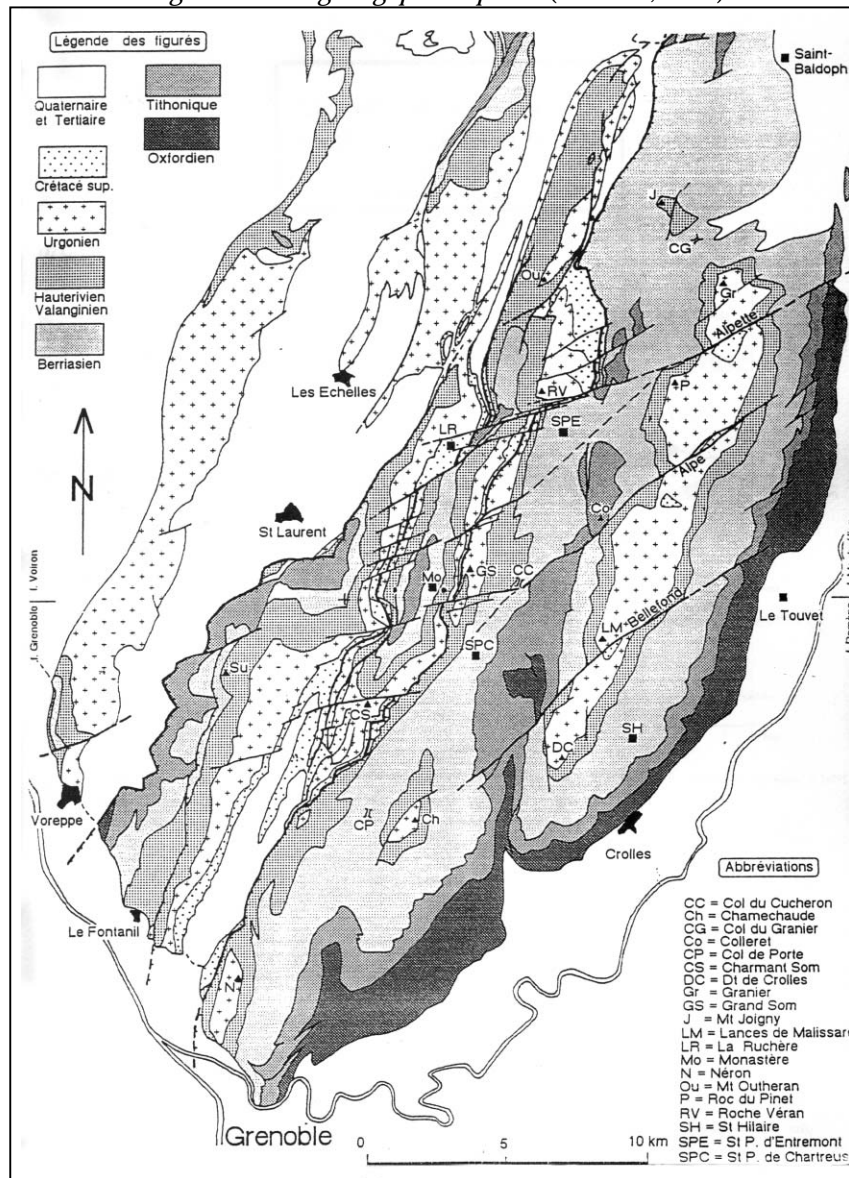
-la Chartreuse médiale : elle est aussi plissée en un anticlinal, mais présente un relief inverse en son centre. La couche urgonienne a été affouillée (ou discontinuée dès la sédimentation) à cet endroit et les couches marneuses sous-jacentes ont subi une érosion poussée.

-la Chartreuse orientale : la plus vaste, est nettement faillée, notamment sous la forme de décrochements (décrochement de Chapareillan-Col de l'Alpette, décrochement du Col de l'Alpe et décrochement de Saint-Vincent-de-Mercuze-Aulp du Seuil...). Sa principale caractéristique est l'inversion généralisée du relief.

Le val perché des Hauts Plateaux, caractérisé par la présence en continu d'une imposante corniche de calcaire urgonien (parfois 300 à 400 m de commandement), s'étend sur environ 15 km de la Dent de Crolles au Mont Granier. Il prend l'allure d'une vaste gouttière synclinale dominée sur sa bordure occidentale par les Lances de Malissard et sur sa frange orientale par la crête de l'Aulp du Seuil. Le synclinal des Hauts Plateaux domine à l'Est la vallée de l'Isère (Grésivaudan). Gradin intermédiaire entre le synclinal des Hauts Plateaux et la vallée du Grésivaudan, le Plateau des Petites Roches constitue la limite orientale de ce « rebord ». Sur le versant marneux oriental des Hauts Plateaux, installés sur des terrains datant de l'Hauterivien et du Valanginien, les talus d'éboulis se succèdent, parfois recouverts par la végétation, parfois présentant des éboulis vifs.

Par ailleurs, c'est dans ce système synclinal oriental que nous trouvons les plus hauts sommets du massif (Dent de Crolles, 2062 m, Mont Granier, 1933 m et le pupitre urgonien de Chamechaude, 2082 m).

Figure 9 : carte géologique simplifiée (GIDON, 1991)



2.1.1. Une stratigraphie marquée par une alternance de calcaires et de marnes

La caractéristique structurale la plus importante dans ce massif est la présence de binômes roche tendre (horizons de marnes et de marno-calcaires) / roche dure (calcaires), l'ensemble présentant une structure litée (Figure 10). Celle-ci est caractérisée par une succession de couches calcaires séparées par d'importants horizons marneux. La mise en place de cette série sédimentaire s'est réalisée du Jurassique inférieur au Crétacé supérieur.

2.1.2. Le faciès urgonien

La morphologie du relief cartusien est déterminée par les deux « barres calcaires » du Portlandien (faciès tithonique) et du Barrémien-Aptien (faciès urgonien) qui apparaissent au-dessus des talus marneux et marno-calcaires, respectivement de l'Oxfordien et du Valanginien-Hauterivien (Figure 10). Le calcaire urgonien est constitué de deux strates principales qui correspondent au Barrémien et à l'Aptien inférieur :

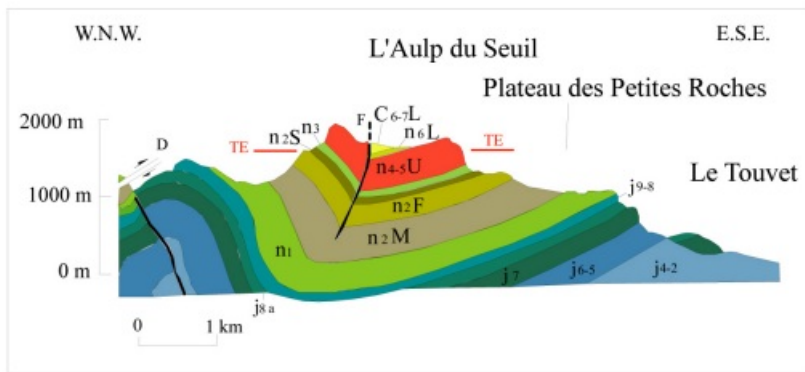
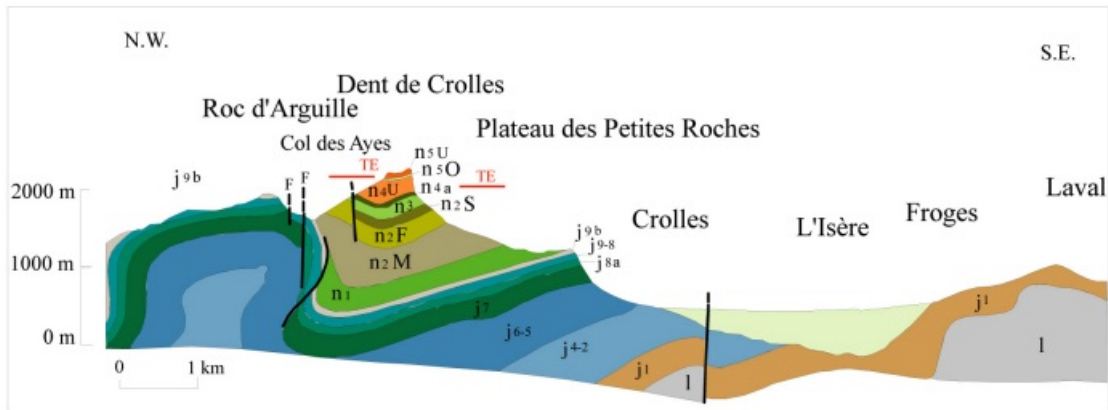
- la masse supérieure, formée de calcaires à rudistes ou bioclastiques, épaisse de 50 à 100 m datant du Bédoulien et représentant approximativement l'Aptien inférieur;
- la masse inférieure, à base de calcaires blancs, épaisse de plus de 200 m (100 à 300 m) datant du Barrémien supérieur.

Les dépôts urgoniens sont riches en rudistes, miliolidés et algues calcaires (cyanophycées) avec parfois quelques polypiers. Ils se présentent en deux masses stratifiées, séparées par une couche à Orbitolines datant du Bédoulien d'environ 5 à 50 m. Elle se caractérise par une alternance de bancs calcaires jaunâtres avec des marnes et des calcaires marneux.

L'urgonien est un calcaire blanc pur, plus ou moins grossier et « zoogène », c'est-à-dire formé de débris de coquilles, de coraux, parfois entièrement triturés en une fine vase blanche et réunis par un ciment calcaire pur; sa teneur en carbonate de calcium atteint 98 ou 99% avec parfois quelques cristaux de calcite. De couleur blanche, compacte et solide, c'est une roche peu poreuse et peu perméable. Les terrains urgoniens sont fracturés, fissurés et parcourus par de nombreux réseaux souterrains. Le calcaire urgonien est très sensible à la dissolution karstique du fait des fortes précipitations et d'eaux chargées en CO₂ sous forêts et pelouses d'où la présence de dalles lapiazées, de petites cuvettes et de rigoles due aux eaux stagnantes circulant lentement (pluies et fontes des neiges). Des calcaires présents en Chartreuse, celui à faciès urgonien a la plus grande aptitude à la stratification et la karstification, d'une part parce qu'il est très pur, peu poreux et très compact et, d'autre part, parce qu'il est peu plastique donc sensible aux accidents tectoniques.

Pour plus de détails concernant la géologie du massif de la Chartreuse, nous renvoyons au travaux de DEBELMAS (1970), ARNAUD-VANNEAU (1980), BOZONNAT (1980) et GIDON (1991, 1992, 1993).

Figure n° 10 : Géologie de la Chartreuse orientale



TE : talus d'éboulis

Crétacé :

- | | | | |
|----------------|--|----------|-------------|
| C 6-7L | Crétacé supérieur (Lauzes) | Urgonien | |
| n 6 L | Aptien supérieur (Lumachelle) | | |
| n 5 U | Bédoulien (masse supérieure) | | |
| n 5 O | Couche à Orbitolines | | |
| n 4 U | Barrémien supérieur (masse inférieure) | | |
| n 4+5 U | Urgonien non différencié | | |
| n 3 | Hauterivien | | |
| n 2 S | Valanginien supérieur (Calcaires à silex) | | Valanginien |
| n 2 F | Valanginien supérieur (Calcaires bicolores du Fontanil) | | |
| n 2 M | Valanginien inférieur (Marnes de Narbonnes) | | |
| n 1 | Berriasien | | |

Jurassique :

- | | |
|--------------|---|
| j 9b | Tithonique supérieur |
| j 9-8 | Tithonique inférieur - Kimméridgien supérieur |
| j 8a | Kimméridgien moyen - inférieur |
| j 7 | Séquanien (Kimméridgien inférieur - Oxfordien terminal) |
| j 6-5 | Rauracien (Oxfordien supérieur) |
| j 4+2 | Terres noires (Oxfordien inférieur - Bathonien supérieur) |
| j 1 | Formation de Bramefarine (Bajocien) |
| l | Lias indifférencié |

F : faille

D : décrochement

2.2. Géomorphologie dynamique externe

Le modelé cartusien est caractérisé par une grande diversité de formes d'érosion, différenciées selon leur importance dans la topographie d'ensemble et selon les processus qui les mettent en place. Ce sont des processus d'érosion chimique (dissolution) et mécanique (gélifraction, solifluxion et ravinement).

Les alternances de roches dures/roches tendres sont à l'origine de l'organisation générale du relief mais l'érosion aboutit également à de multiples formes mineures. Dans le détail, les formes apparaissant dans le massif de la Chartreuse peuvent être classées en trois ensembles : glaciaires, karstiques et périglaciaires. Nous ne développerons que les modelés karstiques et périglaciaires.

2.2.1. Le modelé karstique

Ce type de relief est dû à la corrosion karstique et à la perméabilité du calcaire par les eaux météoriques. Il affecte principalement les calcaires urgoniens car ils sont épais et sensibles à la dissolution. Les facteurs de la karstification en Chartreuse sont multiples : forte teneur en carbonates des roches, forte pluviométrie dans le massif, conditionnement lithostructural (fracturations...) et fort gradient hydraulique. On rencontre ainsi des formes souterraines (les réseaux karstiques souterrains sont très développés de la Dent de Crolles au Mont Granier) et des formes de surface (lapiés, dolines...). L'extension et les caractéristiques du modelé karstique dépendent à la fois de la taille des affleurements et de leur degré de tectonisation.

2.2.2. Le modelé périglaciaire¹

Les paysages cartusiens, dans leur modelé d'ensemble, expriment surtout l'influence des processus propres aux milieux froids. Des processus génétiques particuliers sont responsables de la physionomie des parois et des accumulations à leur pied. Cette phase morphogénétique s'est déclenchée après le retrait glaciaire, celui-ci a provoqué des phénomènes de décompression dans les versants ce qui a libéré de grandes masses rocheuses (écroulements, éboulements, glissements). Les formes et formations périglaciaires sont associées aujourd'hui à deux processus dominants : la gélifluxion et la gélifraction/solifluxion.

De par son climat frais et humide, la Chartreuse connaît de fréquentes variations thermiques. Les amplitudes ne sont généralement pas très fortes mais fréquentes. Il en résulte une exploitation intense de la roche en place par le gel qui est à l'origine de l'éboulisation des parois. Sous l'effet de la gélifraction, les corniches urgoniennes ont livré de nombreux débris qui ont alimenté les talus d'éboulis sous-jacents. En Chartreuse, les morphologies dominantes sont caractérisées par la présence du couple corniche-talus d'éboulis. On se contentera ici d'une présentation sommaire du couple corniche-talus d'éboulis car il fera l'objet d'une étude détaillée dans la troisième partie de ce travail.

¹ Le terme de modelé périglaciaire est pris dans son acceptation la plus large (DYLIKOWA, 1962). Il désigne donc les paléo-formes développées en bordure des anciens glaciers alpins et pré alpins mais aussi le modelé actuel lié à l'action du gel.

2.2.2.1. Les corniches de calcaire urgonien

« Ce sont de petites corniches ou de grands escarpements formés par des strates de gélivité inégale et différemment affectés par la tectonique. Ainsi, le travail de l'érosion différentielle donne naissance à une alternance de balmes et d'encorbellements et à une succession de piliers et de rentrants » (POULIN, 1994). L'érosion de ces escarpements génère des talus d'éboulis qui descendent au contact de la forêt. Le modelé d'accumulation constitue un modelé périglaciaire où alternent éboulis organisés et tapis de gélifraacts.

2.2.2.2. Les talus d'éboulis

Ce sont les terrains de couverture superficielle qui couvrent les plus grandes surfaces dans le massif de la Chartreuse. Les matériaux urgoniens constituent la fraction la plus importante de ce type de sédiment. Certains auteurs (DEBELMAS *et al.*, 1969), distinguent quatre catégories :

- Les éboulis récents holocènes encore vifs et alimentés par l'érosion actuelle, ils ne sont ni stabilisés, ni complètement colonisés par la végétation, ils tapissent les contreforts des corniches urgoniennes dont ils reçoivent les eaux de ruissellement (Photos 1 et 2);
- Les éboulis relativement anciens stabilisés (Würm) et colonisés par la végétation, ils recouvrent souvent les éboulis anciens au pied du talus hauterivien (Photos 1 et 2);
- Des éboulis anciens, probablement antérieurs à la dernière glaciation car ils sont recouverts par de la moraine en plusieurs points du rebord subalpin, très puissants et réentaillés par une érosion plus récente qui a permis l'emboîtement des types d'éboulis précédents. Ils devaient constituer à l'origine une « jupe » à peu près continue, au moins sur les deux versants du chaînon Granier-Aulp du Seuil;
- Des processus d'écroulement qui ont formé des cicatrices discernables dans la morphologie des parois et des éboulis à très gros blocs d'âge indéterminé (par exemple, l'écroulement des Abymes de Myans au NE du Granier en 1242).

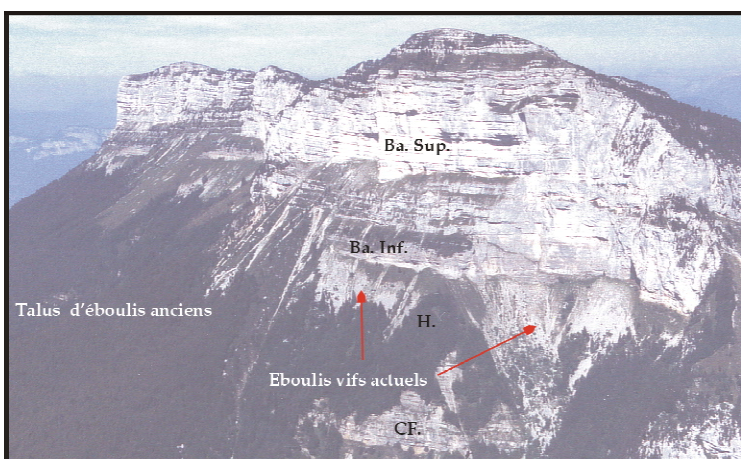


Photo 1. Versants de La Plagne et du Granier-Tencovaz.

Ba. Sup : Barrémien supérieur
 Ba. Inf : Barrémien inférieur
 H. : Hauterivien
 CF. : Calcaires du Fontanil

Cliché : S. ARQUES, vu du Pinet, 08/01

Photo 2. Flanc occidental de la Dent de Crolles

Corniche à sangles étagées.

Ba. Sup : Barrémien supérieur

CO : Couche à orbitolines

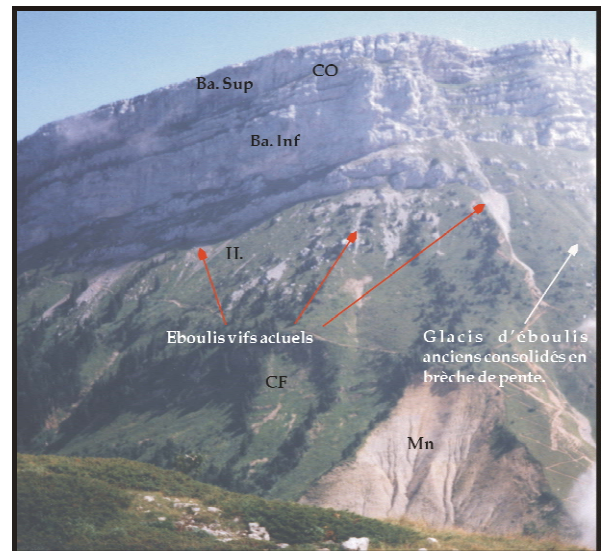
Ba. Inf : Barrémien inférieur

H. : Hauterivien

CF : Calcaires du Fontanil

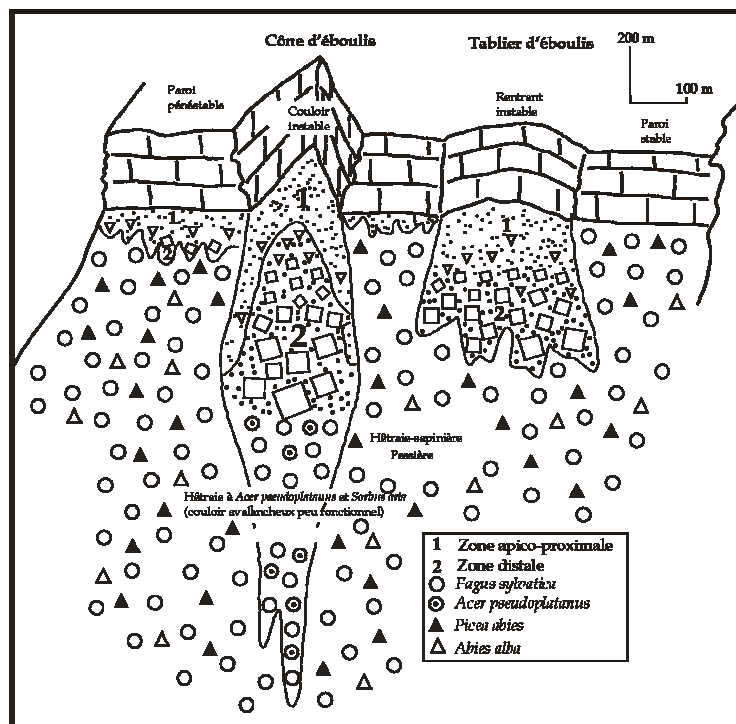
Mn. : Marnes de Narbonne (bad land)

Cliché : S. ARQUES, vu de l'Ouest depuis Pravouta (Roc d'Arguille), 07/99.



Dans le cadre de notre recherche, nous avons travaillé sur les talus d'éboulis vifs actuels (Photos 1 et 2). Ils se présentent sous forme de cône ou de tablier, ce dernier cas étant actuellement le plus représenté en Chartreuse (Figure 11). Les cônes se situent au débouché de couloirs d'alimentation et sont souvent prolongés par d'anciens chenaux avalancheux qui pénètrent dans la forêt. Les tabliers sont surmontés de corniches massives, biseautées ou à sangles étagées. Leur extension longitudinale est réduite mais ils s'étalent transversalement sur de vastes surfaces. D'autres formes plus réduites jalonnent les versants, elles témoignent de l'extension d'anciens tabliers ou cônes qui ont disparu sous la végétation (pelouse, forêt) : langues à matériaux moyens ou fins, tapis de frags...

Figure 11 : Corniches et talus d'éboulis de calcaire urgonien (1600-2000 m) : principaux types



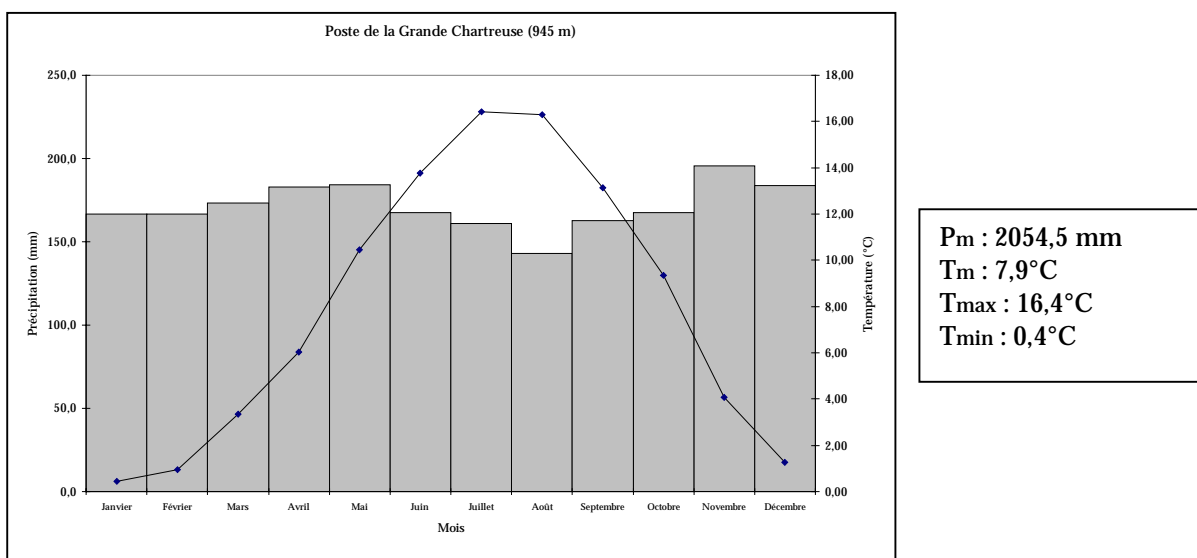
A cette diversité géologique et géomorphologique s'ajoute une diversité climatique.

III. Un climat de moyenne montagne humide et fraîche

Les composantes climatiques d'une région peuvent être envisagées à plusieurs échelles : macroclimatique, mésoclimatique et microclimatique. Dans ce paragraphe, nous développerons l'échelle macroclimatique et nous renvoyons à la troisième partie de ce travail pour les caractéristiques méso- et microclimatiques.

« *La plus mouillée, la plus enneigée des unités subalpines ne peut manquer d'être la plus froide* » (BLANCHARD, 1938). Le Massif de la Chartreuse forme une unité climatique remarquable. Le climat présente à la fois des traits continentaux et atlantiques. Il est relativement frais et est caractérisé par des précipitations abondantes (Graphique 18). L'ensemble de la zone d'étude baigne dans un climat océanique atténué (PAGNEY, 1988), c'est-à-dire qu'elle est soumise aux flux d'ouest et du nord. Les principales variations résultent des effets majeurs de l'orographie et de l'altitude.

Graphique 18 : Diagramme ombrothermique du poste de la Grande Chartreuse (1961-2003)



C'est la relative fraîcheur et l'humidité qui font l'originalité du massif, première barrière naturelle face aux perturbations venues de l'Atlantique.

3.1. Les précipitations

Les précipitations et la nébulosité induisent une relative fraîcheur des températures et confèrent aux parties occidentales (Grande Sure), centrale (Grand Som) et orientale du massif (Chamechaude, Dent de Crolles) un climat frais et humide. Plus à l'est, sur le rebord subalpin (Plateau des Petites Roches et vallée du Grésivaudan) le climat revêt une nuance continentale (Aulp du Seuil). Les secteurs du sud (Saint-Eynard ...) sont caractérisés par des précipitations plus faibles et bénéficient d'un ensoleillement plus élevé.

Les précipitations sur le massif sont caractérisées par :

- **leur total élevé** (Graphique 18) : Les précipitations ont été évaluées par PATUREL et VALEROY (1997, modèle AURELHY) sur l'ensemble du massif de 1500 mm à 1800 mm par an en fonction de l'altitude et de l'exposition. A la station de la Grande Chartreuse, elles avoisinent les 2000 mm/an et sont souvent supérieures à 150 mm/mois à l'exception du mois d'août (Graphique 18, 3.1.3.2.). Les moyennes des dernières années et notamment des années 2001 et 2002 sont assez élevées : 2409,8 mm pour 2001 et 2309,2 mm pour 2002. L'année 2003 a été relativement chaude et peu pluvieuse, la moyenne des précipitations est inférieure (1508,1 mm). Les données présentent

une variabilité interannuelle très marquée (3.1.3.2) confirmée par PACHE (1998) qui ajoute que si le massif de la Chartreuse est caractérisé par ses fortes précipitations annuelles (> 1500 mm), il ne présente pas de régime saisonnier marqué. Le graphique 18 confirme cette constatation. Cependant, la tendance générale (Graphique 18) indique que les précipitations sont plutôt importantes en fin d'automne et début d'hiver (novembre et décembre) et que les printemps sont régulièrement et abondamment arrosés surtout en avril et en mai;

- **une disparité dans les mesures entre les stations de Chartreuse à pluviosité élevée et celles du Grésivaudan plus sèches** : ces disparités ont été prises en compte dans l'échantillonnage des talus d'éboulis étudiés (Cartes 2 et 5). Les variations de la lame d'eau annuelle sont essentiellement dépendantes de l'altitude mais pas de manière uniforme sur l'ensemble de la Chartreuse. L'avant-pays cartusien est très arrosé, car il profite des ascendances provoquées par les crêts qui constituent des barrières naturelles à l'ouest du massif (tablier d'éboulis mixte de la Grande Sure). Les stations de l'est, bien qu'encore très arrosées, le sont globalement moins que celles de l'ouest à altitude égale. En Chartreuse centrale, les précipitations ont été évaluées à 3000 mm au Grand Som avec un angle de GAMS corrigé (PACHE, com. orale, 2002). Les versants situés en Chartreuse orientale (Dent de Crolles, Chamechaude), présentent des précipitations moyennes annuelles pour la période 1961-1990 de l'ordre de 1800 à 2000 mm alors que les versants situés plus à l'est (Plateau des Petites Roches : cône d'éboulis de l'Aulp du seuil, Tablier d'éboulis des « Pelloux ») et au Nord (tablier de La Plagne) présentent des moyennes comprises entre 1500 et 1800 mm entre ces deux dates. Ces aspects seront affinés dans la troisième partie.

La neige, malgré la faible altitude du massif et l'impact du réchauffement climatique récent est toujours présente (3.1.3.3.). Le manteau neigeux persiste en moyenne de décembre à avril (Graphique 17, 3.1.3.3.). Au Col de Porte, la hauteur moyenne de neige oscille entre 2 cm et 2,08 m (Météo France, 2002). Cependant, l'évolution sur les 40 dernières années indique que la durée au cours de laquelle le manteau neigeux au sol dépasse 20 cm a fortement diminuée et le nombre d'hivers présentant un faible enneigement a augmenté depuis la fin des années 80 (Météo France, 2002). Nous ne disposons pas de données relatives à l'évolution du manteau neigeux pour les sites de la bordure orientale du massif, exposés à l'est. Nous pouvons tout au plus souligner qu'en général, nos campagnes de terrain commençaient beaucoup plus tôt sur les talus d'éboulis du rebord oriental en situation d'adret (fin mars, début avril).

L'étude des précipitations permet de mettre en évidence la diversité du massif en opposant des zones occidentales, centrales et orientales caractérisées par des précipitations pluvieuses et neigeuses importantes et des versants exposés à l'est moins arrosés.

3.2. Les températures

Comme nous l'avons souligné dans le paragraphe 3.1.3.3. du Chapitre 1, le poste de la Grande Chartreuse (945 m) a enregistré l'évolution thermique des 40 dernières années. En Chartreuse centrale, les températures moyennes annuelles pour la période 1961-1980 sont passées de 7°C à 7,8°C pour la période 1981-2000. Pour le rebord oriental, elles ont été estimées entre 8°C et 12°C par PATUREL et VALEROY (1997) sur la période sur la période 1961-1990 (Saint-Hilaire-du-Touvet). L'analyse des données concernant les mois les plus froids confirme cette tendance à la hausse des températures. Les hivers sont plus doux depuis le début des années 80. Ainsi, sur la période 1961-1980, les mois de décembre, janvier (mois le plus froid, Graphique 18) et février totalisaient respectivement 0,7°C, 0,2°C et 0,8°C contre 1,6°C, 0,7°C et 0,9°C sur la période 1981-2000. Cette augmentation thermique est aussi observable pour les mois estivaux sur les mêmes périodes. Les températures moyennes annuelles du mois de juillet (mois le plus chaud, Graphique 18) sont passées de 16°C à 16,8°C et celles d'août de 15,5°C à 16,7°C.

Cette tendance générale est aussi confirmée par l'analyse de l'évolution des températures moyennes annuelles des minima et des maxima journaliers. Ainsi, les températures moyennes

annuelles des minima journaliers sont passées de 3,5 °C pour la période 1961-1980 à 4,1 °C pour la période 1981-2000. Elles ont été estimées entre 4 °C et 6 °C sur la période 1961-1990 pour le rebord oriental (PATUREL et VALEROY, 1997). La température moyenne annuelle des maxima journaliers est passée respectivement de 11,7 °C à 12,1 °C pour les mêmes périodes. Elles ont été estimées entre 12 °C et 14 °C pour la période 1961-1990 sur le rebord oriental ((PATUREL et VALEROY, 1997). Cette comparaison souligne une tendance à un décalage des températures moyennes mensuelles et annuelles de la Chartreuse centrale qui atteignent progressivement les valeurs estimées pour le rebord oriental, globalement plus chaud, sur la période 1961-1990.

Concernant les jours de gel, au poste de la Grande Chartreuse (945 m), le nombre de jours de gel pour la période 1961-2003 était en moyenne de 96 jours par an à 945 m (3.1.3.1.C) avec un maximum de 21 jours pour le mois de janvier. Ils ont diminué à partir du début des années 80 passant ainsi de 100 jours pour la période 1961-1980 à 94 jours pour la période 1981-2000. Nous précisons ces différents aspects vers 1650 m grâce à l'installation d'une station météorologique.

L'étude des températures accentue les disparités déjà entrevues à partir de l'analyse des précipitations. Les versants de la Chartreuse occidentale, centrale et orientale, frais et humides, contrastent avec ceux situés sur la bordure orientale du massif globalement plus chauds et plus secs.

3.3. L'opposition adret / ubac

Nous avons vu que des disparités existaient au sein du massif de la Chartreuse en fonction de la localisation géographique des stations : bordure orientale et intérieur du massif. Cette opposition d'un point de vue climatique se fait aussi à l'échelle des versants en fonction de l'exposition dominante adret (versants d'expositions est, sud et ouest) ou ubac. Nous le verrons plus loin (troisième partie), cette opposition est fondamentale à l'échelle méso- et microclimatique. C'est un phénomène relativement bien connu (FRANCOU, 1981, 1988; ROVERA, 1978, 1990; POULIN, 1994; GERVAISE, 1997), déterminé par la différence d'ensoleillement qui induit une disparité des conditions thermiques. En été, il se manifeste par des températures maximales en adret (bordure orientale, versants exposés au sud : Aulp du Seuil, La Plagne...) et des températures plus fraîches en ubac (Dent de Crolles, Chamechaude, Grande Sure). En hiver, même si le rayonnement solaire diminue, le phénomène s'accroît. Les secteurs en adret sont donc plutôt chauds et secs et les secteurs d'ubac humides, le gradient hydrique diffère et cela a, bien évidemment, une influence sur la végétation qui est caractérisée par la présence d'espèces mésophiles ou mésohygrophiles en ubac et d'espèces mésoxérophiles à xérophiles en adret.

3.4. Les vents

Les vents ont une importance en biogéographie et en géomorphologie. Ils sont particulièrement violents sur les sommets du massif. Aucun relief ne protège la Chartreuse de l'arrivée des vents d'ouest. Ces derniers sont chargés d'humidité et provoquent de fortes précipitations. Les vents du Nord, hiver comme été, sont violents et froids, ils entraînent une diminution des températures. Selon POULIN (1994), le vent joue un rôle important lorsqu'il forme des congères contre les parois car la neige tend à réguler la température de la roche donc à réduire l'activité du gel. Les névés accumulés dans les balmes d'adret annihilent le réchauffement diurne des parois ce qui réduit les alternances gel/dégel. En revanche, les vents violents chargés de particules de pluie, de neige ou de grêle peuvent contribuer à la chute des débris (POULIN, 1994).

SOMSON (1983) souligne que les zones situées « sous le vent » et les pieds de parois bénéficient d'un apport important en terme de précipitations et fonctionnent au moment de la fusion nivale en véritables châteaux d'eau vis-à-vis des secteurs situés en aval tandis que les versants exposés au vent, les crêtes et les plateaux sommitaux, rapidement déneigés, peuvent au même moment connaître une sécheresse relative.

Les vents influencent le développement du couvert végétal car ils modifient la forme des plantes et des arbres et interdisent l'implantation de certaines formations. Ces effets sont visibles en Chartreuse sur les épicéas et les pins à crochets qui se développent sur les crêtes.

Cette présentation générale du climat permet d'entrevoir l'origine des diversités morphoclimatique et bioclimatique du massif et de mettre en évidence un découpage en fonction de la température et de l'humidité qui agissent simultanément sur le végétal et le minéral. Ces particularités climatiques sont très importantes en raison des modifications qu'elles sont susceptibles de provoquer dans le fonctionnement géodynamique et la composition floristique des écosystèmes rencontrés et notamment des talus d'éboulis (ARQUES, 1999). Cependant, leur intérêt est très limité pour permettre d'aborder directement les phénomènes commandant la dynamique des talus d'éboulis, la gélifraction des corniches sous l'effet des cycles gélivaux et leurs répercussions sur la dynamique de la végétation qui les colonise. Ces aspects relèvent plus des caractéristiques méso- et microclimatiques qui seront abordés dans la troisième partie de notre mémoire.

IV. Des conditions bioclimatiques favorables à la dynamique végétale

Les conditions climatiques exposées précédemment et surtout les précipitations très abondantes et la relative fraîcheur favorisent une forte dynamique forestière, c'est un des massifs les plus boisés des Alpes. La forêt couvre environ 65% du massif et sa surface augmente, depuis le début du siècle, suite à l'abandon de zones anciennement vouées aux prairies (PACHE, 1998). Elle était essentiellement constituée de taillis maigres ou de bois de taillis sous futaie (chêne, charme, hêtre), exploités depuis longtemps comme bois de chauffage ou anciennement de charbonnage.

En ce qui concerne la mise en place de la végétation dans les Alpes françaises du Nord, et notamment en Chartreuse, nous renvoyons aux études palynologiques de GIRARD *et al.* (1981); COUTEAUX (1983); BOREL *et al.* (1984) et CLERC (1988) qui permettent de dresser un tableau chronologique absolu (datation au carbone 14) de l'apparition des principales espèces et des variations climatiques depuis la fin de la dernière glaciation (15.000 ans).

4.1. La végétation actuelle

Les mosaïques biorhexistatiques d'éboulis se situent à la charnière de deux étages bioclimatiques caractérisés par des séries de végétation particulières :

- **L'étage montagnard (900 à 1500 mètres)** : il est défini comme l'étage des Hêtraies (*Fagion sylvaticae*) *sensu lato* (RICHARD et PAUTOU, 1982; OZENDA, 1985). Il comprend :

- la série mésophile du hêtre (900 à 1200 m environ) : il s'agit d'un ensemble hétérogène, composé de nombreux feuillus (noisetier, frêne, érable...) qui occupe de vastes surfaces au montagnard inférieur sur des sols filtrants. Les taillis sont dominants (PACHE, 1998). Au dessus de 1200 m environ, la hêtraie est relayée localement par la hêtraie humide à *Aruncus dioica* puis par la hêtraie-sapinière;

- la série de la hêtraie-sapinière : caractérisée par la présence d'une forêt mixte sur sols bruns lessivés, elle se développe au montagnard moyen et supérieur (entre 1200 et 1600 m environ). Il s'agit d'une hêtraie présentant une infiltration plus ou moins importante de sapins, d'épicéas et d'érables sycomore dans les stations les plus humides. C'est ce que RICHARD et PAUTOU (1982) appellent le faciès à épicéa des hêtraies-sapinières. On distingue un phytofaciès mésophile du hêtre sur les versants en exposition ubac (Chamechaude, Dent de Crolles) et un phytofaciès plutôt mésoxérophile sur les versants adrets du rebord oriental (Aulp du Seuil). Vers 1500-1600 m (montagnard supérieur), le front forestier suit en général les parties distales des talus d'éboulis.

- **L'étage subalpin se situe entre 1500 et 2000 m d'altitude** : il est caractérisé par deux espèces arborées principales, l'épicéa et le pin à crochets qui se développent sur des sols de type tangel à humus brut ou rendzines. C'est aussi le domaine des alpages, des landes subalpines à *Juniperus communis nana*, *Arctostaphylos uva-ursi*, *Dryas octopetala*, ou encore des rhodoraies à *Vaccinium myrtillus* et des fourrés à *Alnus viridis* (Chamechaude par exemple). L'exposition des différents versants nous permet aussi de distinguer au sein de cet étage, en ubac, des pelouses à *Carex sempervirens* et *Sesleria varia* et en adret, la présence d'une lande à *Laserpitium siler*.

4.2. Les groupements d'éboulis

A notre connaissance, il n'existe pas de classification *sensu stricto* spécifique à la flore des éboulis cartusiens. Comme souligné précédemment (2.3.1., Chapitre 1), si la classification de la flore des éboulis alpiens proposée par RICHARD et PAUTOU (1982) est intéressante, elle est difficilement applicable à notre terrain d'étude en raison de la faiblesse du nombre de relevés et surtout de l'altitude moyenne échantillonnée. Les éboulis calciques et les espèces compagnes ont fait l'objet de 10 relevés situés à une altitude moyenne de 2072 m. Nous travaillons sur des talus d'éboulis situés entre 1550 et 1800 m, la différence altitudinale et les compositions floristiques sont très différentes. En revanche, cette classification nous a permis d'orienter notre recherche en terme de typologie notamment concernant les aspects liés aux conditions d'humidité, à l'exposition et à la granulométrie des matériaux. En 1999 en Chartreuse, une étude a été réalisée sur quatre talus d'éboulis exposés en adret (versants de l'Aulp du Seuil et des « Pelloux ») et en ubac (versants occidentaux de la Dent de Crolles et Chamechaude). Sur la base de 459 relevés phyto-écologiques elle a permis de dresser une première typologie des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis en fonction d'un certain nombre de facteurs biotiques, abiotiques et anthropiques. Elle a été complétée par une analyse de la diversité spécifique et écosystémique, à l'échelle stationnelle et paysagère, et révèle l'intérêt patrimonial des talus d'éboulis cartusiens (ARQUES, 1999). Cette biodiversité est liée à la diversité des facteurs topoclimatiques et édaphiques sur substrat colluvial (exposition, granulométrie, humidité) et aux différentes morphodynamiques, variables d'un talus d'éboulis à l'autre et à l'intérieur de chaque talus d'éboulis. Les données collectées ont permis la réalisation d'une cartographie exhaustive au 1/5000, des écosystèmes, écotones et espèces présents sur les versants à éboulis. Cette typologie, relativement complexe, ne sera pas abordée ici. En revanche, certains aspects seront développés dans la troisième partie de ce mémoire.

Notre terrain d'étude présente donc des caractéristiques géologiques, géomorphologiques, climatologiques et biogéographiques particulières. Le paysage actuel porte aussi l'empreinte de la présence et de l'activité humaine. Les anciennes pratiques agro-sylvo-pastorales ont été génératrices d'ouverture et d'hétérogénéité des milieux. L'occupation humaine du massif est ancienne.

V. Les conséquences du déclin agro-sylvo-pastoral sur l'évolution de l'utilisation du sol des « hauts » de versant

Nous n'allons pas retracer, ici, l'histoire détaillée de l'occupation humaine du massif dans ses moindres détails, nous renvoyons pour cela aux travaux de BLACHE (1931). Après un bref rappel historique, nous développerons les aspects liés à l'exploitation agro-pastorale et l'évolution de l'occupation des sols sur les « hauts » de versant.

En Chartreuse, les traces d'occupation humaine les plus anciennes révèlent la présence de chasseurs mais rapidement, ce mode de vie archaïque s'est effacé (BLACHE, 1931) devant des ressources plus modernes : le pâturage, la culture, l'utilisation des bois et des eaux. L'analyse des caractéristiques biogéographiques a montré l'importance du couvert forestier en Chartreuse, cependant, la majorité des sommets en est dépourvue. Les données paléoclimatiques montrent que son extension était autrefois plus vaste (GIRARD *et al.*, 1981; COUTEAUX, 1983; BOREL *et al.*, 1984 et CLERC, 1988). Nulle part en Chartreuse nous ne nous trouvons en présence de la forêt primitive à l'exception de quelques pinèdes sommitales (Aulp du Seuil, travaux en cours de P. BINTZ) et de petits écosystèmes relictuels (pinèdes abyssales). De même qu'il l'a entamée pour ses cultures et ses prairies, l'homme a modifié la forêt par une exploitation plus que millénaire.

L'importance de la forêt a en réalité de multiples origines, BLACHE (1931) explique que l'organisation structurale de la Chartreuse n'étant pas propice à l'installation de cultures, à cause des fortes pentes, les pratiques agricoles se sont réparties dans les fonds de vallées ou les communes bordières du massif; tandis que les versants de l'étage montagnard se sont orientés vers la sylviculture et les alpages en haut des versants, vers l'élevage bovin et ovin.

Cet étagement des pratiques a favorisé un paysage très caractéristique, dans lequel la forêt a une place prépondérante. Elle forme une large bande qui sépare les milieux ouverts de fond de vallées de ceux situés au sommet des versants.

5.1. Quelques données historiques

L'occupation humaine du massif remonte assez loin, ce fut en premier lieu celle des chasseurs de marmottes et des cueilleurs². Ce n'est qu'au cours du Néolithique, vers 5000-3000 BC, que se forment les premières communautés humaines permanentes et qu'apparaissent les premiers animaux domestiques (élevage bovin et caprin). C'est certainement au cours de cette époque que les premiers déboisements s'effectuent, et ce n'est qu'au Moyen-Age (XI^{ème} siècle) que la Chartreuse connaît son premier développement économique.

5.1.1. Du Moyen Age à la Renaissance : un massif en autarcie

Le massif de Chartreuse était déjà peuplé quand Saint Bruno et ses compagnons se sont installés à Casalibus, en témoignent les inscriptions datant du début du Moyen-Age trouvées à l'Aulp du Seuil (Haut du Seuil). Les Chartreux ont subsisté dans un premier temps grâce à l'élevage (brebis, chèvres, agneaux et quelques vaches) et à l'agriculture (dans le vallon de Chartrousette). Ils se constituèrent, du XI^{ème} au XIV^{ème} siècle, des domaines considérables qu'ils obtinrent par donations ou achats (SCLAFERT, 1926). « *Le couvent de la Grande Chartreuse est à l'origine du développement des sociétés agro-pastorales et par là des grands défrichements du Moyen Age qui ont réduit l'espace forestier* » (BLACHE, 1931).

² Site de fouille de l'Aulp du Seuil, travaux en cours de P. BINTZ.

Au XIV^{ème} siècle, le rayonnement domanial des Pères Chartreux englobait toute la partie occidentale du massif si bien qu'à cette époque, ils dominaient presque tout le pays situé entre l'Hière au Nord-Ouest, le rebord du Grésivaudan à l'Est, la cluse de Voreppe au Sud, la vallée de Saint-Etienne-de-Crossey à l'Ouest (SCLAFERT, 1926); aussi n'est-il pas surprenant que le nom de Chartreuse se soit imposé à ce massif de montagnes qui, pendant des siècles, reçut l'empreinte de leur puissance et de leur activité (sylviculture, agriculture et surtout pastoralisme).

A la même époque, la métallurgie se développe et va dynamiser l'économie du massif.

5.1.2. Du XVI^{ème} au XVIII^{ème} siècle : l'âge du charbonnage

Fin XVII^{ème} et au cours du XVIII^{ème} siècle, les besoins nouveaux de la métallurgie entraînent l'ouverture de multiples chemins qui sillonnent des forêts jusque-là négligées, pour en sortir le précieux charbon de bois. C'est ce que BLACHE (1931) appelle le premier âge des chemins, celui des chemins du charbonnage (charbon, pièces de marine), ouvrant à la circulation muletière les forêts cartusiennes. Les progrès de l'économie forestière au XVIII^{ème} siècle ont été accompagnés par l'ouverture des chemins muletiers et le charbonnage a contribué à peupler les montagnes.

Mais la surexploitation des forêts souvent sans ménagement a conduit l'administration royale à modérer l'exploitation pour s'assurer des réserves en bois pour la marine. L'abattage des bois fut réglementé et les forêts soumises au régime forestier, en 1837 pour la partie Iséroise du massif et en 1860 pour la partie savoyarde. Bien davantage que les restrictions royales, c'est l'utilisation du charbon de terre qui allait entraîner le déclin de la métallurgie à la fin du XVIII^{ème} siècle.

5.1.3. Les mutations socio-économiques récentes

La ruine du charbonnage avec le déclin de la métallurgie du bois, la demande croissante des régions voisines en bois non consommés et l'état du réseau routier permettent le développement du bûchage³ moderne et la régénération des peuplements (conversion des taillis en futaies, recul des herbages et des cultures). Mais cet essor économique est de courte durée pour les populations locales qui n'étaient pas en mesure d'exporter le gros bois d'œuvre au même rythme que l'administration forestière. Le rôle des voies de communications nouvelles, le développement des échanges entre les régions ont été néfastes à ces économies locales de subsistance. De nombreux habitants retournèrent à l'agriculture et l'élevage et d'autres quittèrent définitivement le massif. Quels que fussent les bénéfices supplémentaires du charbonnage clandestin et du bûchage en Chartreuse, les habitants du massif ne pouvaient pas suivre les progrès agricoles et pastoraux qui, dès la fin du XVIII^{ème} siècle, mais surtout à partir du milieu du XIX^{ème}, contribuaient à relever le niveau de vie dans les villages de la vallée. Avec leurs petits bassins agricoles et leur petit bétail, ils n'étaient pas en mesure de rivaliser avec les propriétaires des grands bassins agricoles. Cette différence devait s'aggraver au cours du XIX^{ème} siècle et conduire à l'exode rural et au déclin démographique du massif au XX^{ème} siècle.

Au XX^{ème} siècle, la population du massif a déjà diminué de près d'un tiers par rapport au maximum atteint au milieu du siècle précédent. Les voies de communication ont rapproché les villes des montagnes; l'essor industriel dans les villes, les perspectives d'emplois et de vie plus faciles se sont ajoutées à l'émigration vers l'étranger pour vider le massif de sa population. La 1^{ère} guerre mondiale prive les champs de bras : le bétail et les surfaces cultivées diminuent. A cela s'ajoutent des réquisitions importantes de l'armée sur le fourrage et sur les bêtes qui vont

³ Abattage du bois non destiné au feu (BLACHE, 1931).

déstabiliser une économie séculaire. En 1926, c'est la moitié des habitants qui a déserté la cuvette des Entremont et de Saint-Pierre-de-Chartreuse.

Ce qui va modifier en profondeur le profil économique du massif c'est le développement du tourisme moderne, sous l'impulsion du Touring Club de France. Car s'il est vrai que le massif était depuis longtemps visité, le but des excursions était exclusivement dirigé vers le monastère et les moines.

Saint-Pierre-de-Chartreuse va se lancer dans l'aventure dès la fin du XIX^{ème} siècle avec la construction de chalets et d'auberges. On commence à pratiquer le ski avant la première guerre mondiale au Col de Porte et au Sappey. L'installation de remontées mécaniques à La Scia remonte à 1949 et elles seront continuellement entretenues et modernisées jusqu'à aujourd'hui avec l'installation en particulier de canons à neige pour pallier le manque d'enneigement ressenti depuis le début des années 80. Actuellement, le tourisme représente 80 % de l'activité économique de Saint-Pierre-de-Chartreuse.

Le phénomène de déprise agricole qui s'est accéléré après la seconde guerre mondiale semble actuellement s'inverser dans les Entremonts où de nouveaux agriculteurs s'installent (certains sont étrangers à la vallée et ont des productions différentes de l'élevage bovin traditionnel : élevage ovin, caprin, chevalin, apiculture...). La filière bois est toujours très présente dans le massif (la forêt représente 70 % de la surface des Entremonts et 80 % de celle de Saint-Pierre-de-Chartreuse).

L'agriculture était au centre de l'économie locale autrefois, en fournissant nourriture et revenu d'appoint à la population (avec l'artisanat et l'exploitation forestière). La création des fruitières lui a permis de changer d'orientation, en se spécialisant dans la production de lait et sa valorisation.

Comme pour tous les massifs de moyenne montagne, le tourisme hivernal est aujourd'hui menacé par les changements climatiques récents. Les communes doivent redoubler d'effort, diversifier leurs activités et développer le tourisme vert sur une grande partie de l'année. Ce phénomène risque d'affecter certains sommets et talus d'éboulis déjà très fréquentés. Certains versants à éboulis (Chamechaude et la Dent de Crolles et secondairement le Grand Som et la Grande Sure) constituent des passages obligés vers les sommets. POULIN (1994) avait estimé la fréquentation touristique du secteur de Chamechaude (versant occidental) à 15 000 personnes pour les mois de juin à septembre 1994. Une des conséquences principales pour les talus d'éboulis de moyenne montagne est la multiplication des sentiers et leur piétinement intensif (POULIN, 1994; ARQUES, 1999).

5.2. L'exploitation agro-pastorale

Pour la satisfaction des besoins locaux, l'utilisation du bois sous toutes ses formes remonte aussi loin que la mise en valeur : combustible, bois d'œuvre pour la marine et les constructions, matière première d'outils et d'ustensiles ménagers (bûcherage). Mais ce n'est pas l'exploitation forestière qui a marqué les « hauts » de versant mais essentiellement les activités pastorales.

5.2.1. Les basses clairières agricoles

Les basses clairières agricoles étaient utilisées pour l'agriculture (cultures céréalières) et l'élevage et les hautes clairières (alpages) pour les activités pastorales. Les grandes clairières agricoles dépassaient un peu la cote de 1200 m en Chartreuse, essentiellement sur le plateau des Petites Roches. Par opposition aux plaines, les conditions climatiques étaient rudes et pour survivre l'économie montagnarde a dû au cours du XIX^{ème} siècle abandonner progressivement les anciennes

ressources trop précaires pour se spécialiser. « Au pays de l'herbe » (BLACHE, 1931), les progrès de l'élevage bovin et la production de produits laitiers et de fourrage ne seront ralentis que par la dépopulation du massif.

5.2.2. Les alpages

De vastes surfaces étaient utilisées par les alpages, dont le plus grand était certainement celui qui s'étendait de la Dent de Crolles au Mont Granier sur environ 20 km. L'humidité et la fraîcheur des versants et des sommets ont contribué à refouler vers le bas les clairières agricoles. Elles ne portaient pas les mêmes préjudices aux alpages et bien au contraire elles offraient à ces altitudes de belles possibilités pastorales. L'homme a découvert, sur ces sommets et ces versants arrosés, des pelouses plus vertes et plus grasses qu'ailleurs et les a élargies davantage. Presque tous les alpages, domaines de propriété collective, féodale ou ecclésiastique, sont de « grandes montagnes »⁴ (BLACHE, 1931) occupées traditionnellement par des troupeaux. Les alpages qui couronnent les sommets ne sont pas les seules montagnes pastorales de la Chartreuse (Alpette, Haut du Seuil, Chamechaude, Charmant Som...). Les pâturages des cols (Col de Porte, Col de la Saulce...) et des « hauts » de versant (Jusson, Dent de Crolles, Bovinant pour les plus connus), le plus souvent étroits et émiettés, portaient des lambeaux de belles pelouses verdoyantes qui n'ont pas échappé à l'exploitation pluriséculaire. Comment expliquer leur origine?

BLACHE (1931) souligne que l'influence directe du climat dans la dénudation des hauts sommets est certainement infime. Les alpages, les moyennes et les basses clairières résultent d'un aménagement ou d'un usage prolongé. Selon lui, il se peut que la limite naturelle des forêts accroche au passage les principaux sommets, vers 1850 ou 1900 m mais il est difficile de s'en assurer. Cependant, il est sûr que l'étendue des pâturages actuels n'a rien à voir avec l'emplacement de cette limite climatique car on trouve, sur les pentes peu accessibles qui encadrent les alpages du Haut du Seuil au Granier, des flancs de la Sure et du Rocher de Chalves (à l'exception des talus d'éboulis), quelques résineux et feuillus qui dominent les herbages et s'élèvent jusqu'à des altitudes très voisines de celles des sommets. Ce sont pour lui, les témoins d'une ancienne forêt qui enveloppait sensiblement tout le massif.

Si les clairières sont artificielles, quelles sont les raisons qui ont poussé l'homme à choisir ces sommets au climat rude et aux abords difficiles ? BLACHE invoque la topographie accidentée et les pentes raides de beaucoup de versants intermédiaires, restés forestiers, entre les bassins agricoles et les corniches calcaires. Cet aspect mérite d'être nuancé. Comme nous le verrons dans le paragraphe 5.4., certains versants à éboulis ont été exploités en pâturages jusqu'en 1914, d'autres au moins jusqu'en 1960. Il ajoute qu'il est certain que, dans beaucoup de cas, la forêt doit sa conservation à cette topographie accidentée mais de nombreux versants forestiers auraient pu se transformer en pâturages sans que le relief y soit plus contraignant qu'au Charmant Som ou à Bovinant, sur les flancs escarpés du Grand-Som, ou au Col des Ayes sur le versant occidental de la Dent de Crolles. Nous le verrons plus loin (Cartes 3 et 4), les exemples ne manquent pas sur les versants à éboulis qui ont pourtant tous, sans exception, fait l'objet d'une exploitation pastorale importante malgré des conditions extrêmement contraignantes.

Il convient de ne pas oublier que le pâturage en forêt a quand même été la forme la plus répandue au Moyen-Age (XII^{ème}-XIV^{ème} siècles) et ce, jusqu'à une période assez récente car les forêts, particulièrement en altitude, étaient souvent clairsemées. On observe encore aujourd'hui la présence des anciennes clairières pastorales, situées sur les pentes basses voisines des villages ou

⁴ Le système dit de la « grande montagne » est l'exploitation collective d'un alpage par une communauté rurale, constituant un troupeau et le confiant à un ou plusieurs bergers et alpagistes.

sur les « hauts » de versants, où les arbres précisément s'éclaircissaient pour faire plus de place à l'herbe. Ce qui différenciat les clairières des cols ou des « hauts » de versants des alpages était leur moindre étendue et leur sol en général plus profond et plus riche. Les pentes boisées mais surtout les taillis périphériques étaient pâturés principalement par les ovins et les caprins. D'après BLACHE (1931), sur les sommets, dans une zone frontière où la position de la forêt n'était guère solide, le pâturage a eu pour effet le triomphe facile de l'herbe sur le bois. La prairie pseudo-alpine est ici une formation secondaire, d'origine pastorale, plutôt que l'effet d'un véritable défrichement. Selon nous, la place prépondérante des pâturages d'altitude s'explique aussi en partie par le modelé contraignant (lapiés) et la lithologie (calcaire urgonien portant les pinèdes claires) et notamment sur les hauts plateaux cartusiens.

Les alpages sommitaux du massif appartenaient aux habitants de la vallée, aux moines et aux seigneurs. Tout comme l'économie agricole et forestière, l'économie pastorale cartusienne était subordonnée aux besoins des régions voisines. Jusqu'au début du XV^{ème} siècle, les alpages et les pâturages étaient occupés par des ovins et des caprins. Ils seront alors remplacés par les vaches des fermiers des Petites Roches (pour l'Aulp du Seuil) et de Voiron (pour l'ouest du massif). Dans les basses clairières, il y avait longtemps que le petit bétail avait disparu car les habitants et l'Etat redoutaient, pour leurs forêts, le voisinage des moutons et des chèvres.

Les alpages ont fonctionné jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, date à laquelle l'agriculture connaît de grosses difficultés. Certains alpages ont été remis en activité dans les années 90 (Dent de Crolles, Chamechaude...).

5.3. L'évolution de l'utilisation du sol sur les « hauts » de versant

Les informations historiques qui précèdent, complétées par l'étude des documents cadastraux anciens, nous permettent de mesurer l'implication de l'homme sur la dynamique de la couverture végétale des talus d'éboulis cartusiens au fil des siècles. La synthèse de ces éléments est proposée sous forme d'une cartographie diachronique qui montre l'évolution de l'occupation des sols sur les « hauts » de versant (Cartes 3 et 4).

5.3.1. Les documents cadastraux

5.3.1.1. La cadastration sarde (1728-1738)

Les départements français savoyards (Savoie, Haute-Savoie) possèdent un des plus anciens cadastres à plans et registres d'Europe : le cadastre sarde (EYNARD-MACHET, 1993). L'innovation par rapport à tous les autres cadastres systématiques « antiques » fut la confection de cartes au 1/2372. Dès le 9 avril 1728, Victor-Amédée II, roi de Piémont-Sardaigne impose une véritable cartographie généralisée des parcelles pour toutes les communes savoyardes. Celles-ci disposent donc d'une des plus anciennes sources cartographiques et matricielles mentionnant, entre autres choses, l'état, la nature des parcelles et le nom des propriétaires (Archives Départementales de la Savoie, 2003). Ces documents, dessinés à la plume et coloriés nous donnent une représentation assez précise des communes. La confection des cartes, des registres des numéros suivis⁵ durera dix ans. Mais très vite le cadastre sarde se heurta à la difficulté de suivre les mutations foncières.

⁵ Livre de géométrie où sont consignés la nature des parcelles et le nom des propriétaires. Il est rédigé par le géomètre, dans l'ordre d'arpentage.

Dès les années 1780, il est établi qu'il ne correspond plus à la situation des biens. Incapable de suivre les mutations, il n'en restait pas moins, grâce à la mappe, une vue géographique très précise des parcelles et des confins communaux. Le cadastre napoléonien, ordonné en 1807, était assez proche de la mappe, notamment par son échelle au 1/2500. Cette cadastration débuta sous l'Empire pour les territoires de l'ancien royaume de France mais ne put être que très partiellement accomplie en Savoie (trois cantons) à cause du retour rapide de cette dernière dans le giron sarde, dès 1815. La mappe resta jusqu'en 1860, date du rattachement de la Savoie à la France, le seul instrument de référence. Mais la mise en place de la nouvelle cadastration a été relativement longue ce qui explique que la mappe d'Ugine, par exemple, resta en fonction jusqu'en 1945 !

En Chartreuse, notre terrain d'étude s'étend sur dix communes iséroises et deux communes savoyardes. Saint-Pierre-d'Entremont (Savoie) et Entremont-le-Vieux sont couvertes par trois cadastrations successives : cadastration sarde (1729-1738), respectivement (1908-1945) et (1910-1945) pour le cadastre parcellaire (tardive continuation de la cadastration du premier Empire) et à partir de 1945 pour le cadastre actuel régulièrement tenu à jour depuis le début de XX^{ème} siècle. La cadastration sarde a donc été utilisée pour les deux communes savoyardes jusqu'en 1908. Les mappes (versions numériques), ainsi que les registres des numéros suivis (équivalent des numéros de parcelles du cadastre napoléonien) sont consultables aux Archives Départementales de la Savoie (Chambéry).

5.3.1.2. *Le cadastre général parcellaire ou « napoléonien »*

Le cadastre parcellaire a été institué par la loi du 15 septembre 1807. Il est appliqué à partir de 1808 pour les communes françaises. Il est constitué de plans cadastraux (au 1/10000), découpés en feuilles (sections) ramenées au 1/2500 qui indiquent, pour chaque commune les limites parcellaires, les numéros de parcelles, l'échelle etc. A partir des numéros de parcelles, il est possible de rechercher au sein de registres (matrices cadastrales), les informations relatives à l'occupation et à l'utilisation du sol (nom du propriétaire, nature de la propriété, localisation...). Pour les dix communes iséroises situées sur notre terrain d'étude, les plans et les matrices cadastraux sont consultables aux Archives Départementales de l'Isère (Grenoble). Ces communes sont couvertes par deux cadastrations successives : le cadastre parcellaire (évaluation primitive différente en fonction des communes 1820-1943), et à partir de 1943 pour la cadastration actuelle.

Le cadastre actuel correspond à la modernisation et à la remise à jour progressive, depuis la fin de la seconde guerre mondiale, et à intervalles plus ou moins réguliers selon les régions, de l'ancien cadastre napoléonien (EYNARD-MACHET, 1993). Les plans et matrices cadastraux actuels sont consultables en mairie ou auprès du service des Impôts Fonciers et du Cadastre de la circonscription d'imposition de la commune concernée. Suivant la dimension des parcelles, leur échelle varie du 1/1000 au 1/4000.

Ces documents constituent des éléments de base pour la réalisation de cartes historiques d'occupation du sol. Ils permettent de retracer l'évolution de l'occupation de l'espace et de la physionomie des paysages depuis le début du XVIII^{ème} siècle. Le recours à ces archives pour l'analyse des changements environnementaux d'origine anthropique se révèle riche en enseignements.

5.3.2. Méthode d'élaboration des cartes diachroniques d'occupation des sols

Nos investigations ont été menées conjointement sur le cadastre actuel, puis sur le cadastre « français » et enfin sur le cadastre sarde pour les communes savoyardes. Nous avons photographié⁶ à haute résolution les extraits de feuilles et de mappes qui représentaient le parcellaire des « hauts » de versant. Ces extraits ont ensuite été géoréférencés à l'aide d'une carte topographique du massif. La cartographie a été réalisée sous MapInfo 6® et le rendu graphique sous Corel draw 11®. Dans l'optique de bien singulariser les « hauts » de versant, où se situent les talus d'éboulis (Carte 2), nous avons choisi de cartographier les parcelles forestières sous-jacentes et les alpages situés en altitude (Cartes 3 et 4).

5.3.2.1. Les informations disponibles sur l'occupation des sols

Les informations relatives à l'occupation des sols nous ont été fournies par les différents registres (matrices, registres des numéros suivis...). Le détail de ces informations, pour chaque commune, est présenté dans l'Annexe A. Il n'était pas nécessaire, en vue de la réalisation de cette analyse essentiellement qualitative, de relever toutes les informations contenues dans les différents registres. Nous avons relevé dans l'état des sections (cadastre français) ou les registres des numéros suivis (mappe) :

- le numéro de la section : la commune entière est représentée au sein d'un tableau d'assemblage au 1/10000. En raison de l'échelle cartographique utilisée et pour plus de précision, chaque commune est découpée en sections (A, B, C...) et en feuilles (section A, 1^{ère} feuille...) au 1/2500. La mappe sarde fonctionne uniquement par numéro de parcelle, parfois des lettres. Pour le cadastre français, c'est à partir d'un document que l'on appelle « Etat des sections » (Tableau indicatif des propriétés foncières, de leurs contenance et de leurs revenus) que l'on peut déterminer « quel est le propriétaire d'une parcelle » et noter les informations qui suivent;

- le numéro de la parcelle. Afin de ne pas surcharger la cartographie, les numéros et certaines délimitations des parcelles (notamment pour le parcellaire modifié à partir de 1945, trop dense) ne figurent pas sur les deux cartes réalisées à l'échelle du massif. En revanche, à l'issue d'une procédure d'échantillonnage que nous aborderons dans la deuxième partie de ce travail, sept talus d'éboulis représentatifs ont été sélectionnés. Pour chacun de ces talus, une cartographie diachronique plus précise sera présentée (troisième partie).

- le nom du propriétaire : la mention « privé » est indiquée s'il s'agit d'un ou de plusieurs propriétaires privés. Le nom exact du propriétaire a été inscrit lorsqu'il s'agissait d'un organisme de l'Etat (Administration des Eaux et Forêts) ou de terrains appartenant aux Pères Chartreux;

- le lieu;

- la nature de culture (occupation des terres).

Les matrices cadastrales et les registres des numéros suivis (pour la mappe) nous permettent ensuite de rendre compte de l'évolution des propriétés à différentes dates (Annexe A). Nous renvoyons à EYNARD-MACHET (1993) et au site internet des Archives départementales de la Savoie pour la méthode de lecture des différents registres.

⁶ Les photographies numériques ont été réalisées par une photographe professionnelle, F. BERTHET (Nikon D 100).

5.3.2.2. Le choix des classes d'occupation des sols

Nous avons commencé la cartographie diachronique des communes en 1820. Les données issues de la cadastration sarde, pour Saint-Pierre-d'Entremont (Savoie) et Entremont-le-Vieux, sont quasiment identiques à celles relevées sur le cadastre parcellaire à partir de 1908. Conformément à la méthodologie proposée par EYNARD-MACHET (1993) puis DOBREMEZ et EYNARD-MACHET (1997), pour exploiter correctement les cartes diachroniques, nous avons utilisé une terminologie indépendante des époques où ont été dressés les cadastres. Pour cela, les significations successives des natures de culture ont été généralisées sous une forme stable dans le temps : les classes d'occupation du sol. Nous avons détaillé les classes d'occupation des parcelles situées sur les talus d'éboulis ou à proximité et simplifié les autres.

• Pour la cartographie historique de l'occupation des sols sur la période 1820-1914, nous avons déterminé neuf classes (Carte 3) :

- « Bois » : nous n'avons pas détaillé cette classe en taillis, futaie mixte, futaie résineuse... (Cadastration actuelle). Elle sert uniquement à délimiter les talus d'éboulis dans leur partie basale.

- « Broussaille » : ensemble de ronces et d'arbustes qui croissent dans les forêts (LACHIVER, 1997). Elle correspond à la notion de « friche » du cadastre actuel.

- Les classes « pâture-bois » et « pâture-rochers » indiquent deux types d'occupation simultanés : pâture en forêt au sens de BLACHE (1931) pour la première et zone de pâture parfois située sur éboulis mais le plus souvent sur les lapiés des alpages sommitaux pour la seconde.

- « Pré » : terre à foin ou à pâturage, le plus souvent close pour la soustraire aux divagations du bétail (LACHIVER, 1997).

- « Pâture » : on note aussi le terme de « pacage ». Lieu de pâture. Particulièrement, noms donnés aux terrains soumis au pâturage, mais surtout aux terrains en friche (par extension : prairie médiocre (LACHIVER, 1997)). Sont regroupés au sein de cette classe, les pâturages des versants à éboulis (« hauts » de versant) et les hautes clairières pastorales sommitales (BLACHE, 1931).

- « Terre vaine » : terre vide de culture où les troupeaux peuvent pâturer sans causer de dégâts (LACHIVER, 1997). Elle est utilisée pour caractériser les talus d'éboulis non pâturés, ceux qui ne sont pas occupés par les lambeaux de pelouse ou de prairie, les ravins et les bad-lands marneux ainsi que quelques pelouses sommitales.

- « Terre » : caractérise toutes les terres cultivées ou labourables.

- « Rocher » : parfois « roche nue », « roc » est utilisé pour caractériser les parcelles situées sur les escarpements. La nature de culture actuelle fait état de landes, rocs ou rochers.

• Pour la cartographie historique de l'occupation des sols sur la période 1914-1960, nous avons déterminé six classes (Carte 4). Elles permettent de définir les trajectoires d'évolution des « hauts » de versant :

- « Pâture-lande » : cette classe signifie que la parcelle classée en pâture en 1820 a évolué directement vers une lande entre 1820 et 1960. Lande : formation végétale buissonnante basse et

fermée dominée par des arbrisseaux et des plantes herbacées spontanées, de peu de valeur (LACHIVER, 1997). La cadastration actuelle utilise le terme de « friche ».

- « Pâturage-pré-lande » : ici, la parcelle primitive était classée en « pâturage » en 1914, elle a évolué vers un « pré » entre 1914 et 1920 (en général, Annexe A) et enfin vers une « lande » entre 1920 et 1960.

- « Pâturage-pré-pâturage » : « Pâturage » (1914), « Pré » (1914-1920) et « Pâturage » (1920-1960).

- « Terre vaine-lande » : évolution entre 1914 et 1960.

- « Rochers-pâturage-lande » : évolution avec un stade intermédiaire pour la période 1914-1920.

- « Bois-pâturage-lande » : évolution avec un stade intermédiaire pour la période 1914-1920.

Les parcelles qui n'ont pas évolué conservent leur couleur d'origine, il s'agit de la plupart des parcelles boisées ainsi que de certains alpages sommitaux.

Nous n'avons pas réalisé de cartographie actuelle dans cette tranche altitudinale car les changements dans l'occupation des sols ont été infimes après 1960. Les modifications majeures sont succédées entre 1820 et 1960.

5.3.3. Evolution qualitative de l'occupation des sols sur les « hauts » de versant

Trois activités ont influencé l'évolution de la couverture végétale des talus d'éboulis :

- le pâturage régulier sur talus d'éboulis;
- le passage du bétail : certains parcours pastoraux traversaient les versants à éboulis;
- la coupe des bergers : prélèvement de petit bois par les alpagistes (hêtre, érable, nerprun...) sur éboulis ou au sein des pelouses bordières. Il y a eu quelques petites coupes régulières, effectuées par les bergers pour maintenir l'ouverture de ces espaces, mais elles concernaient essentiellement les pâturages de cols où la dynamique forestière était importante (Dent de Crolles par exemple). Comme le soulignait BLACHE (1931), sur éboulis, les conditions édaphiques étaient trop contraignantes pour que de véritables forêts se développent.

Nous reviendrons plus en détail sur ces activités dans la troisième partie de ce mémoire. Nous verrons que cette occupation différentielle dans l'espace et dans le temps explique en partie l'évolution végétale différentielle observée, depuis une quarantaine d'années, sur les talus d'éboulis échantillonnés.

L'essentiel de l'exploitation forestière se déroulait plus bas (parcelles forestières des cartes 3 et 4). En témoignent les anciens chemins de traînage (draie ou jet) qui sillonnent les versants et que l'on croise régulièrement sous forêt avant d'atteindre les « hauts » de versant à éboulis. A ce propos, ceux-ci étaient notamment utilisés, dans le cadastre parcellaire, comme limites naturelles de nombreuses parcelles forestières.

5.3.3.1. Caractéristiques de l'occupation des sols sur la période 1820-1914

Il n'y a aucun doute sur l'exploitation pastorale des versants à éboulis (Carte 3). Nous renvoyons aussi à la carte 2 pour leur délimitation précise. Sur la période 1820-1914, ils sont presque tous recensés en « pâturages ». Grâce au cadastre général de Savoie (Annexe A), pour les communes savoyardes et aux données historiques rapportées par BLACHE (1931), nous savons que leur occupation est antérieure à 1820. Ces zones éclaircies par des conditions climatiques rudes ont attiré les pasteurs pendant plusieurs siècles. Les conditions édaphiques et climatiques défavorables à la croissance de la forêt l'étaient aussi certainement, dans une moindre mesure, à celle de l'herbe. Les troupeaux pâturaient le plus souvent sur les pelouses ou les prairies bordières des éboulis (Dent de Crolles, Bovinant, Grand Som, Grande Sure) mais les lambeaux herbeux des talus d'éboulis vifs n'ont pas été épargnés (Rebord occidental, La Plagne ... (Carte 3). Malgré la présence de rocailles, de lapiés ... la moindre parcelle herbeuse était pâturée des « hauts » de versants aux pelouses sommitales (Carte 3).

Jusqu'au XV^{ème} siècle, le petit bétail occupait, outre les bassins agricoles et les basses clairières, les hautes clairières pastorales (SCLAFERT, 1926; BLACHE, 1931). Seules les communes savoyardes se sont rapidement spécialisées dans l'élevage bovin. Le Moyen Age fut l'âge des moutons (BLACHE, 1931). La règle primitive n'accordait aux Chartreux qu'un nombre infime de bovins. On exploitait ces espaces comme des montagnes à lait, les produits laitiers issus de l'élevage des brebis (fromage) permettaient notamment de louer les pâturages. Les « hauts » de versant, d'accès souvent mal aisé, convenaient bien aux moutons et aux chèvres qui se déplaçaient rapidement et en très grand nombre. Dans ces conditions, il est facile d'imaginer les impacts occasionnés par les ovins mais surtout par les caprins sur la couverture végétale des versants à éboulis. De nombreuses anecdotes existent sur le sujet. BLACHE (1931) indique que les chèvres ont toujours été très nombreuses en Chartreuse. Avec la surpopulation des terres agricoles au XVIII^{ème} siècle et au début du XIX^{ème} siècle, elles se sont multipliées sur la bordure orientale du massif (Petites Roches) précisément au moment où les propriétaires, les communes et l'administration éprouvaient le besoin de mettre à l'abri de leurs ravages, les bois qui pouvaient prendre une valeur accrue.










BLACHE (1931) indique que dans l'est du massif (rebord oriental, alpages sommitaux), les communautés de la vallée ont pu maintenir leurs droits sur la « grande alpe » : Le Touvet, Barraux, La Terrasse, Allevard... Les communes modernes en ont hérité, le premier président de Marciieu bénéficiait, en qualité de seigneur de Crolles, d'une portion de pâturage restée dans la famille après la Révolution (Annexe A). Les pâturages étaient occupés par du petit bétail, de la Dent de Crolles au Mont Granier.

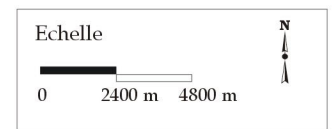
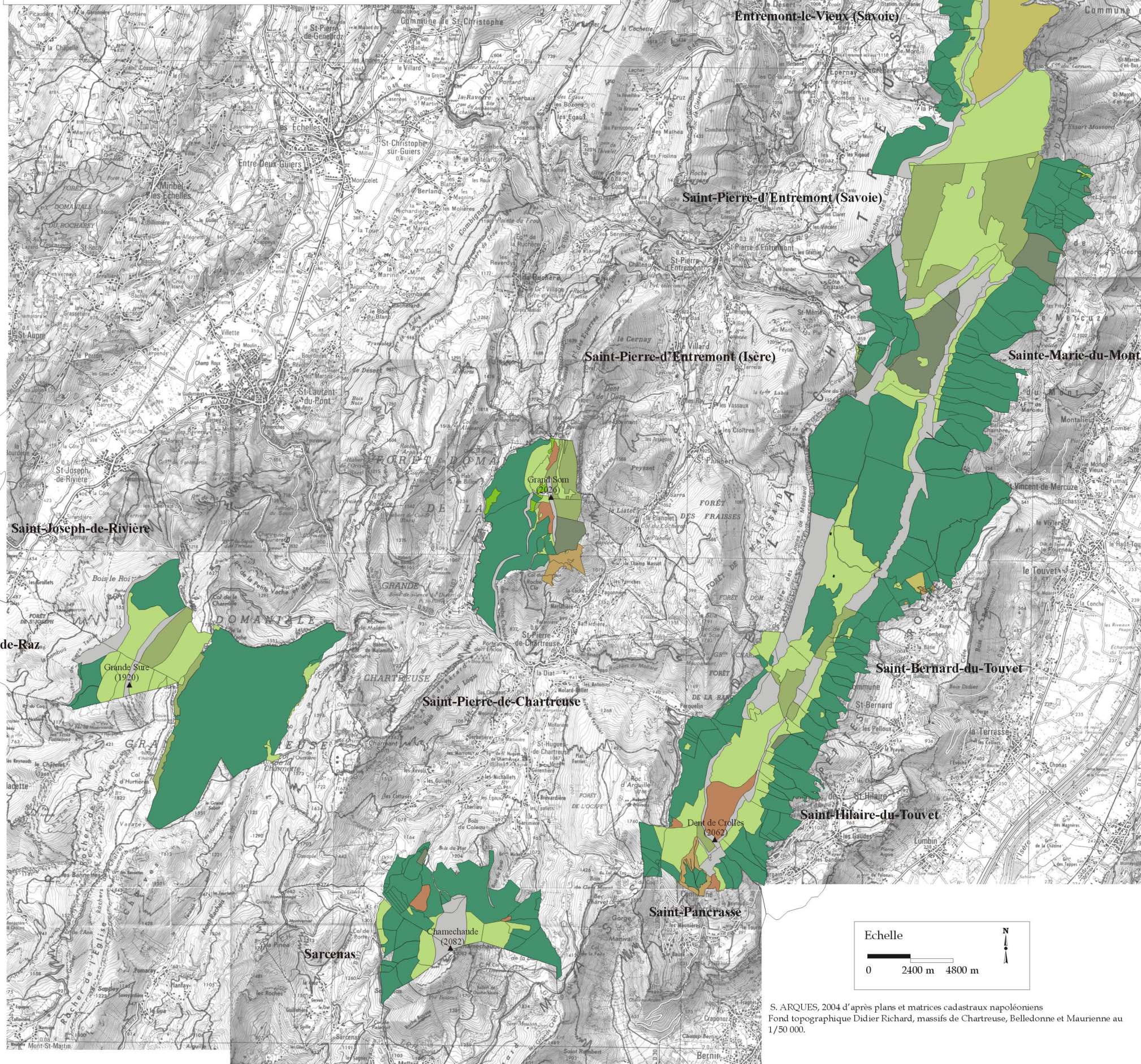
L'Ouest du massif était dominé par les Chartreux (Annexe A). Leur immense domaine est devenu en 1792 propriété nationale; les pâturages culminants ont été détachés du domaine en 1807 pour reconstituer le patrimoine, acquis pendant la Révolution, des Hospices de Grenoble (Annexe A). Mais les forestiers tendaient à récupérer ces parcelles aliénées : elles sont revenues au Domaine par achat, en 1918.

Du XV^{ème} siècle au XIX^{ème} siècle, les montagnes se vident progressivement du petit bétail pour s'orienter vers l'élevage du gros bétail : « *les montagnes à brebis sont devenues des montagnes à vaches* » (BLACHE, 1931). Cependant, le phénomène est très localisé. Toujours en raison des difficultés d'accessibilité, certains versants à éboulis n'ont pas été délaissés par les ovins et les caprins.

Carte n° 3 : Cartographie historique de l'occupation des sols sur les "hauts" de versants du massif de la Chartreuse sur la période 1820-1914.

Classes d'occupation du sol

-  Bois
-  Broussailles
-  Pâture/bois
-  Pâture/rochers
-  Pré
-  Pâture
-  Terre vaine
-  Terre
-  Rochers



S. ARQUES, 2004 d'après plans et matrices cadastraux napoléoniens
Fond topographique Didier Richard, massifs de Chartreuse, Belledonne et Maurienne au 1/50 000.

tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2006

Les alpages les plus vastes et les plus accessibles du massif sont alors occupés par des troupeaux laitiers et garnis par de nombreux haberts¹ et laiteries (Haut du Seuil, Charmant Som, Grand Som, Jusson, Grande et Petite Vache, Chorolant, Mauvernay, la Saulce...) que les Chartreux ont depuis longtemps laissé à des locataires. On assiste donc à la diminution des alpes à moutons qui vont désormais uniquement pâturer sur les versants à faible valeur pastorale et où les difficultés d'accès sont importantes : lambeaux herbeux des talus d'éboulis, petites pelouses dispersées dans la forêt aux étages inférieurs, pâturages secs à l'est du massif : Chamechaude, Dent de Crolles, Granier...

La fréquentation régulière des alpages, soit par des vaches laitières, soit par des bêtes à laine, se maintient jusqu'au milieu du XIX^{ème} siècle où commence la déprise des montagnes pastorales.

BLACHE (1931) fait état de quelques anecdotes : « Vers 1840, l'empressement des fromagers à louer aux Hospices de Grenoble les excellents pâturages à vaches de l'ancien domaine, a décliné au point que, pour que la gestion restât rémunératrice, il a paru préférable d'introduire à leur place des bayles provençaux avec des bêtes à laine ». Les anciens locataires expliquent cet exode du gros bétail par les épidémies de charbon qui décimaient les troupeaux. L'isolement des vaches chez les propriétaires, été comme hiver, devait enrayer la propagation du mal. Depuis que les plaines disposent de plus de fourrage, elles se soucient moins des alpages. Les moutons du Midi purent donc se répandre en Chartreuse sur les pâturages dépréciés. Pour réduire la dégradation du couvert végétal, les baux limitaient le nombre de visiteurs mais les troupeaux restaient difficiles à compter. On a comptabilisé 1000 à 2000 moutons du Midi à Bellefont, environ un millier entre Bovinant et le Grand Som, 3500 à 4000 à Jusson, la Grande-Vache; mais l'humidité du climat ne convenait guère aux ovins. Les Hospices de Grenoble, ne pouvant relouer qu'à des conditions dérisoires, ont été amenées à aliéner ce capital trop peu productif, c'est-à-dire à faire rentrer dans le domaine de l'Etat, par des ventes, les alpages qui en avaient été détachés en 1807. En 1918, tout passe d'un coup aux mains de l'Etat, c'est-à-dire des forestiers (Annexe A). Moutons et bergers ne viendront plus.

Il n'y a plus que les alpages sommitaux situés à l'est du massif (haberts de Saint-Vincent, de Marcieu) qui accueillent ce qu'il reste de bétail laitier disponible. Depuis de longues années, l'Alpette ne reçoit que du bétail sans lait. Les propriétaires (cluse de Chambéry, vallée du Grésivaudan) amènent des génisses et des chevaux dont ils veulent se défaire pendant l'été. Au lieu de louer les alpages, comme les propriétaires de vaches dans les montagnes laitières, ils payent pour l'entretien et la garde des pensionnaires une taxe à la commune de Chapareillan. Mais le troupeau, qui a compté 450 têtes, n'en a plus que la moitié. Ce sont les reliquats d'une économie pastorale autrefois florissante.

5.3.3.2. Evolution de l'occupation des sols sur la période 1914-1960

Depuis 1914, la progression des landes est très forte au détriment des pâturages notamment sur les versants à éboulis (Carte 4). Ceci est tout à fait confirmé par l'analyse des photographies aériennes sur les 60 dernières années (Troisième partie). Seuls certains alpages sommitaux (Alpette, Alpe) et les versants à éboulis disposant de vastes pelouses et prairies bordières (Grande Sure, Dent de Crolles) ont été utilisés au cours de cette période.

¹ En Chartreuse, chalet d'alpage, cabane de berger (LACHIVER, 1997).







Suite à des discussions que nous avons eues avec la Fédération Française des Alpagnes et les quelques bergers que nous avons croisés, il s'avère qu'après la Seconde Guerre Mondiale, le pâturage de la Dent de Crolles a été abandonné. Les alpagnes sommitaux, ainsi que ceux de la Grande Sure (Jusson, Grande Vache et Petite Vache) n'ont jamais cessé leur activité mais les troupeaux, bovins essentiellement, étaient moins nombreux. Ce n'est que dans les années 90 que les pâturages de Chamechaude et de la Dent de Crolles ont été remis en activité mais ils restent des alpes à moutons (environ 500 moutons à Chamechaude et 1500 pour le Dent de Crolles) contrairement aux alpagnes sommitaux qui accueillent encore des bovins. Par ailleurs, la majorité du bétail (ovins) vient du Midi. A l'exception des pâturages cités précédemment, les autres versants à éboulis, dont les lambeaux herbeux et les quelques pelouses bordières étaient autrefois intensément pâturés, n'ont jamais été remis en activité après 1920 (carte 4 et Annexe A). Au cours de ces quatre dernières années, nous n'avons croisé que quatre chèvres sur le versant de La Plagne (versant occidental du Granier).

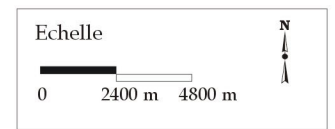
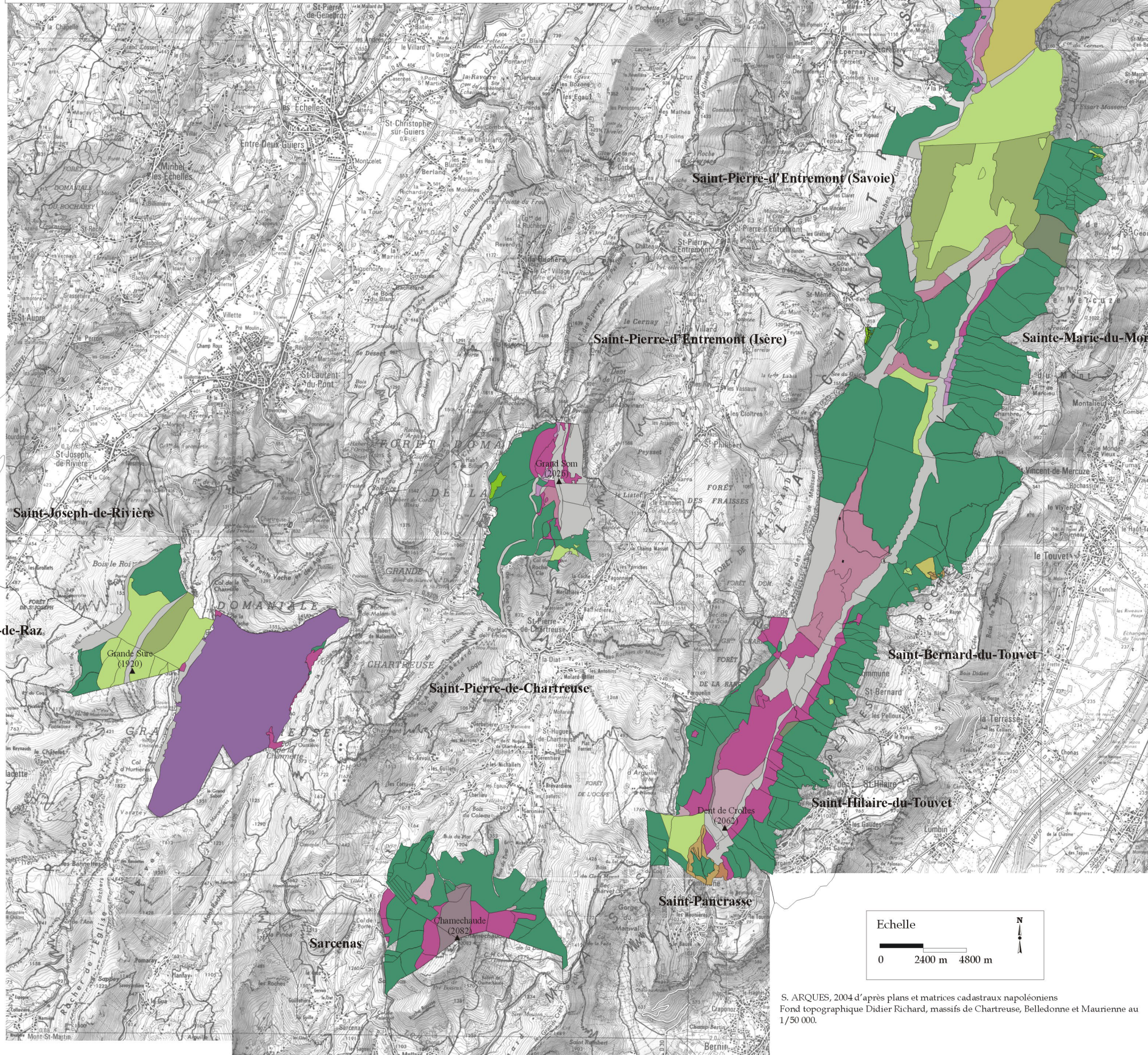
BLACHE (1931) note toutefois qu'au pied de la Grande Roche (rebord oriental au dessus du Centre de Rééducation, au niveau des actuels paravalanches), sur les éboulis et les « sangles » qui précèdent l'escarpement, les communes des Petites-Roches, possèdent des pâturages communaux assez vastes pour y introduire encore dans les années 30 quelques moutons provenant de la rive gauche du Grésivaudan. Effectivement, ce versant à éboulis a été pâturé de manière ponctuelle jusque dans les années 30, il n'est plus occupé aujourd'hui et son habert a été abandonné.

De la chronique historique qui précède, la lumière est faite sur l'occupation agro-pastorale des « hauts » de versant cartusiens. La charge pastorale a été importante. Quelques précisions supplémentaires seront apportées dans la troisième partie de ce travail. L'usage régulier des versants à éboulis pour les activités pastorales explique en partie leur maintien actuel en zones ouvertes. Certains, abandonnés depuis 1914, sont en voie de colonisation végétale (ligneuse et herbacée). Nous le verrons plus loin, les effets conjugués de la déprise pastorale et du réchauffement climatique sont à l'origine de la colonisation végétale des talus d'éboulis dans laquelle nous tenterons de dissocier les deux effets.

Carte n° 4 : Cartographie historique de l'occupation des sols sur les "hauts" de versant du massif de la Chartreuse sur la période 1914-1960.

Classes d'occupation du sol (évolution)

-  Pâture-lande
-  Pâture-pré-lande
-  Pâture-pré-pâture
-  Terre vaine-lande
-  Rochers-pâturage-lande
-  Bois-pâturage-lande



S. ARQUES, 2004 d'après plans et matrices cadastraux napoléoniens
Fond topographique Didier Richard, massifs de Chartreuse, Belledonne et Maurienne au 1/50 000.

tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2006

Conclusion de la première partie

Ces premiers chapitres ont permis de positionner notre recherche et de définir les bases théoriques sur lesquelles se fonde notre approche géo-écologique des talus d'éboulis cartusiens.

La spécificité des talus d'éboulis cartusiens est liée à la lithologie, aux conditions morphoclimatiques locales et au degré de végétalisation. D'un point de vue purement géomorphologique mais surtout morphodynamique, leur structure de surface et leur fonctionnement épidermique complexes sont très proches du modèle triphasé ou polyphasé proposé par ROVERA (1990). En moyenne montagne, au dessous de 2000 m (1500-2000), la dynamique de surface est partiellement influencée par la gravité et les processus nivéo-périglaciaires. La complexité des interactions topo-climatiques, géodynamiques, édaphiques et végétales s'exerçant, selon des intensités variables et à des échelles spatio-temporelles différentes, expliquent certainement la structure, la dynamique et le caractère polygénique des talus d'éboulis cartusiens. Ces considérations nous ont conduit à les envisager sous un angle géo-écologique et dynamique (évolutif). Pour appréhender cette complexité et notamment pour caractériser les relations existantes entre l'état morphodynamique et le degré de végétalisation, nous avons défini une approche systémique de la biorhexistasie que nous allons appliquer à différents niveaux d'organisation et échelles d'observation spatio-temporelles.

Ainsi, les versants à éboulis cartusiens sont définis comme étant des mosaïques biorhexistasiques complexes, génératrices d'ouverture et d'hétérogénéité des milieux, animées par des dynamiques évolutives différentielles en fonction, des différents niveaux d'organisation étudiés et des différentes échelles d'observations spatio-temporelles utilisées. L'environnement immédiat, géologique, géomorphologique, climatique, végétal et anthropique, souligne leur particularité et précise leur originalité. D'autre part, nous leur attribuons une valeur écologique et nous les considérons comme étant des « réservoirs potentiels ou « hot spots » de biodiversité qui en font des milieux particuliers tributaires des changements environnementaux.

Les contraintes écologiques générales et notamment climatiques ont certainement un rôle majeur sur la structure et la dynamique des mosaïques. En Chartreuse, nous avons montré que deux des principaux paramètres qui conditionnent l'équilibre phytomorphodynamique des versants à éboulis ont subi des modifications importantes qui devraient se traduire par une évolution de cet équilibre. Le réchauffement climatique et la déprise sylvo-pastorale des « hauts » de versant sont attestés en Chartreuse. On peut dès lors légitimement supposer que la réduction de la fréquence/intensité des processus nivéo-périglaciaires, l'allongement de la période végétative ainsi que la quasi-absence de pression anthropique, devraient favoriser leur colonisation végétale et une réorganisation des mosaïques.

Dès lors, il convient de définir une méthodologie d'analyse qui nous permettra d'infirmer ou de conforter cette hypothèse. L'objectif étant d'acquérir une connaissance approfondie des caractéristiques géo-écologiques et des dynamiques naturelles et/ou anthropiques qui animent ces mosaïques biorhexistasiques originales, depuis le début du siècle dernier.

DEUXIEME PARTIE

Méthodologie pour une étude géo-écologique des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis

Chapitre 4 : Analyse systémique des mosaïques biorhexistasiques

- I. Une démarche systémique pour l'étude des mosaïques biorhexistasiques
- II. La stratification de l'échantillonnage
- III. Approche spatiale et dynamique des mosaïques biorhexistasiques à l'échelle des écocomplexes

Chapitre 5 : Protocoles d'étude et descripteurs utilisés à l'échelle de la station et de la parcelle

- I. Morphométrie, géodynamique de surface et suivi morphoclimatique
- II. Approche phyto-écologique et évaluation de la phytodiversité

CHAPITRE 4

Analyse systémique des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis

Ce chapitre présente la démarche utilisée pour l'analyse de la structure et de la dynamique des mosaïques biorhexistasiques des versants à éboulis. L'étude géo-écologique repose sur une analyse systémique et une approche pluriscalaire à différents niveaux d'organisation et d'observation. Sa dimension spatiale nous permettra d'étudier les processus qui animent ces mosaïques, dans l'espace et dans le temps. Elle s'inscrit dans un contexte pluridisciplinaire.

I. Une démarche systémique pour l'étude des mosaïques biorhexistasiques

1.1. L'utilité d'une approche systémique

L'utilisation de la démarche systémique répond à la complexité de notre sujet, au sein duquel des processus de nature différente interagissent et se complètent. L'avantage du concept de système repose sur le fait que le nombre de composants et de processus interactifs peut être simplifié en effectuant un tri et en isolant les plus pertinents (WALLISER, 1977; CLAVAL, 1995 *in* MARTIN, 1999). ROVERA (1990) parle alors de systémique « sélective ». Selon FELTGEN-DIDIER (1998), cette démarche permet de dresser une hiérarchie et d'appréhender des problèmes caractérisés par un degré élevé de complexité. Les apports de la systémique en géographie sont nombreux (TRICART, 1982; CLAVAL, 1996). Ainsi, les questions environnementales largement abordées dans notre discipline représentent un terrain particulièrement bien adapté pour l'application des principes de la démarche systémique (LUGINBÜHL et MUXART, 1998). L'étude des relations « climat-végétation-sols-processus morphogéniques » doit s'inscrire dans une démarche systémique (ROVERA, 1978; SOUTADE, 1980; TRICART, 1982; BAUDIERE et SOUTADE, 1985; ROVERA, 1990) et les talus d'éboulis se prêtent bien à ce type de démarche (ARQUES, 1999; ARQUES *et al.*, 2003).

Cette démarche vise quatre objectifs :

- **développer une approche de la mosaïque biorhexistasique** qui prend en compte l'hétérogénéité des versants à éboulis et la nature pluriscalaire des systèmes écologiques;
- **hiérarchiser les facteurs explicatifs** de ces structures, à l'origine de la colonisation végétale observée, à l'échelle du massif puis de quelques talus d'éboulis représentatifs;
- **mettre en évidence les effets potentiels** de la colonisation végétale **sur la biodiversité** (diversité spécifique et écosystémique) des mosaïques biorhexistasiques;
- préciser **le rôle des changements environnementaux** (homme et climat) dans l'évolution de la structure et de la dynamique des mosaïques biorhexistasiques.

1.2. L'approche pluriscale et spatio-temporelle : les niveaux d'organisation et les échelles d'observation

1.2.1. La théorie de la hiérarchie

1.2.1.1. Principes

L'échelle spatiale est un concept central dans les sciences qui s'intéressent aux activités anthropiques et aux processus physiques qui se produisent à la surface de la terre. Le concept d'échelle est maintenant largement reconnu comme étant au cœur de la description de l'organisation hiérarchique de l'espace géographique (MARCEAU, 1999).

Dans le contexte environnemental actuel, l'impact du réchauffement climatique et de la déprise agro-sylvo-pastorale sur les écosystèmes requiert une compréhension de la façon dont les processus opèrent à différentes échelles et comment ils peuvent être liés à travers plusieurs échelles. La complexité des systèmes écologiques est due à la combinaison du grand nombre de composantes, des interactions non linéaires entre elles, de délais temporels ainsi que de phénomènes de rétroactions et de l'hétérogénéité spatiale (WU, 1999). Afin de comprendre les systèmes écologiques et comment il est possible de passer d'une échelle d'observation à une autre, on se doit de tenir compte de la complexité.

Les écologues, travaillant à des échelles d'observation multiples, allant de l'organisme à la communauté, sont confrontés au problème du lien existant entre ces différents niveaux (ALLEN *et al.*, 1987 *in* FELTGEN DIDIER, 1998). Un des principes de base de la systémique, qu'elle s'applique au monde vivant ou non, est que les niveaux supérieurs ne résultent pas simplement de la somme ou de l'agrégation de niveaux inférieurs, mais que leur organisation requiert des principes explicatifs propres (ALLEN et WYLETO, 1983 *in* FELTGEN DIDIER, 1998). Ceci conduit à une réflexion qui dépasse le simple cadre de l'existence d'échelles multiples. Ainsi se développe la théorie de la hiérarchie (ALLEN et STARR, 1982), qui trouve de nombreuses implications dans la biologie, l'écologie mais aussi, selon nous, dans la géo-écologie.

La théorie de la hiérarchie (ALLEN et STARR, 1982) suggère que les systèmes écologiques sont en fait des systèmes presque décomposables à cause d'un couplage vertical et horizontal non serré de leur structure et de leur fonctionnement. Ces systèmes peuvent donc être simplifiés en se basant sur les principes de décomposition spatio-temporelle (WU, 1999).

Selon ALLEN (1987 *in* FELTGEN DIDIER, 1998), il n'y a pas d'organisation absolue (au-delà des individus) indépendamment de l'observateur. Avec le choix primaire de la structure observée qui détermine le niveau de départ, c'est le choix du phénomène observé qui détermine les prochains niveaux dans la hiérarchie, qu'ils soient inférieurs ou supérieurs.

D'après ALLEN et HOEKSTRA (1990), toute observation d'un système écologique requiert deux décisions préalables, l'une concernant les paramètres scalaires et l'autre les critères non scalaires. Le passage d'un niveau d'organisation à un autre s'effectue soit par un changement de critère, soit par un changement d'échelle s'appréciation.

1.2.1.2. Les paramètres scalaires et les critères non scalaires

A. Le choix de l'échelle d'observation

Selon ALLEN *et al.* (1987 *in* FELTGEN DIDIER, 1998), le choix de l'échelle qui doit précéder l'échantillonnage est formalisé à travers trois paramètres d'observation : le grain, l'étendue et l'intensité.

- 1) Le **grain** détermine la limite inférieure de résolution et donc le niveau d'observation le plus fin. Par exemple la parcelle de mesure.
- 2) L'**étendue** détermine l'échelle d'observation et d'hétérogénéité distinguable la plus vaste, c'est la surface sur laquelle se répartissent les échantillons individuels. Dans notre cas il s'agira de l'écocomplexe.
- 3) L'**intensité**, non scalaire, se réfère à la densité d'échantillonnage.

Comme le souligne FELTGEN DIDIER (1998), ces principes paraissent simples, mais souvent ces critères sont inhérents à la méthode de récolte ou de traitement des données, sans que leur choix soit explicite. Or, l'échelle d'observation (degrés de résolution) détermine le niveau d'organisation qu'il est possible de mettre en évidence.

B. Le choix des critères non scalaires

Selon ALLEN et HOEKSTRA (1990), les niveaux conventionnels (la cellule, l'organisme, la population, la communauté, l'écosystème, le paysage, le biome et la biosphère) ne devraient pas être utilisés comme architecture de base pour une étude pluriscale. S'ils sont généralement considérés comme une hiérarchie de systèmes d'échelles différentes emboîtées et même s'ils peuvent être ordonnés hiérarchiquement, leur définition conventionnelle ne repose pas sur des différences scalaires, mais sur des critères de fonctionnement permettant de distinguer le système en question de son contexte.

La distinction entre les niveaux conventionnels ne dépend donc pas de leur extension spatio-temporelle ni de leur emboîtement selon un ordre défini. Il est donc important de bien définir le (s) niveau (x) que l'on souhaite aborder, et cela dépend du type de processus étudié. Pour que la distinction entre niveaux soit scalaire, il faut faire intervenir le grain et l'étendue de l'observation.

1.2.2. Application aux mosaïques biorhexistatiques d'éboulis

L'objet de notre étude est la mosaïque biorhexistatique d'éboulis. Nous avons choisi, conjointement, le paysage et la végétation comme entrée. Cela est justifié par le fait que c'est à cette échelle que nous avons observé, avant toute étude préalable, la structure biorhexistatique des versants à éboulis et une dynamique diversifiée de la végétation. Les facteurs qui influencent la structure et la dynamique de la mosaïque biorhexistatique diffèrent selon l'échelle spatio-temporelle d'observation. Selon une résolution croissante, on distingue trois **niveaux d'organisation** en interaction (ARQUES *et al.*, 2001; ARQUES *et al.*, 2003) (Tableau 4 et Figure 12) :

-l'écocomplexe : en fonction de leur localisation, au sein du massif, les versants à éboulis constituent des ensembles phyto-morphologiques bien distincts. D'un point de vue géomorphologique, ils correspondent à des géosystèmes corniche-tablier d'éboulis ou couloir- cône d'éboulis encadrés par des écosystèmes périphériques (pelouse, prairie, forêt);

-la station (au sens écologique du terme, BLONDEL, 1999) : c'est-à-dire le talus d'éboulis;

-la placette (au sens méthodologique du terme): il s'agit de la placette de mesure. Elle est caractérisée par une diversité de facteurs écologiques (abiotiques, biotiques et anthropiques). Elle est appréhendée à l'échelle métrique à pluri-métrique.

Chaque niveau permet d'appréhender un gradient biorhexistasique. Par conséquent, la biorhexistasie n'a pas réellement d'échelle mais elle a surtout un sens et un intérêt final au niveau du paysage.

FELTGEN-DIDIER (1998) souligne qu'une approche pluriscalaire devient hiérarchique, quand les phénomènes observés aux différentes échelles sont confrontés les uns aux autres, de manière à établir un lien fonctionnel entre niveaux. La hiérarchie se construit à partir d'un phénomène observé ou d'un changement d'état. C'est un aspect fondamental pour appréhender l'évolution des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis. Dans notre cas, le changement d'état observé se caractérise par une colonisation végétale et une morphodynamique différentes en fonction des mosaïques considérées. Par colonisation végétale différente nous entendons :

- des modalités et des vitesses de colonisation végétale différentes en fonction des écocomplexes (inter et intra- versants à éboulis) étudiés : colonisation végétale faible, moyenne, forte selon une dynamique plus ou moins rapide. Cette colonisation est le fait de ligneux et/ou d'herbacées;

- des modalités et des vitesses de colonisation végétale et différentes en fonction des stations étudiées (inter et intra - talus d'éboulis) : dynamique différentielle des ligneux et/ou des tapis herbacés.

En se basant sur le modèle systémique et hiérarchique des paysages d'altitude, élaboré par FELTGEN-DIDIER (1998) voici comment nous pouvons résumer notre démarche (Tableau 4).

Tableau 4 : Démarche systémique appliquée aux mosaïques biorhexistasiques d'éboulis

Niveau d'organisation des mosaïques biorhexistasiques	Echelle d'observation		Changement d'état	Phénomène observé
	Spatiale	Temporelle		
L'éco-complexe : les versants à éboulis	Kilométrique à pluri-hectométrique	Siècle ou demi-siècle	Colonisation végétale différentielle (ligneuse et/ou herbacée)	Avancée du front forestier, colonisation ligneuse et/ou herbacée. Réorganisation de la mosaïque biorhexistasique (dynamique des unités phyto-morphologiques, caractéristiques de la structure paysagère (degrés de diversité, de complexité et d'hétérogénéité), fonctionnement géodynamique différentiel, anthropisation.
La station : le talus d'éboulis	Hectométrique	Année, saison, journée		Caractérisation et fonctionnement des unités phyto-morphologiques (phytomorphosystèmes, écotones biorhexistasiques), morphodynamique différentielle.
La parcelle : la parcelle de mesure sur la station	Métrique à pluri-métrique	Année, saison, journée		Identification des espèces végétales (herbacées et/ou arbustives), mise en évidence des facteurs écologiques, géodynamiques, dendrogéomorphologiques et micro-climatiques à l'échelle métrique, estimation de la diversité spécifique.

La structure et la dynamique des mosaïques biorhexistasiques seront étudiées à chaque niveau d'organisation. Cette démarche systémique s'appuie sur une mise au point méthodologique.

II. La stratification de l'échantillonnage

« Un bon échantillon doit être représentatif du terrain étudié; sans cela on ne peut attribuer à la population-mère les observations ou les calculs effectués sur cet échantillon » (CHADULE, 1994). Il existe trois stratégies d'échantillonnage : systématique, aléatoire et par stratification (ou quota).

Comme le soulignent FELTGEN-DIDIER (1998) et VANPEENE-BRUHIER (1998), en écologie du paysage, la technique de sondage la plus souvent utilisée et la plus proche d'une démarche hiérarchique, pluriscale et spatialisée, est la stratification car le prélèvement sur le terrain ne peut pas toujours être systématique.

Le changement **d'échelle d'observation** de l'écocomplexe à la parcelle est réalisé grâce à une démarche d'échantillonnage stratifié (Figure 12).

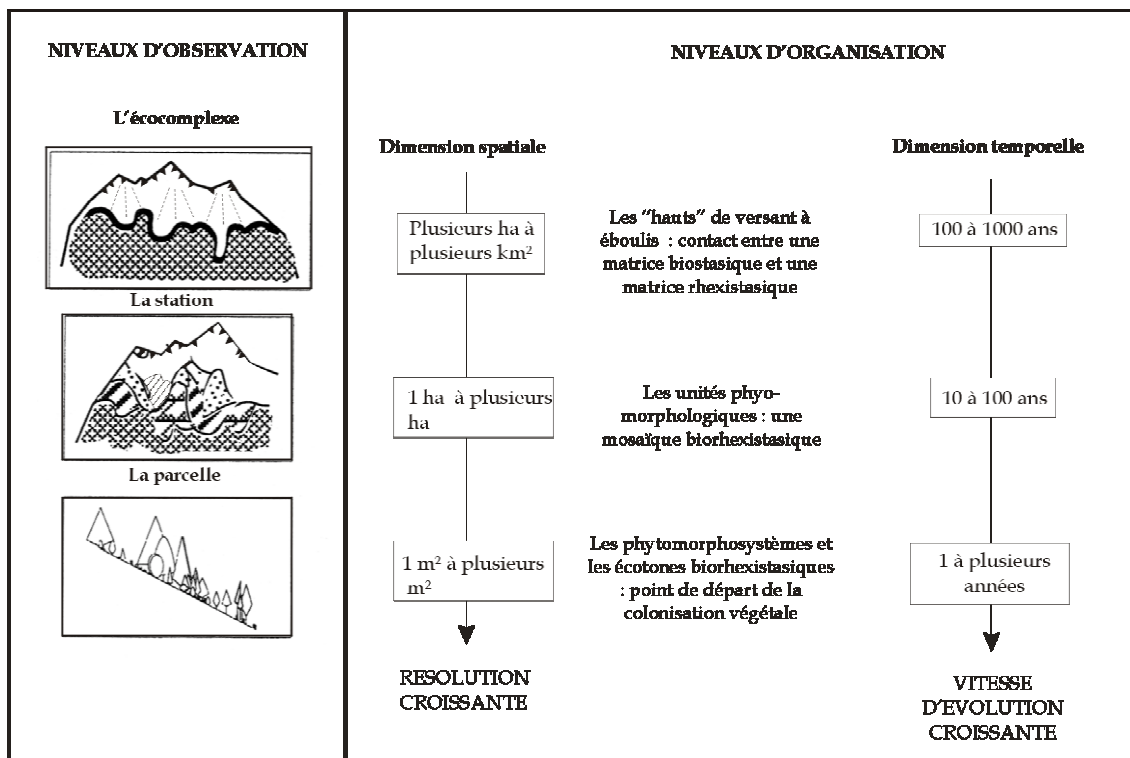


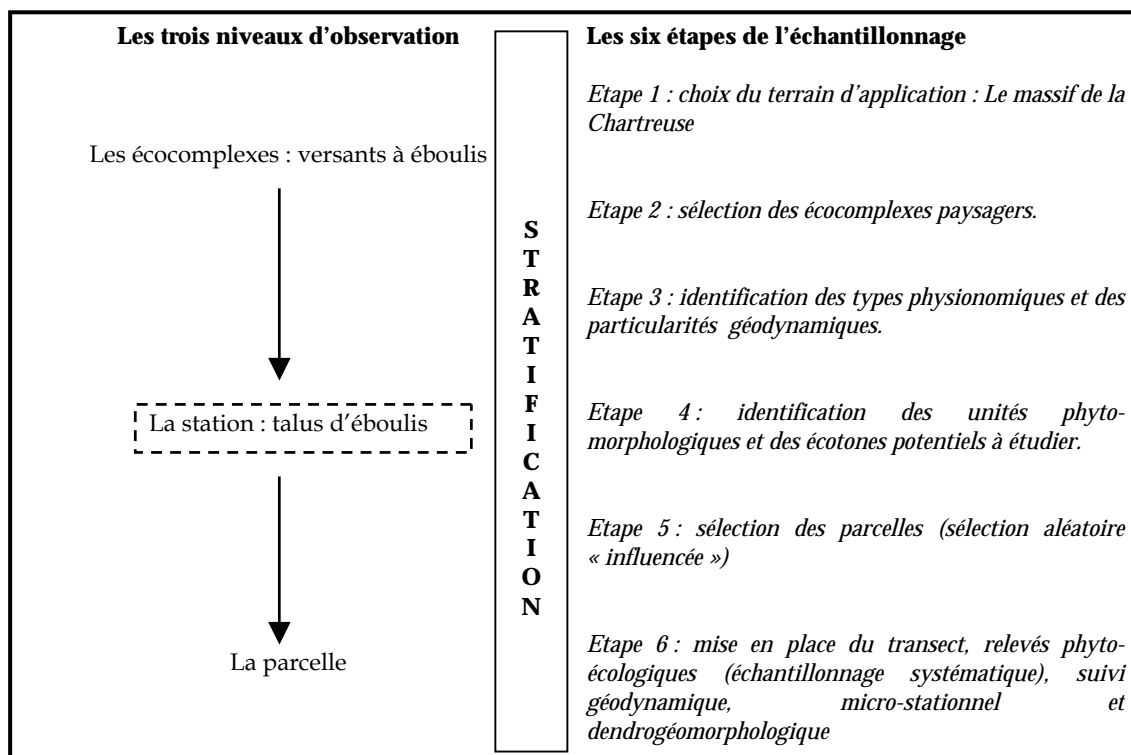
Figure 12 : Démarche d'échantillonnage stratifié descendante (Inspirée de FELTGEN-DIDIER, 1998)

« L'échantillonnage stratifié est une technique qui consiste à subdiviser une population hétérogène en sous-populations ou « strates » plus homogènes, mutuellement exclusives et collectivement exhaustives. Un échantillon indépendant est par la suite prélevé au sein de chacune des strates en appliquant un plan d'échantillonnage au choix. La première étape de la construction des strates consiste à choisir un critère de stratification, la deuxième à fixer le nombre de strates, la troisième à limiter les strates et la quatrième à dénombrer les éléments de chacune des strates, un élément étant une unité d'échantillonnage, concrète (individu) ou abstraite (association végétale), sur laquelle on mesure ou on observe la ou les variables étudiées » (SCHERRER, 1983 in FELTGEN-DIDIER, 1998).

C'est une démarche qui s'applique bien à l'étude des mosaïques biorhexistatiques d'éboulis (ARQUES, 1999; ARQUES *et al.*, 2003). Cependant, si notre approche s'appuie sur les fondements

de la stratification, les stratégies d'échantillonnage systématique et aléatoire¹ ne sont pas occultées (Figure 13).

Figure n°13 : Le plan d'échantillonnage



A l'échelle de l'écosystème, il est possible d'identifier les types physiologiques et les particularités géodynamiques des versants à éboulis. Ces unités phyto-morphologiques potentielles, seront ensuite caractérisées individuellement en termes de géodynamique et de composition végétale à l'échelle de la parcelle. L'assemblage de ces nouvelles unités permet ensuite de remonter au niveau d'observation supérieur c'est-à-dire l'écosystème. La station constitue un niveau d'observation intermédiaire entre l'écosystème et la parcelle. Elle est pour nous un lien fonctionnel qui permet de « naviguer » entre ces deux niveaux. La station est constituée d'une mosaïque d'unités phyto-morphologiques dynamiques qui est à l'origine de la structure biorhexistatique. Toute modification d'une ou de plusieurs unités provoquera une réorganisation de la mosaïque biorhexistatique d'éboulis.

Dans les chapitres qui suivent, nous détaillons chaque étape de la démarche et présentons les différents descripteurs utilisés en fonction du niveau d'observation abordé. Notre recherche est basée sur l'analyse diachronique et les relevés de terrain.

Nous disposons de trois principales sources d'information :

- les données cartographiques et photographiques de l'Institut Géographique National (IGN) et de l'Inventaire Forestier National (IFN);

¹ Cette méthode est parfois qualifiée de subjective par certains auteurs. DAGET et GODRON (1982) soulignent que « dans la terminologie de la méthode scientifique « subjectif » ne veut pas dire « irrationnel, sentimental ou inutilisable », mais « influencé par l'expérience personnelle de l'opérateur, du sujet ».

- les données contenues dans des documents administratifs (données cadastrales par exemple);
- les données recueillies sur le terrain.

A l'échelle des écosystèmes notre approche est avant tout spatiale et cartographique. Aux niveaux inférieurs (station, parcelle), les données de terrain ont été récoltées à l'aide de méthodes diverses : géomorphologiques, phyto-écologique, micro-climatologique et dendrogéomorphologiques. Ces données correspondent à des descripteurs statiques, structuraux et/ou dynamiques.

III. Approche spatiale et dynamique des mosaïques biorhexistasiques à l'échelle des écocomplexes

L'approche à l'échelle des versants à éboulis est essentiellement spatiale et cartographique. Cela revient d'une part, à déterminer les caractéristiques structurales des mosaïques biorhexistasiques, d'autre part, de caractériser les dynamiques d'évolution différentielles et enfin, de mettre en évidence les différents paramètres susceptibles d'expliquer, à cette échelle, la diversité des structures et des évolutions, observée.

Le choix des écocomplexes résulte d'une part, de l'analyse des données environnementales présentée au sein de la première partie (Chapitres 1 et 3), d'autre part, d'une cartographie diachronique appliquée à une partie du massif de la Chartreuse (partie sud du rebord oriental) dont les résultats nous ont permis de sélectionner les écocomplexes à dynamiques végétales différentielles. Cette cartographie ne sera pas présentée ici mais elle est disponible en annexe (Annexe B). Et enfin, ce choix a aussi été guidé par des éléments issus de travaux antérieurs (ROVERA, 1978; ARQUES, 1999; ARQUES *et al.*, 2001). Nous avons mis l'accent sur les clés environnementales suivantes :

- Paramètre (s) physique (s) :
 - la géomorphologie des talus d'éboulis : cône ou tablier d'éboulis et corniches associées
- Paramètre (s) climatique (s) :
 - la longitude car elle est susceptible de provoquer des modifications macroclimatiques ayant des incidences sur le fonctionnement des mosaïques biorhexistasiques (dynamiques différentes des mosaïques à l'est et à l'ouest du massif);
 - l'exposition et/ ou la micro-exposition : structures et dynamiques différentielles des mosaïques biorhexistasiques en adret et en ubac;
- Paramètre (s) anthropique (s) :
 - l'occupation humaine différentielle, en nature et intensité, des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis;
- Végétation :
 - la dynamique différentielle de la végétation en terme de vitesse, de nature et de degré de végétalisation.

Les six sites retenus sont représentatifs de la diversité du terrain d'étude en termes de facteurs environnementaux, de dynamique des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis et d'occupation humaine (Carte 5). Il s'agit, exposés en adret sur la bordure orientale du synclinal perché des Hauts Plateaux, du cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil² et du tablier d'éboulis des « Pelloux » puis, exposé en ubac (grand ubac) sur la bordure occidentale du synclinal au nord, du tablier d'éboulis de La Plagne. Au centre, nous avons choisi le talus d'éboulis mixte situé sur le versant occidental

² Les noms choisis pour nommer les écocomplexes sont issus de la toponymie d'un sommet, d'une forêt ou d'une commune situés à proximité. Par exemple, l'Aulp du Seuil est le nom d'une crête qui surplombe le cône d'éboulis, les « Pelloux » est un lieu-dit de la commune de Saint-Bernard-du-Touvet...

du Grand-Som et enfin, à l'Est le tablier d'éboulis situé sur le rebord occidental de la Grande-Sure. Ces différents écomplexes font l'objet d'une présentation détaillée dans la partie consacrée aux résultats.

3.1. Cartographie diachronique de l'occupation des sols

Pour chacun des cinq écomplexes, nous détaillons l'évolution de l'occupation du sol depuis 1820. Cette analyse met en évidence des degrés d'anthropisation variés qui expliquent la diversité observée, en termes de nature et de vitesse de colonisation végétale, en fonction des écomplexes considérés. Les extraits de cartes proviennent de découpages effectués sur les cartes 3 et 4 (Première partie, Chapitre 3).

3.2. Cartographie diachronique des physionomies végétales

Les plus anciens documents cartographiques datent de la fin du siècle dernier mais les informations relatives à l'évolution du couvert végétal sur les « hauts » de versant se sont révélées insuffisantes en Chartreuse pour que nous puissions réaliser une approche diachronique correcte.

Le croisement des documents cartographiques anciens (carte de Cassini, carte d'Etat Major, cartes topographiques diverses...) et actuels (cartes topographiques au 1/50 000, 1/ 25 000) s'est révélé inutilisable en raison, notamment, de l'hétérogénéité des documents.

Les mosaïques biorhexistatiques d'éboulis couvrent de faibles surfaces proportionnellement aux éléments encadrants comme la forêt sous-jacente et les parties sommitales. Dans les fonds cartographiques anciens leur délimitation est absente, à l'exception des zones où des processus d'éboulement ont eu lieu (Mont Granier, par exemple), et la couverture forestière suggérée. D'autre part, les couvertures du massif, les échelles utilisées et les dates d'édition des cartes sont très hétérogènes ce qui rend plus que douteuse la délimitation du front forestier. Nous avons pensé utiliser les documents cadastraux mais malheureusement, si la mappe sarde est très précise, elle ne couvre que deux communes et les délimitations des parcelles du cadastre napoléonien sont souvent trop simplifiées au niveau des versants à éboulis.

Par conséquent, nous avons préféré baser notre cartographie diachronique sur les missions photographiques de l'Institut Géographique National (IGN), de l'Institut Forestier National (IFN) ainsi que sur des collections de photographies obliques privées. Le tableau 5 présente, pour chaque écomplexe, les données utilisées.

Grâce à l'iconographie disponible (Tableau 5, annexe C), la structure et la dynamique de colonisation végétale de chaque écomplexe peuvent être étudiées selon un pas de temps de l'ordre du siècle ou du demi-siècle. Les cartes sont au 1/2500, ce qui est relativement précis.

Carte n° 5 : Localisation des principaux écocomplexes



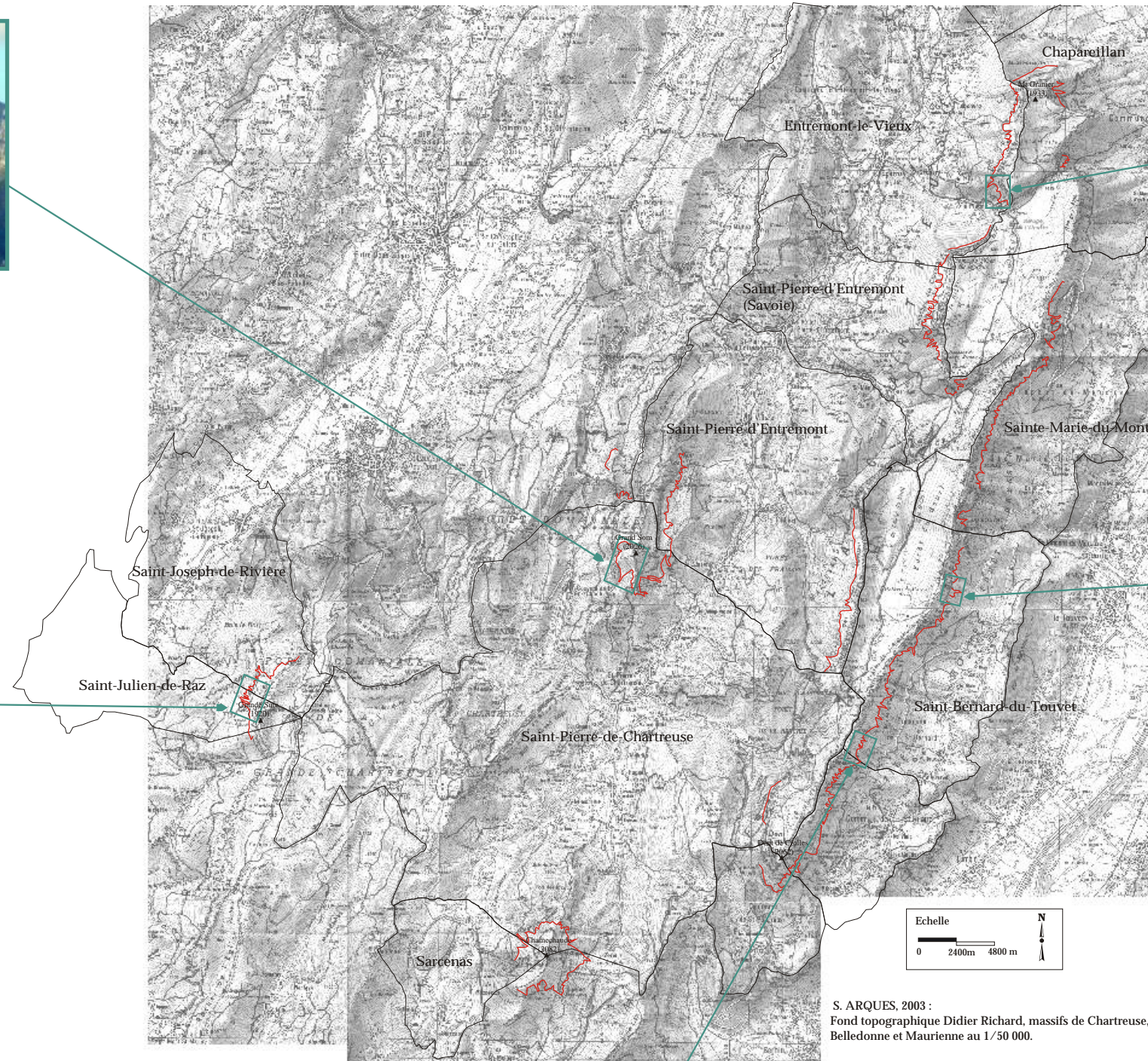
Talus d'éboulis mixte du Grand Som



Tablier d'éboulis de La Plagne



Tablier d'éboulis de la Grande Sure



Cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil



Tablier d'éboulis des Pelloux

S. ARQUES, 2003 :
Fond topographique Didier Richard, massifs de Chartreuse,
Belledonne et Maurienne au 1/50 000.

Ecocomplexe	Donnée photographique ancienne (date et type)	Source	Donnée photographique actuelle (date et type)	Source	Donnée photographique intermédiaire (date, type et source)	Pas de temps
La Plagne	1911, photographie oblique	Paul Helbronner (Panorama, Institut de Géographie alpine)	2001, photographie oblique	S. ARQUES	1956, photographie aérienne panchromatique (agrandissement 1/10 000), cliché n°137. 1978, photographie oblique, G. ROVERA	Siècle
Aulp du Seuil	1956, photographie aérienne (panchromatique, agrandissement 1/10 000°), cliché n°144.	IGN	2001, photographie oblique	S. ARQUES	1993, photographie aérienne (Infra-Rouge Couleur, 1/17 000, IFN), cliché n°1545	Demi-Siècle
Grand Som	1920-1930, photographie oblique	Félix Poulat (Musée Dauphinois, Grenoble)	2001, photographie oblique 2001, photographie aérienne (couleurs naturelle, 1/25 000), cliché n°2737	S. ARQUES IGN	1956, photographie aérienne panchromatique, IGN, (agrandissement 1/10 000°), cliché n°095.	Siècle
Grande Sure	1956, photographie aérienne panchromatique (agrandissement 1/10 000°), cliché n°238.	IGN	2001, photographie oblique 2003, photographie aérienne (couleurs naturelle, 1/25 000), cliché n°2345	S. ARQUES IGN	*	Demi-siècle
Pelloux	1956, photographie aérienne panchromatique (agrandissement 1/10 000), cliché n°193.	IGN	1999, photographie oblique	S. ARQUES	1993, photographie aérienne, (IRC), 1/17 000, IGN, cliché n°1528.	Demi-siècle

* Donnée manquante

Tableau 5 : Données photographiques (date, type et source)

3.2.1. Traitements des documents topographiques et photographiques

Cette procédure de traitement est commune aux cartographies diachroniques effectuées à l'échelle du synclinal (Annexe B) et des écosystèmes.

3.2.1.1. Ortho-rectification des données

L'étape préalable à la réalisation des cartographies diachroniques a été consacrée à l'ortho-rectification des photographies aériennes et obliques (correction géométrique). Nous ne détaillerons pas ici les différents types de déformations qui affectent les photographies aériennes car il s'agit d'un phénomène bien connu et ce n'est pas l'objet de notre travail. Citons néanmoins, le relief, la parallaxe et le tangage de l'avion qui font que ni l'échelle, ni les formes, ni les surfaces ne sont constantes sur l'ensemble d'un même cliché. Il est facile d'imaginer l'ampleur du phénomène sur une dizaine de clichés. Afin de corriger ces déformations, nous avons recours à l'ortho-rectification. Nous renvoyons aux travaux de KERKACHE (1996), DELETRAZ, (1997) et ANDREAU (2003) pour une présentation très détaillée de la chaîne des traitements de l'ortho-rectification à la classification supervisée. La figure 14 résume les principales étapes suivies.

Le redressement des photographies obliques a été réalisé grâce à la prise de points de calage (amers) au GPS¹ sur le terrain. Nous avons enregistré les coordonnées d'éléments visibles sur les différents fonds photographiques anciens et actuels (blocs erratiques, vieux pins à crochets...). Ces coordonnées ont été converties en Lambert III via un utilitaire GPS, CartoNav[®]. Dans la procédure d'ortho-rectification, sous Er Mapper 6.0[®], il suffit ensuite d'entrer ces coordonnées manuellement.

¹ GPS Etrex summit (Garmin).

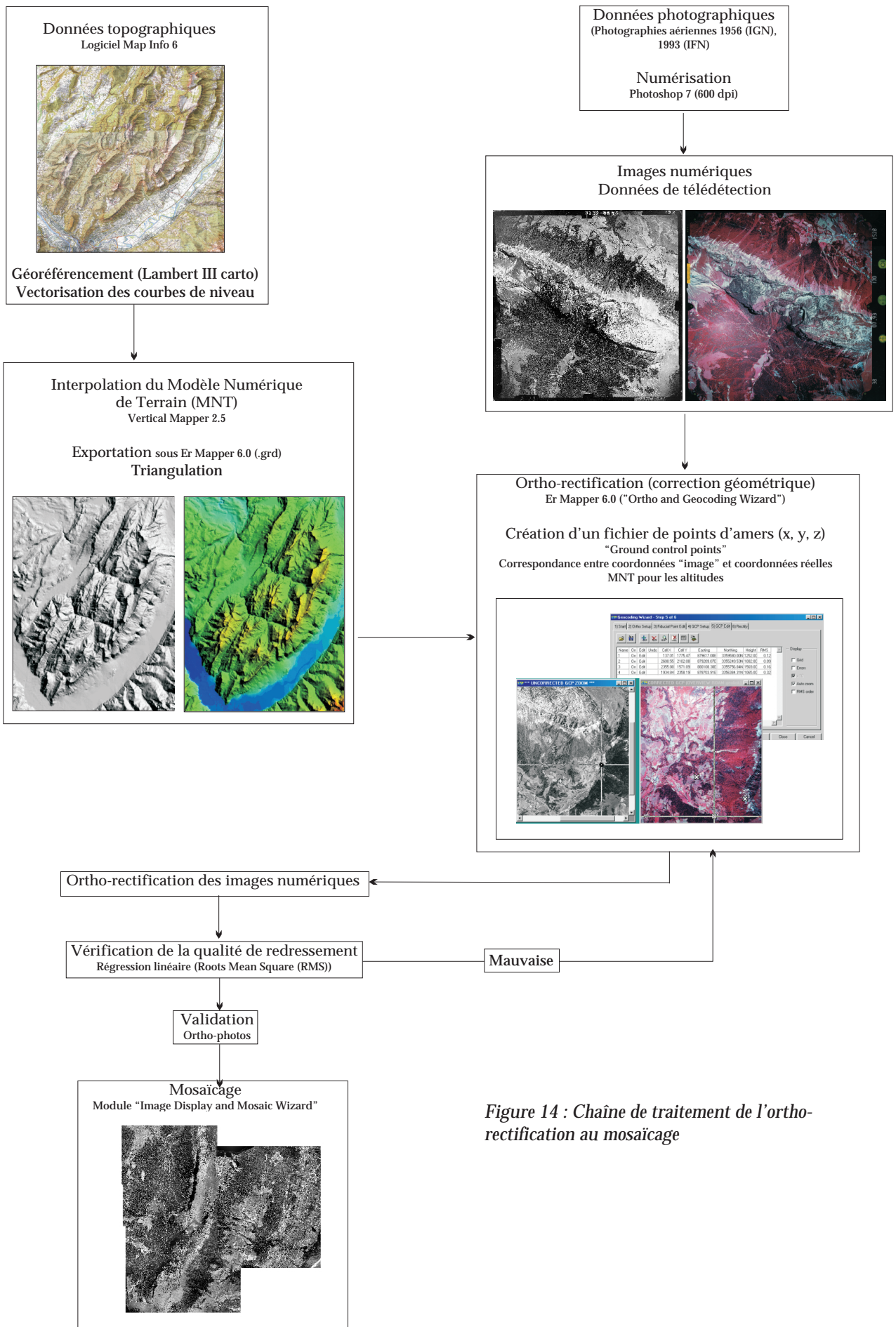


Figure 14 : Chaîne de traitement de l'ortho-rectification au mosaïcage

3.2.1.2. Classification supervisée : cartographie automatique

Les photographies (aériennes et obliques) ont fait l'objet d'une classification automatique supervisée en choisissant l'algorithme qui correspond au maximum de vraisemblance (maximum likelihood) sous hypothèse gaussienne, méthode présentée, dans la littérature, comme la plus performante (BORNICCHIA, 1996). Cette classification supervisée a été réalisée sous Er Mapper 6.0®. Ce type de classification est utilisé lorsque l'utilisateur dispose d'une bonne connaissance du terrain. Nous renvoyons à une étude réalisée par ANDREAU (2003) pour une procédure « *pas à pas* » de la classification supervisée sous Er Mapper 6.0® et à DELETRAZ (1997) pour la même procédure sous Multiscope ®. Nous détaillons le traitement, pour des marquages à la peinture, dans le paragraphe 1.2.3. du Chapitre 6. Er Mapper est un Système d'Information Géographique (SIG) en mode raster, il ne permet pas de gérer des bases de données (BD) et d'effectuer des calculs sur ces BD. Les données issues de la classification ont donc été vectorisées et exportées « couche par couche » au format .DXF sous Map Info 6 ® pour être cartographiées. Le rendu graphique final a été réalisé sous Corel Draw 11.

3.2.2. Les documents cartographiques

A l'issue de cette procédure de traitement, deux types de carte ont été réalisés pour chaque éco-complexe :

- une cartographie représentant la structure et les états successifs des types physiologiques à différentes dates, en fonction des documents iconographiques disponibles (Tableau 5);
- une cartographie diachronique (superposition des différents états) permettant une appréciation qualitative directe de la dynamique des types physiologiques à l'échelle du siècle ou du demi-siècle.

3.2.2.1. Cartographie des états successifs des types physiologiques

Les états successifs des types physiologiques sont cartographiés en dégradés de vert. La légende est commune, à quelques exceptions près, aux différentes couvertures (1911-1978 et 2001 par exemple). Trois postes de légende ont été définis :

- formation (s) ligneuse (s)
 - forêt
- formation (s) de transition
 - lande (ou lande arborée selon les éco-complexes)
 - îlot arbustif sur formation végétale
 - îlot arbustif sur éboulis
- formation (s) non boisée (s)
 - pelouse (absente parfois)
 - piquetage herbacé

Dans un premier temps, nous utiliserons de simples descripteurs pour analyser l'évolution de la structure et de la dynamique de chaque éco-complexe. Nous nous intéresserons notamment, à la répartition des types physiologiques ainsi qu'à l'évolution des périmètres, des surfaces et du nombre de taches (unités physiologiques) appartenant à un type physiologique donné, sur les

différentes périodes. Puis, nous tenterons de les comparer entre eux. Enfin, l'analyse de l'évolution spatio-temporelle de la mosaïque biorhexistatique à l'échelle des écosystèmes sera aussi réalisée à travers les notions de diversité et de complexité (du paysage). Deux types d'indices seront calculés : a) l'indice de diversité et b) l'indice de complexité.

A. La diversité spatiale

Selon BAUDRY et BAUDRY-BUREL (1982), la diversité d'une région est liée à la variété des unités d'occupation du sol mais aussi à l'organisation de l'espace. Des deux facteurs principaux de la diversité spatiale : variété écologique et organisation de l'espace, on peut déduire les descripteurs de base directement liés à la diversité :

- nombre d'unités d'occupation du sol;
- surface occupée par chaque unité;
- périmètre de chaque unité (= longueur de contact avec les unités voisines);
- dispersion des unités (= nombre d'îlots élémentaires).

La diversité est définie par rapport aux notions de quantité d'individus différents et de proportion optimale dans la répartition des individus dans les classes. Dans le cas de la diversité spatiale, la population est constituée d'unités paysagères. Par analogie à la diversité spécifique, la diversité spatiale d'un paysage dépend du nombre d'unités paysagères différentes. Ainsi, plus un paysage comprend de classes différentes d'unités paysagères, plus il est divers, et à nombre de classes égal, un paysage est d'autant plus divers que le nombre d'unités par classe est équilibré (DELCROS, 1993). BAUDRY et BAUDRY-BUREL (1982) ont proposé un indice D pour mesurer la « diversité spatiale induite par la présence d'une unité écologique i ». Cet indice, modifié par DELCROS (1993) est le suivant :

$$D = \log_{10} \frac{P_i n_i}{S | 100S_i - 50S |}$$

D'après la formule, la diversité D induite à l'hectare :

- croît avec la longueur du périmètre P_i par unité de surface (hectomètre);
- croît avec la fragmentation (n_i = nombre de taches de l'unité paysagère);
- décroît avec la superficie moyenne des taches (S_i/n_i);
- croît quand la surface S_i occupée par l'unité paysagère est proche de la moitié de la surface totale du paysage observé (S) :

Où :

P_i = périmètre des polygones de l'unité paysagère

n_i = nombre de polygones de l'unité paysagère

S_i = surface des polygones de l'unité paysagère

S = surface totale de la carte

L'indice de diversité D est calculé pour chaque unité paysagère. Il mesure la diversité induite par chaque unité dans un même paysage. Comme le souligne DELCROS (1993), ce nombre n'est pas adimensionnel, il ne faut pas l'utiliser pour comparer des cartes qui n'ont pas la même échelle. La diversité totale du paysage étudié est obtenue par la somme des indices des unités paysagères.

Cette diversité cumulée n'est donc pas une moyenne et elle ne permet pas de comparer différents écosystèmes entre eux. En revanche, elle permet la comparaison de l'évolution de la diversité d'un paysage à des dates différentes. DELCROS (1993) a montré que l'évolution de la diversité cumulée suit la même trajectoire que celle de la diversité informationnelle (calculée d'après la formule de Shannon) et il en a conclu à la validité de l'indice de Baudry dans les zones de montagne. La valeur absolue de cet indice n'a pas de signification, mais de manière relative, plus le nombre obtenu est élevé, plus la diversité est élevée.

Cependant, dans notre cas, cette formule très séduisante ne s'applique pas et, malheureusement, il n'existe pas à notre connaissance de formule aussi rigoureuse. Même si les valeurs absolues des indices n'ont pas de significations réelles, elles atteignent de très fortes amplitudes (0,2 à 120 !). Cela s'explique par le fait que certaines unités (secteur rhéostasique par exemple) occupent à peu de choses près la moitié de la surface cartographiée. D'après la formule, si les surfaces des unités « secteur rhéostasique » occupaient très exactement la moitié de la surface cartographiée, l'indice tendrait vers une valeur infinie !!! D'où les limites de cet indice. Nous avons tenté l'exercice en travaillant en ares, en hectomètres, en m², sur des moyennes et en éliminant les unités dont la surface était ≤ à 25 m², mais sans résultat correct. Le calcul de cet indice sur une carte à plus petite échelle serait certainement plus pertinent mais la résolution diminuerait.

Par conséquent, nous avons opté pour une autre solution. Si l'on s'en tient à l'analogie faite entre diversité spatiale et diversité spécifique, on peut utiliser la formule d'entropie :

$$D = - \sum_{k=1}^r S_k \log_2 (S_k)$$

C'est la formule de Shannon fondée sur la théorie de l'information, nommée « diversité » de TURNER et RISCHER (1988). Sur un paysage composé de n types d'unités paysagères, S_k étant la proportion de l'unité k dans le paysage. D est maximum si tous les S_k sont égaux et minimal (nul) si un des S_k vaut 1 et tous les autres 0 ($D = 0$).

Afin de diminuer les amplitudes des indices, nous l'avons quelque peu normalisée pour les besoins de notre étude :

$$D = - \sum_{k=1}^r \frac{S_k \ln (S_k)}{\ln N}$$

Où S_k = surface occupée par l'unité paysagère (en m²)

N = nombre total d'unité (de l'écosystème)

L'apport de ces résultats sera d'un intérêt relatif comme nous le verrons dans la partie III (Chapitre 6) mais ils donnent une première appréciation de l'évolution de la diversité des écosystèmes à des dates différentes.

B. La complexité spatiale

« La complexité est une caractéristique de la forme des taches qui composent le paysage, plus les écotones entre les taches sont d'une manière générale sinueux, donc longs, plus le paysage est complexe » (DELCROS, 1993). Elle est très proche du rapport « périmètre/surface ». En écologie, la complexité

mesure la connectivité, c'est-à-dire, la longueur des écotones entre les unités. Elle est mesurée pour chaque polygone individuel composant la mosaïque paysagère. L'indice de complexité que nous avons utilisé est appelé l'indice de forme ou de Patton. Il met en relation le périmètre P du polygone et sa surface S :

$$C = \frac{P}{2 \sqrt{\pi S}}$$

Pour un disque C=1 et pour un carré C=1,13.

La complexité est d'autant plus grande que le contour du polygone est sinueux. La complexité d'un paysage est égale à la moyenne des indices de forme de toutes les taches qui le composent. De même, pour une unité physionomique, sa complexité est égale à la moyenne des indices de forme de toutes les taches appartenant à ce type de physionomie. Pour connaître l'évolution de la complexité entre deux dates, on compare les moyennes. DELCROS (1993) souligne qu'il peut y avoir des biais inhérents à la taille des polygones car inévitablement, pour des raisons graphiques, les petites taches d'une carte ont un contour plus simple, donc une complexité moindre.

3.2.2.2. Cartographie diachronique des types physionomiques

Sept classes de physionomie végétale, communes à tous les écosystèmes, ont été définies quel que soit le pas de temps considéré (siècle ou demi-siècle). Deux groupes principaux de postes de légende ont été retenus (ARQUES *et al.*, 2003 a et b) :

- en dégradés de vert, les formations présentes sur la période la plus ancienne. Par exemple 1911 :
 - piquetage herbacé
 - pelouse
 - prairie
 - lande
 - îlot arbustif sur éboulis
 - îlot arbustif sur formation végétale (herbacée et/ou sous-arbustive). Cet aspect est précisé dans le commentaire.
 - forêt

- en dégradés de violet, les formations développées entre la période la plus ancienne et la plus récente. Par exemple entre 1911 et 2001:
 - piquetage herbacé
 - pelouse
 - prairie
 - lande
 - îlot arbustif sur éboulis
 - îlot arbustif sur formation végétale
 - forêt

Les types physionomiques et dynamiques sont classés en fonction d'un gradient biorhexistasique (piquetage herbacé à formation forestière dense) et selon la nature végétale (formation herbacée ou ligneuse).

Ce diachronisme permet de retracer l'évolution des différents types physiologiques et d'évaluer leur progression moyenne à l'échelle du siècle ou du demi-siècle. Quelles sont les dynamiques ligneuses et/ou herbacées qui s'opèrent à l'échelle des écosystèmes ? Quels types physiologiques ont évolué et dans quelle (s) proportion (s) ? Les valeurs obtenues en termes d'évolution des surfaces, des périmètres occupés ainsi que des vitesses d'évolution sont comparées.

La lecture de ces cartes permet une exploitation visuelle, qualitative et quantitative de l'évolution des mosaïques biorhexistiques d'éboulis, pour chaque écosystème, sur un siècle ou sur environ 50 ans. Elles présentent un historique de la colonisation végétale sur différents versants à éboulis et mettent en évidence des modèles dynamiques à l'échelle des écosystèmes.

Cette analyse diachronique de l'évolution de la structure et de la dynamique végétale est complétée par une cartographie de leur géodynamique actuelle.

3.3. Cartographie géodynamique et physiologique

BIROT (1981), suggérait déjà l'intérêt d'utiliser la photogrammétrie pour évaluer la capacité d'usure d'un versant rocheux en photographiant, à plusieurs décennies d'intervalle, les cicatrices d'une paroi rocheuse se détachant en clair sur un fond sombre de lichens. Nous avons eu l'idée de l'appliquer aux colluvions calcaires. Une photogrammétrie à très grande échelle, 1/1250 environ, a été effectuée sur des photographies obliques actuelles, en couleurs naturelles. Cette cartographie (en noir et blanc) permet d'apprécier conjointement les caractéristiques géodynamiques et physiologiques des écosystèmes.

Basée sur la réponse colorimétrique¹ différente des colluvions calcaires en fonction du mouvement et de la granulométrie – patine grisâtre des blocs stables, couleurs claires des langues à graviers et à fines – elle permet de cartographier la diversité des zones de stabilité du talus d'éboulis (zones stables, pénestables, instables).

En fonction de la colorimétrie du secteur colluvial, du taux de recouvrement de la végétation et du type physiologique dominant, nous avons défini sept postes de légende (ARQUES *et al.*, 2003) :

- zonation géodynamique :

- secteur colluvial à patine grisâtre (recouvrement végétal < à 10%) : gris foncé.
- secteur colluvial non patiné (recouvrement végétal <10%) : gris clair.
- piquetage herbacé sur secteur colluvial (10% < recouvrement végétal < 50%) : motif en pointillés sur trame grise intermédiaire.
- piquetage arbustif sur secteur colluvial (10 % < recouvrement végétal < 50%) : noir.

- zonation physiologique :

- formation herbacée (motif en pointillés sur trame gris clair).
- formation arbustive ou arborée (motif en hachurés sur trame gris clair).
- forêt (motif en hachuré sur trame gris foncé).

¹ Voir principes de la classification supervisée.

Parallèlement à cette cartographie et à partir des photographies obliques anciennes et actuelles des écocomplexes, nous avons réalisé un croquis géomorphologique pour chaque talus d'éboulis afin de recenser les différents types de modelés et leur répartition.

L'analyse de ces cartes permet d'une part, de caractériser l'évolution biorhexistatique des mosaïques paysagères d'éboulis, pour chaque écocomplexe, sur un siècle ou sur environ 50 ans, d'autre part, de proposer une première lecture du fonctionnement géodynamique différentiel des talus et enfin, d'identifier un certain nombre d'unités phyto-morphologiques structurales potentielles.

3.4. La définition des unités phyto-morphologiques

Conformément aux principes de l'écologie du paysage, la lecture spatiale de ces différentes cartes doit se faire sous l'angle d'une dynamique d'éléments paysagers (Chapitre 2, II). Dans le cas présent, cette dynamique est appréhendée par le biais de l'agencement de taches. Chaque tache correspond à une unité phyto-morphologique (ou phyto-morphodynamique) caractérisée par un triptyque « type physiologique/géomorphologie/géodynamique ». Ces taches varient en taille, en forme, en type, en hétérogénéité et en dynamique en fonction de l'écocomplexe considéré (variation inter-écocomplexe) et à l'intérieur d'un même écocomplexe (variation intra-écocomplexe).

C'est, dans un premier temps, au sein de ces unités phyto-morphologiques, visibles à l'échelle des écocomplexes, que nous nous sommes positionnés sur le terrain (Figure 12). Leurs caractéristiques écologiques, géomorphologiques et géodynamiques sont précisées à l'échelle stationnelle.

Caractérisation de la structure et de la dynamique des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis à l'échelle de l'éco-complexe

Les documents

- Cartographie diachronique de l'occupation des sols
- Cartographie diachronique des physionomies végétales
- Cartographie géodynamique et physionomique
- Croquis géomorphologiques

Cartes en couleurs et en noir et blanc élaborées à partir d'un fond topographique IGN au 1/25 000 (détails des éco-complexes) et de photographies obliques et aériennes, anciennes et actuelles, couvrant chaque éco-complexe (Tableau 5, annexe C). MNT pour les altitudes.

Les outils

- Photoshop 7® pour la numérisation du fond topographique et des photographies aériennes.
- Map Info 6® pour la vectorisation des courbes de niveau.
- Vertical Mapper 2.5® pour la conversion des fichiers pour exportation sous Er Mapper 6.0®.
- Er Mapper 6.0® pour l'ortho-rectification et la classification supervisée.
- Map Info 6® pour la cartographie et la gestion de la BD surfaces et périmètres.
- Corel Draw 11® pour le rendu cartographique final.

Les objectifs

- Faire le point sur la charge anthropique.
- Caractérisation de la structure végétale et géomorphologique des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis à l'échelle des éco-complexes. Lecture d'un premier gradient biorhexistasique.
- Etude de l'évolution de la structure des éco-complexes grâce aux calculs des indices de diversité et de complexité spatiales et détermination de la diversité des dynamiques de colonisation en termes de nature, de type et de vitesse.
- Repérer les secteurs qui ont connu une évolution biostasique, hétérostasique ou rhexistasique.
- Mise en évidence d'une zonation géodynamique sur talus d'éboulis (gradient de stabilité).
- Comparaisons inter et intra-éco-complexes.
- Analyser les relations entre la mosaïque végétale et la mosaïque géomorphologique/géodynamique.
- Identifier des unités phyto-morphologiques potentielles à étudier.
- Déterminer des clés d'échantillonnage pour l'approche à l'échelle de la station et de la parcelle.

CHAPITRE 5

Protocoles d'étude et descripteurs utilisés à l'échelle de la station et de la parcelle

Avant propos

« *La station est la plus petite unité du territoire où, à l'échelle du taxon étudié, se trouve réunie une fraction du peuplement. Sa superficie, qu'il n'est pas possible de préciser a priori, est de l'ordre de quelques dizaines d'ares à quelques hectares. Pour des raisons techniques, la station correspond souvent à la prise d'échantillonnage. Sa surface est alors arbitrairement fixée par la méthode de collecte des données (...). La station est plus simplement l'unité homogène définie par des conditions ou facteurs écologiques précis* » (BLONDEL, 1999).

Les approches paysagères ne font que suggérer des phénomènes, elles participent à la définition de clés d'échantillonnage mais ne sont pas suffisantes pour appréhender et expliquer ce qui se passe réellement sur le terrain. Une étude plus fine, réalisée à l'échelle stationnelle (au sens méthodologique), doit nous permettre d'acquérir une meilleure compréhension des caractéristiques et des dynamiques géo-écologiques qui animent ces milieux. Nous travaillons sur des talus d'éboulis semi-végétalisés dont les dynamiques sont régies à la fois par le minéral et le végétal, il devient alors nécessaire de développer une méthodologie qui prend en compte ces deux composantes du milieu de manière statique et dynamique.

« *Le substrat représente à la fois pour les végétaux un support et un milieu nutritif. La particularité des éboulis réside dans la mobilité plus ou moins grande que peut présenter le support* » (SOMSON, 1983). Le talus d'éboulis est une construction polygénique. Ce caractère polygénique est encore renforcé lorsque, dans la dynamique de surface, intervient la colonisation végétale.

L'objectif des paragraphes qui suivent, est de préciser les caractéristiques géomorphologiques, morphodynamiques et écologiques des cinq talus d'éboulis retenus en s'intéressant particulièrement à la structure et à la dynamique des unités phyto-morphologiques biorhexistatiques qui les constituent. **L'étude des paramètres écologiques** a été réalisée pour chaque talus d'éboulis. En revanche, celle consacrée aux **paramètres géomorphologiques et morphodynamiques** ne concerne que deux talus d'éboulis, choisis en fonction d'un certain nombre de paramètres environnementaux .

- La prise en compte des changements environnementaux :

- l'anthropisation actuelle : la Chartreuse, de par sa proximité à l'agglomération Grenobloise, est un massif très fréquenté. De nombreux sentiers sillonnent les talus d'éboulis et permettent d'accéder aux sommets. Ils sont régulièrement piétinés ce qui influence grandement leur morphométrie et leur géodynamique. Les travaux de POULIN (1994) consacrés, en partie, à l'anthropisation du talus d'éboulis occidental de Chamechaude illustrent bien ce type d'impact anthropique. Dans une étude précédente, nous avons aussi abordé cet aspect (ARQUES, 1999). Le phénomène est identique au Grand Som où nous avons tenté de cerner la géodynamique de surface en utilisant la méthode des pierres peintes. Le piétinement modifie la géodynamique

naturelle des matériaux et la plupart des marqueurs peints a été transformée en cairns par les randonneurs. Dans ces conditions, notre choix s'est porté sur des talus d'éboulis moins anthropisés. Nous verrons plus loin que l'anthropisation passée et actuelle est un facteur discriminant. La colonisation végétale différentielle observée entre les écocomplexes est en grande partie expliquée par cette pression anthropique, elle-même différentielle;

- Le changement climatique : le changement climatique est aussi un facteur discriminant. Ainsi, les talus d'éboulis les moins anthropisés par le passé et dont la géodynamique actuelle n'est pas influencée par le piétinement, sont ceux dont la dynamique végétale a été la plus rapide depuis une trentaine d'années. Celle-ci a pu être favorisée par le réchauffement climatique. Il convenait donc de choisir ceux qui étaient les plus susceptibles d'illustrer ce phénomène;

- Le lieu : les talus d'éboulis constituent des habitats particuliers qui ont une valeur écologique en terme de biodiversité. Certains sont englobés dans le Parc Naturel Régional de Chartreuse (Grand Som, Grande Sure) et d'autres au sein de la Réserve Naturelle des Hauts (La Plagne, les « Pelloux » et l'Aulp du Seuil). C'est principalement sur les talus d'éboulis appartenant à la RN des Hauts que la dynamique végétale est la plus rapide depuis la fin du siècle dernier. Si cette évolution se poursuit, un statut de protection stricte pourrait, à terme, devenir inutile. Il importe donc d'informer le gestionnaire à ce sujet;

- La forme : la structure et le fonctionnement géodynamique diffèrent en fonction de la forme rencontrée. Nous avons donc choisi un tablier et un cône d'éboulis;

- Les contraintes liées aux protocoles d'étude : l'étude des paramètres écologiques est assez conséquente. D'autre part, en raison des contraintes liées aux protocoles de suivi de la géodynamique de surface nous ne pouvions multiplier les sites d'observation.

A l'issue de cette étape préliminaire, deux talus d'éboulis ont été choisis pour étudier la morphométrie et la morphodynamique de surface : le tablier d'éboulis de La Plagne et le cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil. Les cinq talus d'éboulis ont fait l'objet d'une étude écologique (Carte 5).

Comme nos prédécesseurs, nous considérons le couple corniche/talus d'éboulis comme un géosystème dont les éléments, interdépendants, nécessitent une étude simultanée (STATHAM, 1976; FRANCOU, 1988; ROVERA, 1990). La dynamique externe (de chute) du géosystème étant liée aux apports de la corniche et la dynamique interne aux remaniements que subit le dépôt (FRANCOU, 1988). Dans le cadre de ce travail, réalisé sur une courte période, nous n'avons pas pu aborder tous les aspects morphodynamiques du géosystème et notamment ceux liés à l'éboulisation des corniches urgoniennes. Les relations « climat-végétation-sols-processus morphogéniques » ont été appréhendées là où la végétation pouvait avoir un rôle important c'est-à-dire sur les talus d'éboulis. Nous nous sommes donc plus particulièrement intéressés à la dynamique interne (FRANCOU, 1988) ou de remaniement (FRANCOU et HETU, 1989) de ces derniers, liée à la morphodynamique de surface, conjointement influencée par l'action du minéral et du végétal.

I. Morphométrie, géodynamique de surface et suivi morphoclimatique

L'objectif de ce paragraphe est de présenter la méthodologie mise en œuvre pour cerner les caractéristiques morphométriques, topographiques, morphodynamiques et morphoclimatiques des écocomplexes de La Plagne et de l'Aulp du Seuil.

1.1. Etude topo-sédimentologique des talus d'éboulis

Comme le souligne FRANCOU (1991), il existe un grand nombre de mesures permettant d'appréhender le fonctionnement des talus d'éboulis. Des relevés granulométriques systématiques, incluant parfois l'analyse des fabriques, ont été réalisés par DAVEAU (1958), HAMELIN (1958), GRIFFITHS (1959), RAPP (1960c), CAINE (1968, 1969b), GARDNER (1972), STATHAM (1973, 1976a), CHURCH *et al.* (1979), HETU (1986), PEREZ (1986, 1989, 1998), FRANCOU (1988, 1991), FRANCOU et MANTE (1990), WILSON (1990), PECH (1991), PEREZ (1998). L'analyse des pentes le long de profils longitudinaux a été moins pratiquée (RAPP, 1960b; STATHAM, 1976a; CHURCH *et al.*, 1979; FRANCOU, 1988, 1991; FRANCOU et MANTE, 1990) et seul WILSON (1990) a abordé la variation transversale. La caractérisation de la structure topo-sédimentologique des talus d'éboulis de La Plagne et de l'Aulp du Seuil repose sur des mesures de pente et de granulométrie réalisées le long de transects² (SOUTADE, 1980; FRANCOU, 1981, 1988), longitudinaux et transversaux, qui traversent les unités cartographiées. La méthodologie utilisée est identique dans les deux cas. Nous avons sillonné les deux talus d'éboulis longitudinalement et transversalement en notant régulièrement les variations de pente, de granulométrie et les types physiologiques traversés.

1.1.1. Les mesures de pente

1.1.1.1. Les profils en long

Le point de départ des profils en long est situé à la base des talus (A, B, C) et le point d'arrivée au niveau de l'apex (A', B', C') au contact de la corniche (Figures 15 et 16).

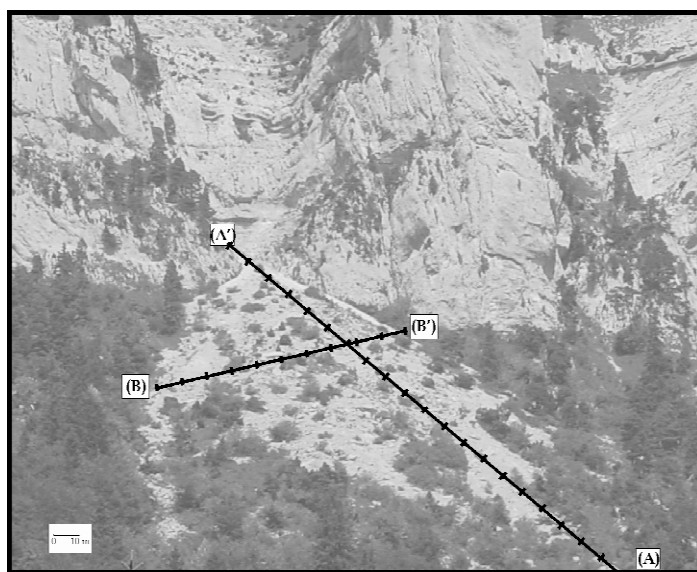


Figure 15 : Localisation des profils longitudinal et transversal (cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil)

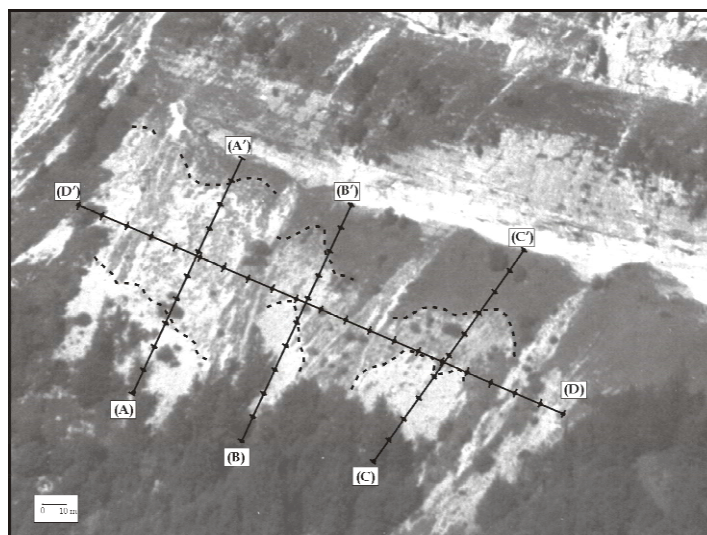
² « C'est la seule méthode capable de mettre en évidence, le long de certains axes, des filiations entre tels et tels phénomènes » (SOUTADE, 1980). Notamment lorsque l'on aborde conjointement la végétation et son modelé support.

Le long de ces profils, des mesures de pente ont été effectuées selon un pas régulier par section de 10 m. Nous avons utilisé deux mires (bâtons de ski), espacées de dix mètres l'une de l'autre le long d'une droite reliant les points A et A' et suivie au GPS. Cet espacement a été scrupuleusement respecté grâce à l'utilisation d'un décimètre à ruban reliant les mires entre elles. Les mesures de pente ont été réalisées à l'aide d'un clinomètre SHUNTO vissé sur une des deux mires (précision de 0,5°). L'altitude et les coordonnées de chacun des points de mesure ont été enregistrées au GPS.

Un profil en long a été réalisé sur le cône de l'Aulp du Seuil (Figure 15) et trois profils longitudinaux ont été effectués sur le tablier de La Plagne (Figure 16). Ce nombre s'explique par la nécessité de cerner le découpage tripartite des zones apicales du tablier souligné par différents degrés de végétalisation.

Figure 16 : Localisation des profils longitudinaux et transversal (tablier d'éboulis de La Plagne)

Zone médiale



1.1.1.2. Les profils transversaux

La méthodologie est identique à celle présentée précédemment. Un profil transversal a été effectué sur le tablier d'éboulis de La Plagne. Il traverse le dépôt le long d'un axe médian, à altitude fixe, et matérialise la zone médiale hétérostasique située entre la zone apico-proximale biostasique et la zone distale plutôt rhexistasique (Figure 16). Un profil latéral a aussi été réalisé sur le cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil (zone médiale) où la microtopographie diffère, de celle du tablier, à cause de sa forme (Figure 15). Le choix de la localisation de ces profils (B- B' pour le cône (Figure 15) et D-D' pour le tablier (Figure 16)) est simplement lié au fait qu'ils traversent un certain nombre de micro-modèles (langues végétalisées à matériaux fins, petits couloirs stables à matériaux moyens, chenaux à matériaux mobiles, bombement central à gros blocs...) qu'il n'est possible d'appréhender que de manière transversale à travers des mesures effectuées au sein de la zone médiale.

1.1.2. Morphométrie

Le long des profils longitudinaux et transversaux nous avons réalisé, tous les 10 mètres, une analyse granulométrique de surface sur des parcelles-témoins préalablement recouvertes par une grille de 1 m² présentant un maillage de 10x10 cm (Figure 17). La morphométrie des particules est analysée à l'aide d'une technique photographique. Cette méthode est largement utilisée depuis une trentaine d'années (STOCK, 1968 *in* PEREZ, 1989; CAINE, 1969b; CARNIEL et SCHEIDEGGER, 1974; CHURCH et al. 1979; PEREZ, 1986, 1989, 1998). CAINE (1969 b) et PEREZ (1989) soulignent que la comparaison des résultats de cette technique avec ceux obtenus par la méthode traditionnelle de mesure des particules *in situ* a montré qu'il n'y avait pas de différences significatives entre les deux. Nous avons veillé à ce que l'axe de prise de vue soit le moins oblique

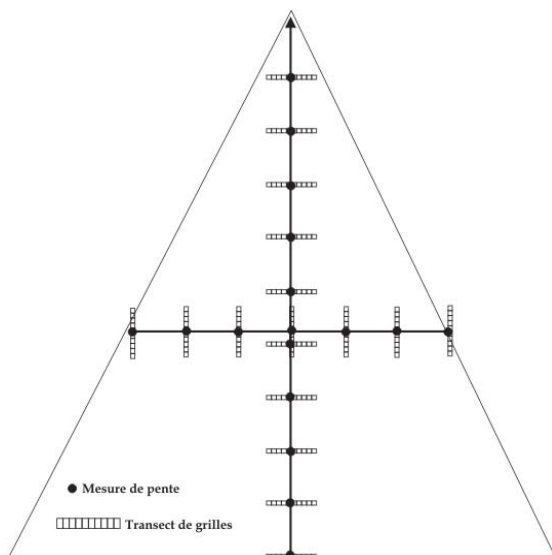
possible pour éviter les distorsions angulaires induites par la parallaxe. Les photographies ont toujours été prises en amont des surfaces témoins avec un appareil numérique à objectif pivotant ce qui permet de réaliser une prise de vue bien à l'aplomb (Sony Cyber-Shot DSC-F505V). Le redressement des photographies (quelques distorsions subsistent toujours) a été réalisé sous ER Mapper 6.0 ® et la calibration ainsi que les mesures des particules ont été réalisées à l'aide du logiciel SigmaScan Pro 5 ®. Nous avons volontairement négligé l'étude des fabriques. Son interprétation est complexe sur dépôts non végétalisés et elle nous est apparue encore plus complexe ici, en raison de la forte présence végétale sur les deux talus d'éboulis échantillonnés.



Figure 17 : Grille (placette) de 100x100 cm surimposée à la surface du talus (Aulp du Seuil, zone distale).

Tous les 10 mètres, nous avons réalisé des photographies de 10 placettes (grilles) disposées le long de transects perpendiculaires à la pente pour les profils longitudinaux et parallèles à la pente pour les profils transversaux (Figure 18).

Figure 18 : Profil longitudinal et transversal (mesures de pente et de granulométrie)



Le nombre moyen de photographies oscille entre 100 à 200 par profil. Nous n'avons mesuré que l'axe visible des particules à partir des photographies, c'est-à-dire l'axe *a* (plus grande longueur *L*). L'échantillon étant largement suffisant, nous avons décidé de réduire le nombre de mesures à 5

placettes sur 10. Dans chaque placette, entre 20 et 25 longueurs intersectées ont été mesurées. Nous avons choisi de regrouper les mesures à l'intérieur des cinq classes granulométriques suivantes :

- gros blocs : $L > 50$ cm
 - blocs moyens $25 < L \leq 50$ cm
 - petits blocs $10 < L \leq 25$ cm
 - gros cailloux $5 < L \leq 10$ cm
 - petits cailloux $2 < L \leq 5$ cm
 - graviers et terre fine (sables, limons) $L \leq 20$ mm
- } Petits éléments

Ce découpage est en général celui retenu pour ce type d'étude.

Ces mesures donnent lieu à la réalisation de différentes figures qui permettent de caractériser le fonctionnement épidermique, longitudinal et transversal, des deux talus d'éboulis. On s'attachera plus particulièrement à confirmer ou infirmer l'existence d'un modèle de fonctionnement « biphasé » (FRANCOU, 1988), « triphasé » (ROVERA, 1990) ou polyphasé.

1.2. Géodynamique de surface

Le déplacement des fragments sur éboulis a fait l'objet de mesures spécifiques, au premier rang desquelles figurent celles de MICHAUD (1950), RAPP (1960b), CAINE (1963), PISSART (1964, 1972, 1981), GARDNER (1969, 1979), PANCZA (1979), PEREZ (1985, 1987, 1988, 1993) et HETU (1986). Les méthodes utilisées sont similaires et les mouvements des fragments sont appréhendés par l'intermédiaire de pierres peintes alignées sur des axes perpendiculaires à la pente du versant. Dans les zones à gros blocs, des piquets en bois ou en pvc sont plantés dans le sol. Seul PEREZ (1994) s'est intéressé à l'influence des mouvements de matériaux sur la distribution végétale (herbacée).

Notre approche est différente, le suivi qualitatif et quantitatif de la géodynamique de surface est réalisé selon la méthode des surfaces peintes (carrés ou bandes) (SCHOUMM, 1967; POULIN, 1994; PECH, 1995b; ROBERT, 1997; TURC, 1998; COMBE, 2002, ARQUES *et al.*, 2003, ROVERA *et al.*, 2003). Les relations entre la végétation et son modelé support en terme de géodynamique de surface sont appréhendées dans les deux sens.

1.2.1. Choix de la méthode et échantillonnage

Nous travaillons sur des talus d'éboulis semi-végétalisés où la dynamique du substrat est probablement révélatrice de l'intervention des végétaux (ou de la tendance biostatique) et inversement. A partir d'un certain gradient biorhexistatique, la variabilité spatiale des mouvements géodynamiques de surface et des modalités de freinage géodynamique est supposée être induite par la présence de l'artefact végétal qui exerce une influence différente en fonction de la forme rencontrée et du type de végétal incriminé (herbacé ou ligneux). Le choix de la méthode des surfaces peintes répond à une double nécessité : a) cerner une dynamique de taches et b) caractériser les modalités du freinage géodynamique induit par la présence des végétaux.

A partir de l'approche paysagère précédente, nous avons réalisé un découpage en unités physiologiques, géomorphologiques et géodynamiques. A l'échelle de la station, nous avons pu compléter ce découpage par une étude topo-sédimentologique permettant d'affiner la zonation longitudinale et latérale des talus d'éboulis. Comme nous l'avons souligné précédemment (Chapitre 4, II, 2.4) notre approche s'inscrit dans une dynamique de taches (unités phyto-

morphologiques à évolution différente) dont il convient de cerner la diversité, la complexité et les modalités de fonctionnement pour chaque talus d'éboulis. La technique des surfaces peintes est adaptée à un fonctionnement en taches où chacune a un fonctionnement individuel. L'objectif est de caractériser la géodynamique de surface de chaque unité en termes de structure (pente, granulométrie) et de mouvements de matériaux. L'agglomération finale des résultats permet de cerner un fonctionnement à l'échelle du talus d'éboulis, puis de l'écocomplexe.

Le choix des emplacements pour le marquage est donc orienté par :

- la diversité des physionomies végétales et géomorphologiques (unités phytomorphologiques);
- leur évolution depuis un demi-siècle ou un siècle en terme de colonisation végétale différentielle (colonisation rapide, moyenne, lente);
- un gradient de stabilité actuel (zones supposées stables, pénestables ou instables);

Au sein des unités sélectionnées (taches ou unités phyto-morphodynamiques), des parcelles sont équipées et suivies afin de calculer des vitesses de déplacements des fragments en fonction d'un gradient biorhexistatique déterminé à l'échelle des écocomplexes par le diachronisme (Chapitre 4, 3.2, 3.3), d'un gradient biorhexistatique stationnel (densité végétale) et de la microtopographie.

La confrontation des résultats obtenus devrait permettre de dresser pour chaque talus d'éboulis, une typologie phytomorphodynamique. Rappelons qu'il s'agit aussi de vérifier si la morphodynamique mesurée est conforme à la colonisation végétale observée en terme de vitesses de colonisation. Les unités qui enregistrent une colonisation végétale rapide au cours du siècle dernier sont-elles celles qui se caractérisent actuellement par une géodynamique de surface peu active ? Et inversement ? Cela devrait nous permettre d'élaborer des scénarios d'évolution. Enfin, nous supposons que cette complexité est favorable à la biodiversité.

1.2.2. Critères de positionnement et caractéristiques des marquages

1.2.2.1. Critères de positionnement des marquages

Les critères définis sont identiques pour les deux talus d'éboulis. Le positionnement des marquages repose sur la volonté de cerner une diversité de situations liée à la microtopographie, la granulométrie (textures) et la densité végétale. Trois principaux types ont été réalisés :

- les marquages en biostasie : ce sont des carrés peints de 10x10 cm localisés dans des secteurs à couverture végétale très dense (> 75 % de recouvrement végétal) et caractérisés par une matrice granulométrique constituée de fines (\leq à 20 mm).
- les marquages en hétérostasie : nous avons utilisé des bandes peintes dont la taille varie (70x10, 40x10, 30x10 ou 20x10) en fonction :
 - de la granulométrie de surface<: secteurs à matrice colluviale graveleuse (2 à 5 cm) ou constituée de fragments plus grossiers (5 à 20 cm). Cela permet de voir dans quelle mesure la granulométrie peut influencer sur le déplacement des matériaux.
 - de la densité végétale : dans l'optique de mesurer le freinage induit par la présence végétale, nous avons fait varier les taux de recouvrement de la végétation (10 à 75 %) ainsi

que la taille (herbacé, ligneux bas, ligneux haut) et le nombre d'individu (s) présent (s) (une à plusieurs touffes d'herbacées jusqu'à l'îlot arbustif).

- les marquages « référentiels » en rhexistasie : certaines bandes peintes, réalisées en rhexistasie, constituent ce que nous avons appelé des « référentiels », c'est-à-dire des marquages dont la dynamique est supposée ne pas être influencée par la présence du végétal. En fonction de la microtopographie (couloirs étroits à matériaux fins, plages colluviales à matériaux grossiers...), leur taille varie entre 70x10 cm et 20x10 cm.

Le positionnement des marquages selon un gradient biorhexistasique permettra aussi d'étudier le fonctionnement de quelques écotones représentatifs. Les talus d'éboulis ont été « balayés » transversalement et longitudinalement.

1.2.2.2. Caractéristiques des marquages

Les marquages ont été réalisés à l'aide d'un pochoir en plexiglas souple de 70x10 cm gradué tous les 10 cm. Ils ont été positionnés perpendiculairement à la pente du talus d'éboulis. Nous avons utilisé des bombes de peintures acryliques, non solubles à l'eau, sans plomb et à traçage longue durée (type traceur forestier, 2 à 4 ans). Quelques précautions ont été prises afin de limiter les erreurs de mesure. Nous avons veillé à :

- effectuer les marquages uniquement sur substrat sec pour s'assurer de la bonne adhésion de la peinture;
- peindre uniquement la partie superficielle à une distance variable en fonction de la granulométrie. Le souffle de la bombe peut provoquer une expulsion ou un déplacement des matériaux;
- ne pas surcharger le carré ou la bande de peinture pour éviter la cohésion des matériaux entre eux;
- alterner correctement la couleur des marquages dans les cas de successions longitudinales sur les talus.

Les premiers marquages ($t = 0$) ont été réalisés en rouge et en jaune. Les couleurs ont été ensuite inversées ou changées (vert ou bleu) lorsque les surfaces des bandes et des carrés étaient déstructurées à plus de 50 %.

Chaque marquage est codifié en fonction de sa localisation sur le talus (couloir, zone apico-proximale, zone médiale, zone distale), son type (bande ou carré), sa couleur et son numéro (1 à n). Nous avons également consigné, pour chacun d'entre eux, dans une fiche de relevé, ses coordonnées GPS, sa taille, sa pente, sa granulométrie, le type de marquage concerné (1.2.2.1.) ainsi que les résultats successifs des déstructurations et des vitesses de déplacements des matériaux (Annexe E³). Une cartographie de localisation couplée aux unités phyto-morphologiques est présentée dans la partie consacrée aux résultats.

53 marquages ont été réalisés sur le tablier de La Plagne, soit une surface totale couverte de 28,80 m², et 31 sur le cône de l'Aulp du Seuil (15,7 m²). Cette différence s'explique d'une part, par le fait

³ Les clichés concernant les états successifs des marquages sont disponibles auprès de l'auteur. Trop nombreux ils ne peuvent être insérés en annexe mais quelques cas particuliers seront présentés dans la troisième partie de ce travail.

que la surface du tablier de La Plagne est plus vaste longitudinalement et transversalement et, d'autre part, car les unités phyto-morphologiques sont plus nombreuses. Le positionnement des marquages a été effectué au mois de novembre 2001 et le suivi géodynamique s'est terminé au printemps 2004. Il a été réalisé selon un pas de temps saisonnier (printemps, été et automne).

1.2.3. Méthodes de suivi et de quantification

Deux méthodes ont été utilisées pour apprécier la quantité de fragments déplacés ou enlevés.

1.2.3.1. Suivi de la déstructuration des marquages : appréciation qualitative et quantitative

La méthode consiste à réaliser une étude diachronique des marquages à l'aide de photographies prises à des périodes différentes. Nous avons opté pour un pas de temps saisonnier. Ces photographies d'états successifs des carrés peints ou des bandes peintes permettent une analyse qualitative et quantitative des changements qui se sont opérés. La technique de prise de vue est identique à celle utilisée pour la grille (1.1.2.). Le traitement des photographies, c'est-à-dire l'ortho-rectification, la classification supervisée et la cartographie diachronique, repose sur les mêmes principes que ceux présentés dans le Chapitre 4. Cependant, quelques particularités demeurent et nous allons détailler la technique utilisée.

A. Ortho-rectification des photographies

Le géoréférencement (polynomial) et l'ortho-rectification des photographies sont réalisés sous ER Mapper 6.0[®]. Quatre points de calage (points d'amers) correspondant aux quatre angles du carré peint ou de la bande peinte sont géoréférencés dans un repère orthonormé⁴ (Figure 19, A). La transformation des photographies d'origine en ortho-images est réalisée à l'aide de la fonction « Ortho and Geocoding Wizard ». Ce traitement permet la superposition des clichés successifs, chaque pixel étant parfaitement localisé dans le repère orthonormé (Figure 19, A).

B. Photogrammétrie des ortho-images

Sur les photographies redressées, les déstructurations des marquages sont ensuite étudiées au moyen d'une classification supervisée réalisée sous ER Mapper 6.0[®]. Le traitement informatique est identique à celui utilisé pour les cartographies réalisées à l'échelle des écosystèmes (Chapitre 4). La procédure consiste à choisir des parcelles d'entraînement ou d'apprentissage correspondant à des régions homogènes (plages de couleurs homogènes) que nous délimitons par des polygones, des rectangles ou des carrés sur la photographie (Figure 19, B).

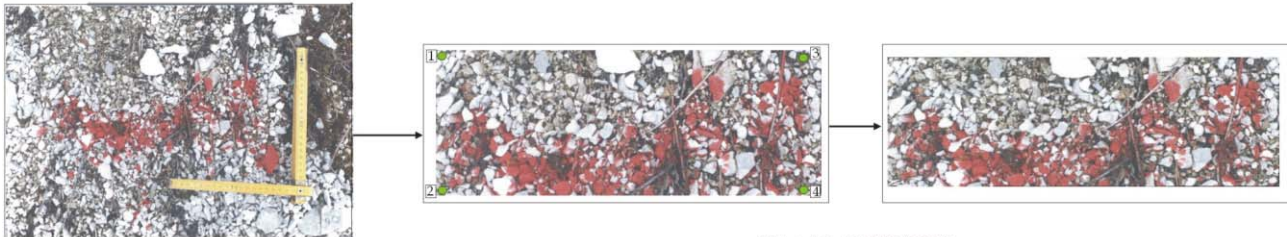
Ici, ces régions correspondent à des particules peintes en rouge et à des éléments non peints. Les caractéristiques spectrales de ces régions sont ensuite utilisées par le logiciel pour réaliser la classification. Les pixels se trouvant à l'intérieur ou à l'extérieur des parcelles d'entraînement sont ensuite affectés à des classes déterminées : fragments peints ou zone non peinte. Une fois les régions validées, nous pouvons lancer la classification supervisée. Nous avons choisi l'algorithme qui correspond au maximum de vraisemblance (maximum likelihood) sous hypothèse gaussienne (Chapitre 4). La classification isole les particules peintes et les éléments non peints et leur affecte une couleur correspondant à la classe choisie (Figure 19, C). Le logiciel calcule également la surface occupée par chacune des classes en hectares (area summary report) que nous transformons ensuite en cm² puis en pourcentages.

⁴ Nous avons utilisé la même méthodologie pour redresser les clichés des grilles (Figure 16).

Figure 19 : Chaîne de traitement des marquages. De l'ortho-rectification à la classification supervisée



Etat t0 : 19/11/2001

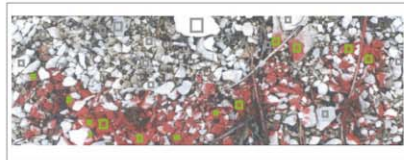


Etat t1 : 21/03/2002

Point d'amer	Coordonnée X	Coordonnée Y
1	0	0
2	0	10
3	30	0
4	30	10

A) Procédure de géoréférencement et correction géométrique des prises de vue successives

Tablier d'éboulis de La Plagne : Z1BR7, bande 30x10



B) Localisation des parcelles d'entraînement

En vert : fragments peints
En gris : zones non peintes



C) Résultats de la classification supervisée

En vert : fragments peints
En gris : zones non peintes
En rouge : bande peinte d'origine (t0)

Le pourcentage de déstructuration d'un marquage peint (t1...tn) par rapport à l'origine t0 (déstructuration nulle) est calculé par le rapport suivant :

$$\text{Pourcentage de déstructuration} = \frac{\text{Surface de la zone non peinte}}{\text{Surface totale du marquage}} \times 100$$

Pour connaître la valeur non déstructurée ou ayant connu un déplacement très limité (toujours par rapport à l'origine t0), le rapport est le suivant :

$$\text{Pourcentage non déstructuré} = \frac{\text{Surface des fragments peints (t1...tn)}}{\text{Surface totale du marquage}} \times 100$$

Dans l'exemple utilisé (Figure 19), le marquage t0 (Z1BR7) couvre une surface de 300 cm² (bande 30x10) pour une déstructuration nulle. La déstructuration de la bande est de 80% à t1.

	t1
Surface des fragments peints (cm²)	60
Surface de la zone non peinte (cm²)	240
Surface totale (cm²)	300
Déstructuration (%)	80%
% non déstructuré	20%

Pour déterminer les pourcentages de déstructuration entre deux dates différentes, par exemple t1 et t2, il convient de soustraire les valeurs obtenues.

La deuxième méthode, complémentaire de celle que nous venons de présenter, permet de quantifier la vitesse d'ablation des marquages peints et les vitesses de déplacement de fragments.

1.2.3.2. Quantification des vitesses de déplacement des fragments

Il s'agit de repérer sur le terrain, pour chaque marquage, les éléments qui se sont le plus déplacés. C'est ce que TURC (1998) appelle « la méthode des éléments les plus éloignés ». Nous avons ainsi une lecture directe du déplacement qu'il nous suffit de rapporter à la durée au cours de laquelle ce déplacement a eu lieu. PECH (1995 b) propose la mesure des plus gros blocs déplacés.

Pour chacun des marquages, nous avons mesuré les distances parcourues pour les cinq fragments les plus éloignés (en cm). Le pas de temps est saisonnier et/ou annuel (Annexe E).

Ces mesures donnent lieu à la production de divers documents graphiques et cartographiques présentés dans la partie consacrée aux résultats. Nous proposons notamment divers traitements statistiques (AFC, CAH) et mathématiques permettant d'établir des corrélations avec les données microclimatiques et la dynamique végétale.

1.2.4. Le cas particulier du suivi topomicrométrique

A l'échelle de la placette, le suivi et la quantification de la géodynamique *in situ* reposent aussi sur l'utilisation d'un *topomicromètre laser photographique*® (COMBE, 2002; ARQUES *et al.*, 2003a; CORONA *et al.*, 2003; ROBERT *et al.*, 2003). Il s'agit d'un dispositif d'acquisition de mesures de terrain d'une grande précision, développé et breveté par C. CORONA, G. ROVERA et Y. ROBERT en 2001. Il permet la modélisation tridimensionnelle et le suivi *in situ* de l'évolution de la microtopographie de placettes de dimension métrique d'une surface de 0,5 m².

Actuellement, cet appareil est utilisé sur trois sites expérimentaux des Alpes françaises :

- le site des bassins expérimentaux de Draix (Alpes de Haute Provence), afin de mesurer et de modéliser finement les processus d'érosion sur les versants d'une ravine élémentaire (thèse Y. ROBERT, en cours);

- la Combe du Lavoir (Mizoën, Haute Normandie), modélisation de l'évolution des systèmes phyto-morphogéniques dans des secteurs en voie de colonisation végétale sur versants schisteux régularisés (thèse C. CORONA, en cours);

- le tablier d'éboulis de la Plagne (massif de la Chartreuse) dans l'optique de modéliser l'évolution d'écotones biorhexistatiques en déplacement rapide depuis le début du siècle (S. ARQUES).

Nous renvoyons au mémoire de Maîtrise de COMBE (2002) pour une description très précise de l'appareillage (fonctionnement, critiques de l'appareillage...)

1.2.4.1. Description sommaire

Le dispositif (Figure 20 A) est constitué d'un cadre tubulaire rigide (1,50x0,75m), positionné sur le terrain au moyen de tiges filetées ancrées ou scellées dans le sol (Figure 20 B). La multiplicité des sites de mesure, la localisation dans des zones protégées parfois très fréquentées et le coût de l'appareil imposent un instrument facilement démontable mais qui puisse être positionné à l'identique lors de chaque série de mesures. Les ancrages fixes (tire-fond et chevilles à expansion) précisément localisés permettent un (re)positionnement transversal, longitudinal et altitudinal très précis (Figure 20 C).

Le cadre tubulaire constitue un plan de référence pour les hauteurs mesurées. Il supporte une poutre mobile selon l'axe des ordonnées. Sur cette poutre, un profilé aluminium vertical peut être déplacé sur l'axe des abscisses et sur l'axe des hauteurs grâce à des guides à billes sur lequel coulissent des patins. Des vis à billes permettent une indexation centimétrique. Un réglet sur le cadre permet un positionnement millimétrique. L'ensemble des déplacements s'effectue selon un pas centimétrique ce qui permet la réalisation d'un maximum de 5000 points de mesure sur une placette. La zone de mesure est un rectangle de 100x50 cm, le pas de mesure peut être ajusté au type de surface ou au processus étudié.

Une tête laser (capteur du type Matsushita, LM10) fixée sur le tube vertical effectue les mesures de la distance au sol (sans contact, précision théorique au micron). La mesure est réalisée au moyen d'un spot lumineux de 0,09x0,05 mm (Figure 20 D). Elle est reliée à un micro-ordinateur portable qui enregistre, par impulsion au clavier, les données obtenues (Figure 20 B). Le traitement informatique de ces données permet l'obtention en temps réel d'un modèle numérique de terrain de la placette suivie.

Un appareil photographique de type chambre de prise de vue de grand format peut également être installé au niveau du tube vertical et déplacé selon l'axe des abscisses et des ordonnées. Les clichés successifs, réalisés avec des taux de recouvrement adaptés et pris deux à deux, constituent des couples stéréoscopiques. Ces couples, traités au moyen de logiciels stéréophotogrammétriques, permettent la génération de MNT de la surface étudiée.

L'utilisation du topomicromètre permet d'étudier les processus d'érosion avec une bonne précision. En contrepartie, cela demande des moyens financiers importants mais surtout humains pour l'installation et le suivi de l'érosion puisqu'il faut la présence de deux opérateurs lors de relevés longs et fréquents.

1.2.4.2. Le suivi topomicrométrique

Nous avons utilisé le banc topomicrométrique dans l'optique d'une part, de modéliser l'évolution d'un écotone biorhexistasique en déplacement rapide depuis le début du siècle et, d'autre part, de caractériser le freinage géodynamique induit par la présence végétale.

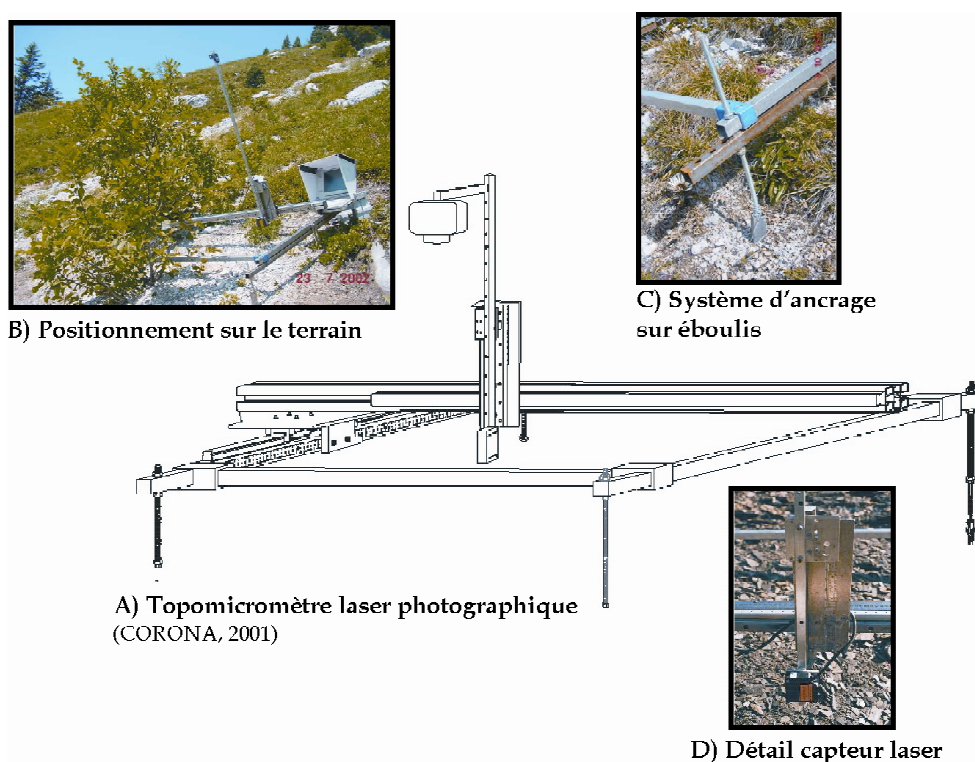


Figure 20 : Le topomicromètre laser photographique ®

Quatre parcelles topomicrométrées ont été installées en zone apico-proximale du tablier sur matériaux fins ($20 \text{ mm} \leq L \leq 10 \text{ cm}$). Les sites d'installation ont été choisis en fonction du même gradient stationnel que celui utilisé pour le suivi géodynamique de surface par marquages peints. Il repose sur trois paramètres fondamentaux : la microtopographie, la granulométrie et la densité végétale (taux de recouvrement). Le détail des pas de mesure et des points de calage est disponible dans l'Annexe F. La localisation de l'équipement stationnel est présentée dans la Figure 21.

• **La parcelle topomicrométrée T1** (Photo figure 20, Figure 21) : est la seule à ne pas se situer au sein de la transition biorhexistasique. Elle a été installée dans l'optique de cerner le freinage géodynamique induit par la présence d'un ligneux bas, à port en crosse, d'environ 1 m (*Rhamnus alpina* L.). Elle est située dans une zone dont le piquetage herbacé (*Valeriana montana*, *Poa cenisia*) a fortement évolué entre 1978 et 2001 (Figure 21). La granulométrie est constituée de matériaux fins

($20 \text{ mm} \leq L \leq 5 \text{ cm}$) et le taux de recouvrement de la parcelle est inférieur à 10% (rhexistasie). La pente moyenne est de 27° .

- **La parcelle topomicrométrée T2** : a été mise en place dans la portion rhexistasique de l'écotone. Elle est caractérisée par la présence de *Centranthus angustifolius* dont le taux de recouvrement est inférieur à 10%. La granulométrie de surface est plus grossière ($5 \text{ cm} \leq L \leq 10 \text{ cm}$). La pente moyenne de la parcelle est de 15° .

- **La parcelle topomicrométrée T3** : a été installée dans la portion hétérostasique de l'écotone. La végétation est plus dense, le taux de recouvrement avoisine les 30%. Il s'agit d'une parcelle à banquettes principalement colonisées par *Thymus praecox*, *Carex sempervirens* et *Valeriana montana*. La plage colluviale est constituée de fines ($20 \text{ mm} \leq L \leq 3 \text{ cm}$) mais est parsemée de fragments plus grossiers $\leq 10 \text{ cm}$. La pente moyenne est de 10° .

- **La parcelle topomicrométrée T4** : est située en biostasie au sein d'une pelouse à *Carex sempervirens* et *Sesleria varia*. Le taux de recouvrement de la végétation est supérieur à 75% et la granulométrie de surface est constituée de fines ($\leq 20 \text{ mm}$). La pente moyenne de la parcelle avoisine les 10° .

Les quatre parcelles ont fait l'objet d'un suivi entre le 23/07/2002 et le 25/04/2003. En raison de la difficulté d'accès au site, du poids du matériel et de la lourdeur des manipulations, seulement trois campagnes de mesures ont été réalisées. La première série, effectuée le 23/07/2002, permet de définir l'état originel de la placette topomicrométrée. Les bilans, les mesures d'ablation et d'accumulation sont ensuite déterminés par rapport à cet état initial. La deuxième série de mesures a été réalisée le 07/10/02 et permet de cerner l'effet des précipitations automnales sur le déplacement des matériaux. Enfin, la dernière série de mesures s'est déroulée le 25/04/2003, après une fonte complète du manteau neigeux. Elle permet de caractériser l'effet morphogénique du manteau neigeux. Les résultats sont présentés dans la troisième partie de ce mémoire (Chapitre 8, III).

Parallèlement à ces mesures, nous avons installé une station météorologique qui permet de caractériser les conditions climatiques qui règnent dans cette tranche d'altitude. Les données collectées sont ainsi mises en relation avec les processus morphodynamiques mesurés dans l'optique d'établir des chroniques révélant l'ampleur et la rythmicité morphoclimatiques saisonnières et annuelles de l'érosion. Cette mise en relation des mesures morphodynamiques et microclimatiques devrait permettre l'élaboration de scénarios d'évolution à l'échelle de la parcelle et sur un pas de temps court, extrapolés avec toutes les réserves nécessaires à l'échelle des écosystèmes et sur une période plus longue.

1.3. Le suivi microclimatique

Les données microclimatiques que nous avons utilisées proviennent d'une station automatique installée sur le tablier d'éboulis de La Plagne. En raison de l'acquisition tardive de l'appareillage (juillet 2002) et de son coût élevé, nous n'avons pas pu multiplier les sites de mesure. Le tablier d'éboulis de La Plagne a été choisi car la pression pastorale a fortement diminué au début du siècle dernier (1914). De plus, de tous les talus d'éboulis étudiés, la dynamique végétale a été la plus rapide depuis cette période (1911-2001). Ces éléments nous ont laissé penser qu'il pouvait constituer un site pertinent pour le suivi à long terme des effets liés au réchauffement climatique.

Le suivi microclimatique a été réalisé du 01/07/2002 au 15/07/2004, il permet de caractériser l'ambiance morphoclimatique du site et sert de base à l'analyse de la morphodynamique actuelle.

1.3.1. L'équipement stationnel

Le centre du dispositif est une « station de base » (type Auteg) équipée de dix sondes thermiques (air et sol) et de deux sondes hygrométriques (air) (Figure 21). Ces différentes sondes enregistrent simultanément la température et l'humidité selon un pas de temps horaire (24 lectures par jour et par sonde). La précision théorique est de l'ordre du dixième de degré. Elles sont reliées à la station par des câbles dont la longueur varie entre 10 et 15 mètres. L'appareil fonctionne sur batterie dont l'autonomie est d'environ 3 mois. Le recueil des données s'effectue via un ordinateur portable (logiciel conçu par Auteg).

Pour approcher de près ce microclimat et ses spécificités à l'échelle métrique, nous avons placé les sondes dans divers ensembles granulométriques et végétaux selon un gradient biorhexistasique déterminé (Figure 21). Celui-ci est identique à celui défini pour le suivi géodynamique de surface (1.2.2; 1.2.5.2)

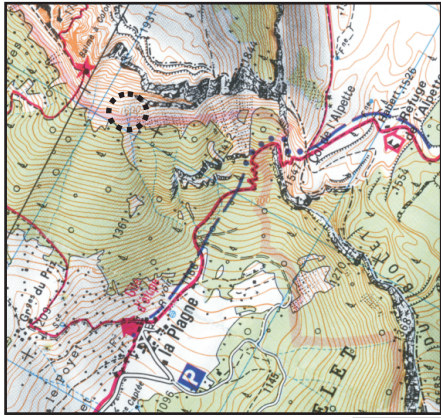
- Pour caractériser le mésoclimat du tablier de La Plagne, une thermosonde « air » a été placée à 1m 50 du sol dans les conditions d'abri standardisées⁵. Elle permet d'étudier et de mesurer l'ambiance climatique générale du tablier d'éboulis. Ce dispositif est complété par un thermomètre mini-maxi permettant de contrôler la validité des mesures de la sonde. Le respect de ce protocole permet de comparer nos données avec celles du poste de la Grande Chartreuse (Météo-France).

- Dans l'optique de cerner les caractéristiques microclimatiques et surtout les effets de l'échauffement différentiel du sol et de l'humidité sur la pédogenèse et la végétation (fonte des neiges, gel...), notamment au cours de la période végétative, nous avons mis en place un profil thermo-hygrique. Ce profil permet, entre autre, d'étudier la transition biorhexistasique (écotone) présentée plus haut (1.2.5.2). Le choix de ce secteur est lié à sa dynamique végétale rapide au cours du siècle dernier et à son caractère représentatif en ce qui concerne la succession spatiale des unités phyto-morphologiques. Le contact est caractérisé par une transition progressive de type lande/pelouse/éboulis :

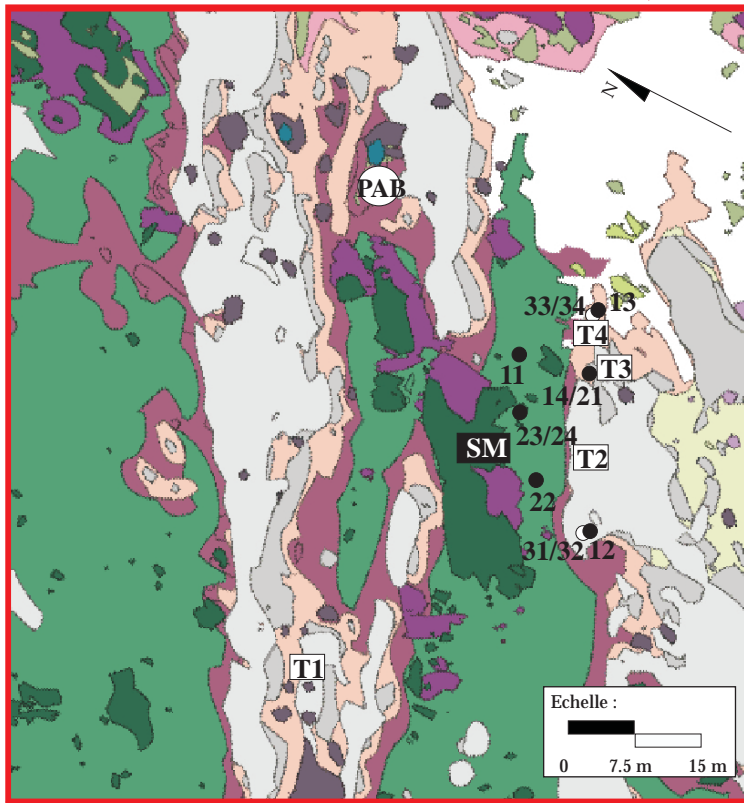
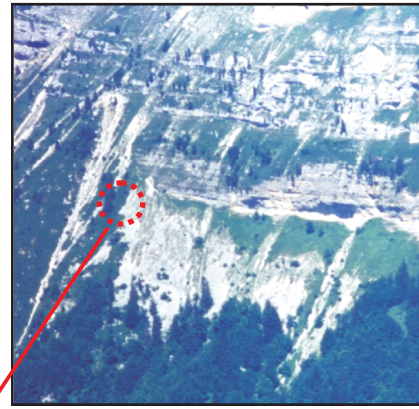
- deux thermosondes (12, 31) et une sonde hygrométrique (32) ont été mises en place dans la portion rhexasiasique de l'écotone. Une des deux thermosondes a été installée à -10 cm (12) de profondeur et la deuxième (31), couplée à la sonde hygrométrique (32), a été placée le long d'une tige filetée à 20 cm de la surface. L'environnement immédiat des sondes est exempt de présence végétale. La granulométrie de surface est constituée de fragments grossiers ($L \leq 10$ cm). La pente moyenne est de 10°.

- deux thermosondes ont été installées dans la portion hétérostasique de l'écotone. La sonde 21 a été placée à -10 cm de profondeur et la sonde 14 à 20 cm de la surface. La végétation est plus dense, le taux de recouvrement avoisine les 30%. Il s'agit d'un secteur à banquettes principalement colonisées par *Thymus praecox*, *Carex sempervirens* et *Valeriana montana*. La plage colluviale est constituée de fines ($20 \text{ mm} \leq L \leq 3 \text{ cm}$). La pente moyenne est de 10°.

⁵ Abri météorologique proche de l'abri conventionnel (Météo-France).



Localisation du secteur étudié
 Support : TOP 3333 OT
 - Massif de la Grande Chartreuse Nord
 - IGN 1999
 Ech. 1:25 000



Légende

- T1** Parcelles topomicrométrées 1 à 4
- 1** ● **Sonde thermique air/sol**
 11. 150 cm, air + mini-maxi
 12. - 10 cm, secteur colluvial rhexistastique
 13. - 10 cm, secteur biostastique
 14. 20 cm, banquette de soligélifluxion hétérostastique
 21. -10 cm, banquette de soligélifluxion hétérostastique
 22. -10 cm, lande à *Arctostaphylos uva-ursi*
 23. -10 cm sous *Pinus montana* ssp. *uncinata*
 24. 20 cm sous *Pinus montana* ssp. *uncinata*
- 2** ○ **Sonde thermo-hygométrique air**
 31/32. + 20 cm, secteur colluvial rhexistastique
 33/34. + 20 cm, secteur biostastique, pelouse dense

- SM** Station météorologique
- PAB** Pluviographe à augets basculeurs

Formations présentes en 1978

- Piquetage herbacé
- Pelouse
- Prairie
- Lande
- Ilot arbustif sur éboulis
- Ilot arbustif sur formation végétale
-

Formations développées entre 1978 et 2001

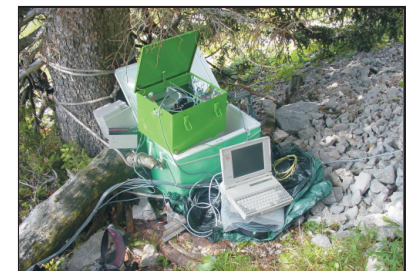
- Piquetage herbacé
- Pelouse
- Prairie
- Lande
- Ilot arbustif sur éboulis
- Ilot arbustif sur formation végétale

Autres

- Eboulis
- Non cartographié



Pluviographe à augets basculeurs.



Station d'acquisition en continu des températures (air et sol). Appareillage Auteg.

Figure 21 : Localisation de l'équipement microclimatique stationnel (Tablier de La Plagne, 1647 m)

- en biostasie, le protocole est légèrement différent. Nous avons voulu étendre le profil thermique à trois cas particuliers : la pelouse, la lande et la strate arborescente. Deux thermosondes (13 à -10 cm, 33 à 20 cm) et une sonde hygrométrique (34 à 20 cm) ont été placées au sein d'une pelouse dense à *Carex sempervirens* et *Sesleria varia*. Le taux de recouvrement de la végétation est supérieur à 75% et la granulométrie de surface est constituée de fines (\leq à 20 mm). La pente moyenne de la parcelle avoisine les 10°. Une troisième thermosonde a été installée à -10 cm (22) au sein d'une lande à *Arctostaphylos uva-ursi*. Enfin, les deux derniers capteurs ont été mis en place sous un ligneux haut (*Pinus montana ssp. uncinata*) à -10 cm (23) et 20 cm (24).

Ce dispositif a été complété par l'installation d'un pluviographe à augets basculeurs (Figure 21). Il est directement raccordé à la station automatique et enregistre les données pluviométriques selon un pas de temps horaire.

1.3.2. Les paramètres microclimatiques mesurés : intérêts morphoclimatiques et morphodynamiques

Comme nous l'avons souligné dans la première partie de ce mémoire, les talus d'éboulis de l'étage infra-périglaciaire sont soumis à divers processus d'érosion nivéo-périglaciaires. L'eau, quelle que soit son origine, eau de fusion du sol, eau de fusion nivale ou celle qui ruisselle et pénètre lors des précipitations, percole à travers les matériaux en favorisant des transferts et un réaménagement de la structure sédimentaire et pédologique.

Deux paramètres principaux doivent donc être étudiés : la température, là où s'exerce son agressivité potentielle, c'est-à-dire au niveau des matériaux et l'eau sous ses formes liquides (précipitations) et solides (neige et glace).

1.3.2.1. Les régimes thermiques

L'analyse des températures est fondamentale pour la quantification des cycles cryoclastiques (alternance gel/dégel) et leur influence sur les processus périglaciaires (gélifraction, gonflement cryogénique, gélifluxion, gélireptation...). En matière de phénomènes périglaciaires, les températures de l'air permettent d'appréhender l'ambiance morphoclimatique générale d'un site (mésoclimat). Cependant, FRANCOU (1981, 1988) et ROVERA (1990) soulignent que ce sont les températures du sol ou de la roche qui ont une meilleure signification morphogénique (microclimat). A ce propos, en ce qui concerne les sols, la signification est identique pour la végétation et notamment à -10 cm (KÖRNER *et al.*, 2003) et +20 cm (BOREL, comm. verbale, 2004). Les traitements des données thermiques de l'air et du sol sont identiques.

Les températures sont exprimées par décade (moyennes des maxima quotidiens, des minima quotidiens et moyennes simples). Selon ROVERA (1990), la décade apparaît comme étant l'unité de temps permettant une vision synthétique des phénomènes thermiques en évitant une trop grande perte d'information par rapport aux données quotidiennes. D'autant qu'il faut considérer qu'une situation thermique doit s'établir sur plusieurs jours ou une semaine pour avoir une influence morphogénique : pénétration et maintien du gel en profondeur dans le substrat, répétition des cycles cryoclastiques... Ainsi, dans l'optique de cerner plus précisément l'influence morphogénique, nous nous sommes intéressés à l'intensité et à la durée du gel.

Pour caractériser la durée du gel, nous avons comptabilisé le nombre de jours de gel/dégel ($T_{max} > 0 \text{ °C}$, $T_{min} \leq 0 \text{ °C}$), les jours de gel continu ($T_{max} \leq 0 \text{ °C}$) et le nombre de jours sans gel ($T_{min} > 0 \text{ °C}$). D'autre part, trois types de jours de gel, selon l'intensité du froid, ont été

distingués : les jours de gel faible ($0\text{ °C} \geq T_{\min} > -5\text{ °C}$), les jours de gel moyen ($-5\text{ °C} \geq T_{\min} > -10\text{ °C}$) et les jours de gel fort ($T_{\min} \leq -10\text{ °C}$).

Les comportements thermiques de l'air et du sol sont analysés et comparés notamment, sous l'angle de leurs relations avec le gradient biotermique précité.

1.3.2.2. Les données pluviométriques et nivales

A. Les précipitations

L'intensité, la durée, l'agressivité et la fréquence des pluies, sont des éléments à prendre en considération lorsque l'on mesure le caractère plus ou moins exceptionnel de telle ou telle pluie en matière d'érosion et de vitesse d'évolution des modelés (FEODOROFF, 1965; FRANCOU, 1981, 1988; ROVERA, 1990; POULIN, 1994; GERVAISE, 1997; OOSTWOOD WIJDENES et ERGENZINGER, 1997; MIETTON, 1998; ROBERT *et al.*, 2003; ROVERA et ROBERT, 2003; ROVERA *et al.*, 2003). L'énergie cinétique de la précipitation favorise les processus d'ébouilisation ainsi que la déstabilisation et le transport des matériaux meubles à cause du ruissellement qui en résulte (BALLAIS *et al.*, 1998). L'impact direct de la pluie sur le sol provoque un détachement des agrégats et un rejaillissement de gouttelettes et de petites particules (inférieures à 0,5 mm). C'est ce que FEODOROFF (1965) appelle érosion de rejaillissement ou « splash erosion ». En période de gel, la « détachabilité » des mottes augmente, car la croissance des cristaux de glace tend à séparer les agrégats les uns des autres. La pluie a une action érosive propre (impacts directs sur le substrat et le déplacement des matériaux) mais elle prépare et facilite aussi des stades érosifs ultérieurs (transport, ruissellement épidermique...). Sur talus d'éboulis, son action est relativement importante au sein des zones apico-proximales à fines car dès que les matériaux sont graveleux il y a infiltration rapide.

Les précipitations annuelles et la variabilité saisonnière ont été analysées. Nous nous sommes particulièrement intéressés à leur durée, leur intensité et leur récurrence dans l'optique de cerner simultanément les impacts directs et indirects sur le substrat et les déplacements de matériaux.

B. La neige

Nous n'avons pas pu suivre l'évolution de l'enneigement au sol de manière précise et régulière. Le rôle morphologique du manteau neigeux repose sur l'étude des températures du sol et le suivi de la géodynamique de surface (surfaces peintes et topomètre) en début d'hiver et au printemps. Il est appréhendé par l'intermédiaire de trois processus principaux :

- son influence directe sur :

- les transferts thermiques entre le sol et l'air, lorsqu'en particulier il porte écran à la pénétration de l'onde de gel hivernale ou, au contraire à celle des calories lors du dégel printanier;
- les phénomènes de « creeping » qui conduisent à des mouvements de débris lorsque la neige cohérente, en se tassant, se déforme et glisse sur le sol dégagé (nivo-reptation).

- son influence indirecte et notamment, les effets de la fusion nivale qui permet le transport, par ruissellement épidermique, des fragments de petites tailles surtout dans les zones proximales du tablier (nivo-solifluxion) et qui provoque, momentanément, la saturation en eau du sol ou sa recharge quotidienne.

1.4. Critiques et limites des méthodes utilisées

Les méthodes utilisées sont fiables, faciles et assez rapides à mettre en place. Cependant, les protocoles de suivi des surfaces peintes et surtout du topomicromètre sont très lourds, tant du point de vue des traitements informatiques que des mesures à réaliser sur le terrain, souvent difficile d'accès en Chartreuse.

1.4.1. La brièveté du temps d'observation

Nous sommes parfaitement conscient de l'extrême variabilité des conditions micro-stationnelles sur talus d'éboulis. Les processus morphoclimatiques sont régulièrement combinés, difficilement mesurables séparément et très variables dans l'espace et dans le temps. Les dispositifs expérimentaux, tels que les surfaces peintes ou le topomicromètre, ne donnent qu'une image relative du fonctionnement réel des talus. Bien évidemment, les valeurs mesurées constituent des vitesses d'érosion et/ou de déplacements par défaut car nos mesures ne portent que sur la géodynamique de surface des talus et uniquement sur des parcelles expérimentales artificiellement limitées. Comme le souligne FRANCOU (1988), la mise au point d'un calendrier de la morphogenèse pour l'année entière est une tentative pour caractériser des états récurrents et des moments importants mais cette « chronique des processus saisonniers dominants » ne peut décrire qu'une évolution moyenne. Pour pallier cette brièveté du temps d'observation, nous avons choisi d'étalonner l'année et les mois mesurés avec une série météorologique plus longue (poste de la Grande Chartreuse, 1960-2003). Ceci, afin de pouvoir juger de la représentativité de l'échantillon et, dans le contexte environnemental actuel, de permettre l'élaboration de scénarios d'évolution à l'échelle de la placette puis des écosystèmes.

1.4.2. Les limites des dispositifs de mesure

La méthode des marquages peints, tout comme celle du topomicromètre, est limitée par la granulométrie des matériaux. Au-delà de 20 cm, elle n'est plus adaptée et il est préférable d'opter pour celle des pierres peintes ou des tubes, notamment dans les zones distales à gros blocs des talus. Nous avons volontairement occulté, ici, le suivi géodynamique des parties basales pour plusieurs raisons :

- les blocs métriques nous apparaissaient relativement stables et en raison de la présence de fronts forestiers très denses, ils sont bloqués et ont tendance à s'enchâsser dans la matrice fine. De plus, la patine grisâtre, ancienne, des blocs et la présence de mousse confirment cette stabilité;

- la dynamique de la végétation, appréhendée grâce à l'approche diachronique (Chapitre 6) et à des campagnes de vérification sur le terrain, est très différente de celle observée sur le reste des talus. Celle-ci s'explique en partie par des contraintes liées à la grosseur des matériaux qui limitent la progression des herbacées mais favorise plutôt les ligneux et notamment ceux qui arrivent à se développer dans les interstices des blocs où se concentre un peu de matière organique;

- enfin, nous avons préféré appréhender la dynamique de la zone distale des talus par une étude dendrogéomorphologique.

Nous n'avons pas eu à déplorer de « blancs » souvent chroniques, liés à la défaillance des dispositifs microclimatiques, à l'exception d'une courte période de deux semaines. La principale critique réside dans l'absence de comparaison directe, possible, en terme de données microclimatiques, entre le tablier d'éboulis de La Plagne et le cône de l'Aulp du Seuil. Ceci est essentiellement lié au coût et à l'acquisition tardive du matériel.

Malgré une certaine imperfection de la méthode, les données mesurées permettent de préciser la variabilité des vitesses d'érosion et du déplacement des matériaux en fonction de divers paramètres climatiques, abiotiques (pente, granulométrie) et du recouvrement phytopédologique (gradient biorhexistasique). D'autre part, leur intérêt réside dans la possibilité de comparer nos résultats avec les travaux antérieurs, intégrant ou non l'influence végétale. A ce propos, des travaux similaires ont été réalisés dans les marnes jurassiques du bassin-versant du Saignon dans les Alpes de Haute Provence (ROVERA *et al.*, 1999), les schistes liasiques de la Combe de Mizoën en Haute Romanche (TURC, 1998; COMBE, 2002) et sur gypse dans les réserves biologiques domaniales du Petit Mont Blanc de Pralognan et de la Dent du Villard en Vanoise (ROVERA *et al.*, 2003). Les données acquises permettent d'élaborer une modélisation de la dynamique érosive en fonction d'un gradient biorhexistasique déterminé. Les confrontations érosion/végétation sont particulièrement étudiées en relation avec les facteurs environnementaux (climatique et anthropique).

1.5. Les apports de la dendrochronologie

L'intérêt de l'utilisation des méthodes de la dendrochronologie dans les reconstitutions environnementales et l'approche des processus géomorphologiques a été démontré dans de nombreuses études (SHRODER, 1978; ASTRADE *et al.*, 1998; JOMELLI, 2002; MALEVAL et ASTRADE, 2003; ANDREAU, 2003) et notamment sur talus d'éboulis (HETU, 1990; HETU, 1997; LAFORTUNE *et al.*, 1997). Les résultats de ces travaux nous ont incité à poursuivre nos recherches dans ce sens. Ceux que nous allons exposer sont issus de deux études réalisées en 2004 et 2005 sur le tablier d'éboulis de La Plagne (LAURENT, 2004, 2005).

L'objectif de ce travail est de préciser les modalités et les rythmes temporels de la colonisation ligneuse dans le contexte climatique récent. Deux aspects ont été abordés :

- une étude dendrochronologique classique, permettant de préciser et de confirmer la colonisation végétale observée à l'aide de la cartographie diachronique du tablier, depuis le début du siècle dernier (3.2.2.).

- une analyse dendro-géomorphologique, basée sur l'étude des cicatrices d'impact dans l'optique de préciser la géodynamique passée et actuelle du tablier d'éboulis.

L'échantillonnage a été réalisé d'après les cartographies diachronique et géodynamique du tablier. La densification végétale observée depuis le début du siècle dernier a été très importante. Par conséquent, l'échantillonnage a été effectué de manière systématique et tous les ligneux dépassant la taille de 30 cm ont été échantillonnés. Un échantillonnage aléatoire a été réalisé pour les semis (taille \leq 30 cm). La population s'élève à 81 individus (Figure 22) et est constituée de feuillus (*Rhamnus alpina L.*, *Acer pseudoplatanus*, *Sorbus aria L.*, *Corylus avellana L.* et *Salix caprea L.*). Trois de ces espèces se présentent sous forme de bouquets (*Rhamnus alpina L.*, *Corylus avellana L.* et *Salix caprea L.*) et *Rhamnus alpina L.* est la plus représentée.

Concernant le prélèvement des échantillons (carottes, sections transversales), nous tenons à préciser quelques aspects importants. Comme nous le verrons plus loin (Chapitre 8), le tablier d'éboulis de La Plagne n'est pas soumis à des processus de remaniement de surface, de type coulées de pierres glacées (HETU, 1997), coulées de débris (debris flow) ou avalanches de grande ampleur, susceptibles d'engendrer des déplacements massifs de matériaux et un enfouissement important de la base des arbres. Des avalanches supranivales ou superficielles (FRANCOU et HETU, 1989) de faible ampleur se produisent mais elles sont assez rares, ne laissent pratiquement aucun dépôt et interviennent très peu dans le bilan sédimentaire du tablier d'éboulis.

L'accumulation des matériaux sur le dépôt est principalement issue de l'éboulisation des corniches urgoniennes mais en raison de leur plus ou moins grande sphéricité, les blocs roulent en surface et s'accumulent majoritairement en zone distale du tablier. En raison de la densité végétale, la plupart sont déviés ou ralentis dans leur course, d'autres sont stoppés et se déposent parfois au pied des arbres mais ils ne sont pas suffisamment nombreux pour participer de manière efficace à leur enfouissement. Les processus de remaniement post-dépositionnels, susceptibles de participer à l'enfouissement des collets, sont principalement les phénomènes de nivéo-reptation ainsi que les effets de la fusion nivale (pour le transport des matériaux de petite taille). Cependant, si leurs effets sont perceptibles dans les plages colluviales à matériaux fins et moyens, la patine grisâtre des matériaux grossiers indique une certaine stabilité et une accumulation assez faible. C'est principalement au sein de ces secteurs que se développe la majorité des ligneux. Par conséquent, dans les zones apicale et médiale du tablier, l'accumulation de débris au-dessus du collet des arbres est relativement faible et quelques centimètres séparent cette couche de pierraille des horizons de matière organique (5 à 20 cm environ). Dans la zone distale, l'accumulation paraît être plus importante mais sa valeur réelle est surestimée en raison de la granulométrie grossière des matériaux (20 à 40 cm). De plus, et nous le préciserons plus loin, cette « accumulation » était déjà présente au moment de l'implantation des arbres car ceux-ci se sont développés dans les interstices des blocs, là où les conditions d'humidité étaient favorables et la matière organique présente.

Ces précisions sont utiles car nous tenions à souligner le fait que l'épaisseur des débris accumulés au-dessus du collet des arbres n'est pas très importante. De plus, le tablier d'éboulis de La Plagne est situé dans la réserve naturelle des Hauts de Chartreuse et nous aurions eu des difficultés s'il eut fallu excaver entièrement les collets pour prélever des sections transversales (à l'exception des n°17, 18, 52 ainsi que des semis, figure 22). Par conséquent, pour chaque individu, une carotte a été prélevée à l'aide d'une sonde Pressler, à proximité du collet visible de l'arbre et sous les quelques centimètres d'accumulation détritique. Les carottes ont été réalisées en amont du tronc, parallèlement à l'orientation de la pente en évitant les anomalies visibles (cicatrices par exemple). Pour les individus dont la largeur du tronc était insuffisante, une section transversale a tout de même été prélevée. Seuls trois collets ont été entièrement excavés (n°17, 18 et 52, figure 22). Il s'agissait d'arbres situés dans la partie distale à gros blocs du tablier, à proximité du front forestier cette fois, à l'extérieur des limites de la réserve. L'épaisseur moyenne «d'accumulation» est de 30 cm. Pour l'étude des cicatrices d'impact, les tiges comportant le plus grand nombre de cicatrices ont été prélevées sur les ligneux adultes (52 individus, en rouge figure 22). L'échantillon est constitué de 163 cicatrices d'impact.

Comme les échantillons (carottes et sections transversales) n'ont pas été prélevés à la base réelle des arbres (collet), les datations dendrochronologiques ont été exprimées en âge minimal et non en âge réel (ou exact) d'implantation des individus (à l'exception des arbres n°17, 18, 52 et des semis). Pour présenter des résultats plus précis quant à l'évolution ligneuse du tablier, les données dendrochronologiques ont été couplées à la cartographie diachronique. Au contraire, pour l'approche dendro-géomorphologique, les datations réalisées sur les cicatrices d'impact sont exprimées en âge réel.

La lecture des cernes nécessite un traitement des carottes décrit en détail par ISELI et SCHWEINGRUBER (1989). En résumé, ce sont les suivantes :

- séchage des carottes à plat (utilisation des rainures d'un carton ondulé);
- rabotage au tiers (par ponçage);
- fixation sur un support rigide (planches en bois rainurées);
- lecture à la loupe binoculaire et/ou au scanner (résolution 2000 dpi, CoRecorder[®] et CD Dendro[®]), parfois après avoir induit la section avec de la craie blanche pour mieux voir les pores.

Figure 22 : Localisation des individus échantillonnés (d'après LAURENT, 2005)



De nombreuses sources d'erreur existent en terme de datation, surtout lorsque l'on travaille dans des milieux où les processus d'érosion sont importants (SHRODER, 1989). Certes, nos résultats sont à relativiser mais couplés à la cartographie diachronique et à l'approche géodynamique, ils n'en demeurent pas moins très instructifs et permettent de valider certains aspects énoncés plus haut. Ils ont fait l'objet de divers traitements statistiques et cartographiques :

- histogramme des fréquences pour déterminer la structure d'âge minimal des arbres échantillonnés et spatialisation des résultats;

- pondération des fréquences obtenues pour la formation des cicatrices en tenant compte du nombre d'arbres échantillonnés qui étaient vivants à chacune des années, selon la méthode proposée par SHRODER (1978) et utilisée par LAFORTUNE *et al.* (1997). Les indices (I_t), exprimés en % ont été obtenus par la formule suivante :

$$I_t = \left(\sum_{i=1}^n R_t \right) / \left(\sum_{i=1}^n A_t \right) \times 100$$

dans laquelle R représente la réponse à un événement, t correspondant à l'année de cet événement et A au nombre d'arbres vivants à l'année t.

Nous reviendrons en détail sur ces travaux dans le Chapitre 8.

A ce stade du développement, notre approche géo-écologique se révélerait être incomplète sans une étude détaillée des paramètres phyto-écologiques.

II. Approche phyto-écologique et évaluation de la phytodiversité

Plus qu'en d'autres lieux, en montagne, les espèces végétales reflètent les conditions du milieu : « *Le cortège floristique s'adapte à l'altitude, à la pente, à la température ainsi qu'à ses variations, à la quantité et à la durée de l'ensoleillement, à l'épaisseur et à la durée du manteau neigeux, à l'intensité et à la fréquence du vent, à la nature du substratum et évidemment à la mobilité du sol* » (PECH, 1995 b). En géomorphologie, les végétaux sont révélateurs d'une dynamique morphogénique (SHRODER, 1978; SOUTADE, 1980; SOMSON, 1983; BEAUDIERE et SOUTADE, 1985; HETU, 1990; PEREZ, 1994; PECH, 1995 b; LAFORTUNE *et al.*, 1997; PEREZ, 1998; BERTRAN et TEXIER, 1999; PEREZ, 2002; ANDREAU, 2003; LAURENT, 2004). Dès lors, dans l'optique de compléter notre approche géo-écologique des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis, il convient de s'intéresser aux conditions écologiques stationnelles, susceptibles d'expliquer la dynamique végétale observée à l'échelle des écosystèmes. L'approche phyto-écologique se révèle être ici un outil intéressant.

2.1. Etude floristique

L'analyse de la structure et de la dynamique des mosaïques biorhexistasiques à l'échelle des écosystèmes nous a permis de déterminer un certain nombre d'unités phyto-morphologiques, animées par des dynamiques différentes en termes de colonisation végétale et de géodynamique (3.2., 3.3.). Outre la définition des principaux types physiologiques, d'un premier gradient géodynamique et biorhexistasique, cette approche a aussi permis de localiser les zones de transition potentielles entre ces différentes unités. Certaines de ces zones de transition, que nous qualifierons d'écotones biorhexistasiques, seront étudiées car elles pourraient être intégratrices de phénomènes géodynamiques et phytodynamiques, susceptibles d'expliquer l'évolution des écosystèmes.

Les données de base recueillies sont des données floristiques et écologiques.

2.1.1. Justification de la méthodologie utilisée : la technique du transect

Dans le cadre de ce travail, nous utilisons la technique du transect traversant un écotone biorhexistasique, pour tenter de mettre en évidence un gradient de colonisation. Seules les zones de transition entre les talus d'éboulis et les formations végétales périphériques ont été étudiées.

Comme le souligne VANPEENE-BRUHIER (1998), le choix de se placer dans un écotone implique que les relevés soient fait dans des milieux hétérogènes, zone de transition entre deux types de végétation. Cette hétérogénéité est donc une composante à part entière des relevés phyto-écologiques¹. Elle impose aussi, la continuité des relevés et la nécessité de les positionner perpendiculairement à l'écotone. La méthodologie d'échantillonnage retenue est celle des transects. En effet, les analyses de gradient basées sur des placettes juxtaposées orientées (transect) de manière à traverser un écotone, peuvent fournir des informations sur le gradient écologique (STOHLGREN et BACHAND, 1997 *in* VANPEENE-BRUHIER, 1998).

¹ L'approche phyto-écologique se différencie de l'approche phytosociologique classique par la nature hétérogène des zones dans lesquelles sont réalisés les relevés.

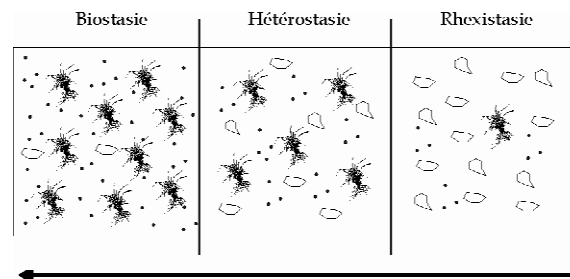
2.1.1.1. Transect ou placette ?

Selon VANPEENE-BRUHIER (1998) ces deux outils, le transect et la placette présentent à la fois des avantages et des inconvénients.

-**Le transect** : constitue une ligne fictive le long de laquelle on effectue un certain nombre de relevés. C'est une technique relativement bien adaptée à l'étude des écotones. Elle permet de rendre compte de l'évolution de la zone de transition, grâce à son orientation qui classe les relevés de la zone rhexistasiq ue à la zone biostasiq ue (Figure n°23). L'inconvénient du transect est qu'il est linéaire, d'où le risque de ne pas appréhender correctement la réalité de la dynamique des individus.

-**La placette** : est une zone délimitée dont on note les caractéristiques générales, elle permet une bonne retranscription de la réalité du terrain mais à la différence du transect, elle n'est pas orientée (FELTGEN-DIDIER, 1998).

Figure 23 : Cheminement d'un transect (gradient biorhexistasiq ue)



Pour l'étude des écotones biorhexistasiq ues d'éboulis, nous avons décidé de combiner ces deux éléments sur le terrain et d'avoir ainsi une approche stationnelle par transects et placettes. Notre récolte de données a été effectuée sur des transects le long desquels s'échelonnent des relevés par petites placettes de 2m². Nous sommes confortés dans ce choix par l'analyse comparative de ces deux techniques, réalisée par VANPEENE-BRUHIER (1998).

2.1.1.2. Le choix de la taille des placettes

Le choix de la taille des placettes des transects n'a pas été dicté par l'utilisation de la courbe aire-espèces (GOSSELIN et LAROUSSINIE, 2004). Nous avons évoqué le fait que les transects étaient réalisés en fonction d'un gradient biorhexistasiq ue. Par conséquent, le nombre d'espèces ajoutées/surface ajoutée augmente très rapidement lors du passage de la rhexistasiq ue à l'hétérostasiq ue ou à la biostasiq ue (facteurs de 1 à 6 en moyenne, parfois plus). Dans ce contexte, nous n'avons pas jugé nécessaire de déterminer la courbe aire-espèces pour choisir la taille des placettes des transects. De plus, VANPEENE-BRUHIER (1998) a, par exemple, utilisé pour des prairies de fauche où la végétation a un fort développement végétatif, des placettes de 2mx2m (soit 4m², déterminées avec la courbe aire-espèces). Nous avons donc choisi d'utiliser une taille inférieure intermédiaire pour les placettes des transects, qui prenne simultanément en compte la densité végétale des zones biostasiq ues et hétérostasiq ues mais aussi la faible densité végétale des zones rhexistasiq ues. La taille retenue est une placette de 1mx2m, soit 2m².

2.1.1.3. Le choix de la position du transect

La démarche de stratification permettant de choisir les types d'écotones biorhexistasiques à étudier est basée sur un plan d'échantillonnage, identique à celui utilisé pour étudier les modalités de la géodynamique de surface ou l'analyse micro-climatologique (Chapitre 4, figure 13). La localisation « potentielle » des transects est directement issue de l'analyse des informations recueillies à l'échelle des écosystèmes et des données calculées par les outils de l'écologie du paysage (cartographie, données chiffrées concernant l'évolution des surfaces, des périmètres, indices paysagers). Si la localisation exacte sur le terrain est réalisée de manière empirique, les transects respectent néanmoins les types de transition déterminés à l'échelle des écosystèmes.

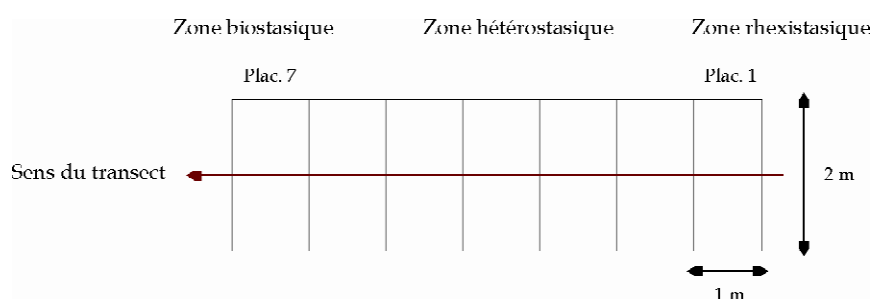
Cinq grands types d'écotones biorhexistasiques ont été déterminés : éboulis/pelouse (Epe), éboulis/prairie (Epr), éboulis/forêt (Ef), éboulis/lande (El) et éboulis/îlot arbustif ou herbacé sur éboulis (Ei).

2.1.1.4. Le positionnement sur le terrain

Le positionnement des transects sur le terrain répond à des critères précis.

- Le point de départ d'un transect doit se situer dans une zone rhexistasique (éboulis nu ou taux de recouvrement de la végétation $< 10\%$), puis il doit traverser une zone hétérostasique (taux de recouvrement $[10; 25\% [$, $[25; 50\% [$, $[50; 75\% [$) et se terminer en zone biostasique au sein d'un type physiognomique périphérique (forêt, lande, pelouse, prairie, îlot arbustif sur éboulis, taux de recouvrement $> 75\%$) (Figures 23 et 24).

Figure 24 : Détail d'un transect



- Les talus d'éboulis présentent une zonation longitudinale particulière, l'idéal est de réaliser des transects dans chacune des trois zones les constituant (Figure 25);

- Toujours perpendiculaires à l'écotone biorhexistasique, ils peuvent être réalisés de manière latérale et longitudinale (Figure 25).

Le début de l'écotone est situé à la limite de la première placette hétérostasique. La fin de l'écotone est située à la limite de la dernière placette hétérostasique, au contact de la zone biostasique. Nous l'identifions visuellement sur le terrain et l'analyse de la composition floristique des transects permet de la préciser.

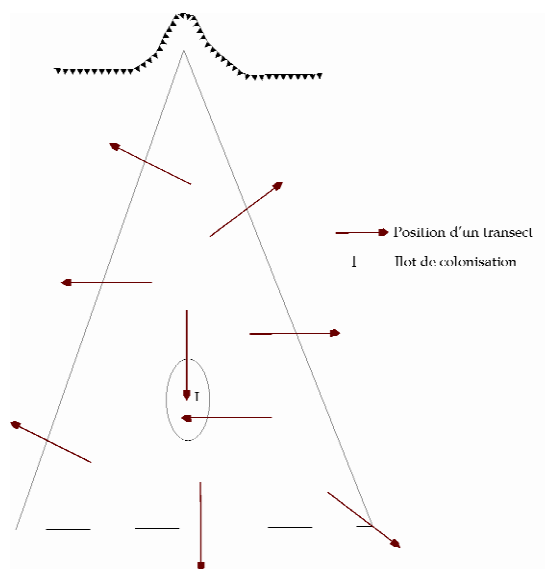


Figure 25 : Positionnement des transects

2.1.1.5. Le choix de la longueur du transect

La longueur du transect dépend de la distance qui sépare la zone rhexistasique de la zone biostasiq (Figure 24). En général, elle augmente proportionnellement à celle de l'écotone. L'écotone graduel situé entre le secteur rhexistasique et la pelouse est en général assez large (5-6 m et plus), l'écotone franc au contact du front forestier est plutôt court (2-3 mètres). La fin du transect est située en biostasie au sein d'une formation où la végétation est visuellement homogène. La taille des transects varie entre 3 et 20 mètres. Ils sont matérialisés sur le terrain par deux décamètres.

2.1.2. Les relevés phyto-écologiques

La fiche de terrain peut être divisée en deux parties : l'une contient les informations relatives aux transects, l'autre des informations relatives aux relevés. Deux types de descripteurs ont été retenus : les descripteurs de la végétation et les variables environnementales (abiotiques et biotiques). Les modalités des variables sont classées dans le sens de la rhexistasie à la biostasie (Figure 26). Pour chaque transect, une codification permet de connaître le secteur, le numéro du transect, le type de contact échantillonné et le numéro du relevé. L'appartenance au milieu d'origine est aussi spécifiée : éboulis (E), écotone (e), type physiologique périphérique (t). Ainsi, « LpAEpe1e » signifie, secteur de La Plagne, transect A, contact éboulis/pelouse, placette 1, écotone.

2.1.2.1. Les facteurs biotiques

La grille descriptive utilisée comporte trois variables principales, divisées en 15 modalités : la sociabilité, la stratification et les espèces végétales (129 au total).

L'échantillonnage floristique consiste à dresser la liste la plus complète possible des espèces ou sous-espèces quand la différenciation morphologique est nette. Les déterminations des espèces ont été réalisées à l'aide des flores de FOURNIER (1977), RAMEAU *et al.* (1993) et de la flore de la Suisse de LAUBER et WAGNER (2000). Tous les noms d'espèces ont ensuite été mis en conformité avec la nomenclature de la *Flora Europea* (TUTIN *et al.*, 1964-1980).

Figure 26 : Fiche de relevés phyto-écologiques

A. Caractéristiques du transect	B. Caractéristiques des relevés	Espèces	aba.	< 10	10; 25	25; 50	50; 75	> 75
Secteur :	Relevé n° :							
Type de talus d'éboulis	Données environnementales							
N° du talus d'éboulis	Pente :							
Transect :	1. < 20°							
Longueur :	2. [20°; 25°[
Type de contact :	3. [25°; 30°[
1. Eboulis/pelouse	4. [30°; 35°[
2. Eboulis/prairie	5. > 35°							
3. Eboulis/lande	Gradient : inclinaison faible à forte							
4. Eboulis/forêt	Granoclassement							
5. Eboulis/flot	1. Gros blocs > 50 cm							
Topographie :	2. Blocs moyens 25 à 50 cm							
1. Zone apico-proximale (1/3 supérieur)	3. Petits blocs 10 à 25 cm							
2. Zone médiane (1/3 médian)	4. Gros cailloux 5 à 10 cm							
3. Zone distale (1/3 inférieur)	5. Petits cailloux 2 à 5 cm							
Altitude :	6. Graviers et terre fine < à 20 mm							
1. < à 1600 m	Gradient : d'une texture grossière à une texture fine							
2. 1600 à 1650 m	Stabilité :							
3. 1650 à 1700 m	1. Instable (rhexistasie)							
4. 1700 à 1750 m	2. Péristable (hétérostasie)							
5. > à 1750 m	3. Stable (biostasie)							
Exposition :	Gradient de stabilité							
1. Exposition à composantes Sud	Etat géodynamique :							
2. Exposition à composantes Est	1. Rhexistasie							
3. Exposition à composantes Ouest	2. Hétérostasie							
4. Exposition à composantes Nord	3. Biostasie							
Gradient : du chaud, assez sec au froid plutôt humide	Gradient biorhexistasique							
Position :	Etat pédologique :	Croquis de localisation						
1. Latéral	1. Lithosol							
2. Longitudinal	2. Litière seule discontinue							
3. Front aval	3. Litière+humus discontinus							
4. Ilot	4. Litière seule continue							
Recouvrement total :	5. Litière+humus continu							
1. < à 50%	Gradient : lithosol (rhexistasie) à sol évolué avec accumulation de matière organique (biostasie)							
2. [50; 75%]	Descripteurs de la végétation							
3. > à 75%	Sociabilité-répartition							
Remarques	1. Pas de plante							
	2. Plantes dispersées							
	3. Plantes en taches							
	4. Végétation continue							
	Gradient biorhexistasique de densité végétale							
	Stratification :							
	1. Pas de strate							
	2. Strate herbacée de 0 à 1 m							
	3. Strate sous arborescente < à 1 m							
	4. Strate arborescente de 1 à 4 m							
	5. Strate arborescente > à 4 m							

« L'indice d'abondance-dominance est une estimation globale de la diversité (nombre d'individus ou abondance) et du taux de recouvrement (projection verticale des parties aériennes des végétaux ou dominance) » (GALLANDAT *et al.*, 1995).

Dans l'optique de mieux cerner le gradient biorhexistasique, nous avons légèrement adapté les valeurs des coefficients d'abondance-dominance utilisées par les botanistes et les phytosociologues (Ozenda, 1982) :

« coefficient 5 : espèces couvrant plus de $\frac{3}{4}$ de la surface;

coefficient 4 : de $\frac{3}{4}$ à $\frac{1}{2}$;

coefficient 3 : de $\frac{1}{2}$ à $\frac{1}{4}$;

coefficient 2 : espèces abondantes mais couvrant moins de $\frac{1}{4}$;

coefficient 1 : espèces bien représentées mais couvrant moins de $\frac{1}{20}$;

coefficient + : espèces présentes, mais d'une manière non chiffrable ».

Les classes du coefficient correspondent aux situations suivantes :

- 0. Absence de végétation
- 1. < à 10% : très faible taux de recouvrement (rhexistasie);
- 2. [10; 25%[: taux de recouvrement faible;
- 3. [25; 50%[: taux de recouvrement moyen;
- 4. [50; 75%[: taux de recouvrement fort;
- 5. > à 75% : très fort taux de recouvrement (biostasie)

Chaque espèce² constitue une variable, nous en avons déterminé 129 (Annexe G). Cette variable nous renseigne aussi sur l'état géodynamique et biopédologique de la placette (rhexistasie : < 10 %; hétérostasie : 10 -75%; biostasie : > 75%).

La sociabilité-répartition permet de caractériser la sociabilité et l'homogénéité de la distribution de chaque espèce. La sociabilité nous informe sur la cohabitation entre espèces. La répartition peut être appréciée par le fait que ses représentants sont bien régulièrement répartis ou bien au contraire agglomérés dans certaines parties du relevé.

La stratification constitue aussi un critère déterminant sur talus d'éboulis. La présence d'une strate arborée ou arborescente est souvent révélatrice, en Chartreuse, de la colonisation des talus par des espèces forestières et/ou pionnières compétitives, qui ont pu s'adapter à ce nouvel environnement. De plus, la présence de différentes strates au sein d'une même placette peut caractériser un état de développement végétal avancé.

2.1.2.2. Les facteurs abiotiques

La fiche descriptive utilisée comporte 12 variables donnant 47 modalités. Outre les effets liés à l'altitude et à l'exposition, divers facteurs environnementaux exercent une influence, parfois exacerbée, sur la répartition de la végétation au sein des talus d'éboulis. Nous avons décidé de prendre en compte les principaux descripteurs morpho-pédologiques. Ces variables se répartissent en deux groupes :

-les descripteurs morphologiques : pour les transects, il s'agit de la topographie (zonation longitudinale) et de la position sur le talus d'éboulis; pour les relevés, il s'agit de la pente et de l'état géodynamique de surface;

-les descripteurs pédologiques : nous avons retenu pour les relevés : la « stabilité » des éboulis, la granulométrie et l'état pédologique. La « stabilité » est associée à la biostasie, la pénestabilité à l'hétérostasie et l'instabilité à la rhexistasie (Chapitre 2, I).

Les mesures de pente et de granulométrie ont été réalisées au centre de chaque placette.

Sur talus d'éboulis, les principaux facteurs discriminants sont certainement la géodynamique de surface, la pente, la granulométrie et l'état pédologique du « sol » (Chapitre 1). Il est probable que la colonisation végétale constatée, depuis le début du siècle dernier, annonce des changements dans les conditions stationnelles et une modification progressive de l'influence édaphique exercée par les éboulis.

² Pour une raison pratique, seules les plantes vasculaires ont été prises en compte car elles constituent un groupe connu et donc plus « facilement » identifiable. La liste des espèces ne prétend pas être exhaustive.

73 transects ont été réalisés sur l'ensemble du secteur d'étude, soit 411 relevés pour une surface échantillonnée de 844 m² (Tableau 6). Il y a une certaine disparité entre le nombre de transects effectués au sein de chaque éco-complexe. Celle-ci s'explique en partie par la structure paysagère et la dynamique végétale de l'éco-complexe considéré. Plus la structure paysagère est complexe, plus le nombre d'écotones biorhexistatiques augmente. Par conséquent, certains talus totalisent un nombre de relevés supérieur. Nous sommes conscients du fait que cela peut engendrer un biais notamment, par exemple, dans le cas de calculs d'indices de richesse spécifique, mais il s'agit d'une réalité de terrain.

Tableau 6 : Répartition par éco-complexe du nombre de transects et de placettes réalisés

Secteur	Transect	Relevé
La Plagne (Lp)	19	159
Aulp du Seuil (As)	23	92
Les « Pelloux » (Px)	16	76
Grand Som (Gso)	8	62
Grande Sure (Gs)	7	22
Total	73	411

La localisation des transects fait l'objet d'une cartographie présentée dans l'annexe H.

2.1.3. Analyse des données

Comme nous l'avons souligné précédemment, notre stratégie d'échantillonnage repose sur une démarche de stratification descendante (Figure 13), de l'éco-complexe à la parcelle de mesure. Dans l'optique de pouvoir utiliser les résultats de l'approche phyto-écologique stationnelle à l'échelle de l'éco-complexe, nous devons adopter une démarche ascendante. Celle-ci est fondée sur des regroupements d'information.

« Le regroupement de l'information floristique permet de diminuer la complexité des informations élémentaires en utilisant soit des indices synthétiques, soit des regroupements d'espèces en groupes fonctionnels » (VANPEENE-BRUHIER, 1998).

2.1.3.1. Les indices et les regroupements d'information floristique

Nous nous sommes intéressés à deux types de descripteurs : les indices de biodiversité et le caractère indicateur des espèces.

A. Les indices de biodiversité

Sur les talus d'éboulis, la variété des facteurs abiotiques à grande échelle, en particulier, la diversité géomorphologique, les différents gradients de perturbation que provoque l'érosion, la variation des conditions climatiques et l'histoire de l'occupation humaine, est supposée générer une intéressante phytodiversité³. Une première approche de la composition floristique d'un milieu consiste en l'étude de sa biodiversité spécifique.

Selon GOSELIN et LAROUSSINIE (2004), il est possible de mesurer certaines facettes de la biodiversité mais il n'est pas possible d'en donner une mesure globale et unique. La biodiversité taxinomique peut être appréhendée de deux manières : *« la plus simple consiste à mettre toute les*

³ Celle qui concerne uniquement les espèces végétales.

espèces au même niveau et à essayer d'expliquer « la » diversité d'un relevé grâce à des variables extérieures; la plus compliquée consiste à dissocier autoritairement toutes les espèces et à analyser leur réponse une à une. Heureusement, des méthodes visent à réduire cette complexité tout en essayant d'en retenir la substantifique moelle : analyses par groupe d'espèces, analyses multivariées... ».

Comme le soulignent GOSSELIN et LAROUSSINIE (2004), mesurer la diversité d'une communauté nécessite d'abord de relever sa composition sur le terrain. Les données de base sont celles d'un relevé d'observation (placette, transect...) ou d'un ensemble de relevés (Encart 4).

Encart 4 : Nature des données de base et notation (in GOSSELIN et LAROUSSINIE, 2004)

Pour chaque relevé ou ensemble de relevés, les informations disponibles peuvent être :

- la présence/absence de chacune des espèces étudiées, à partir desquelles on obtient la liste des espèces présentes dans le relevé et le nombre d'espèces dans le relevé, noté S ;
- l'«abondance» de chaque espèce, notée N_i pour l'espèce i , qui peut prendre les formes suivantes, non équivalentes les unes aux autres :
 - l'abondance numérique, c'est-à-dire le nombre d'individus de l'espèce ;
 - la biomasse de l'espèce ;
 - pour les plantes notamment, le recouvrement, en pourcentage de la surface recouverte par l'espèce ;
 - la fréquence, ou le pourcentage de présences de l'espèce dans des fractions du relevé.

La plupart des données d'abondance sont en moyenne dépendantes de la surface du relevé (présence/absence) voire proportionnelles à celle-ci. La somme des abondances des espèces dans le relevé est l'abondance totale du relevé, notée N . L'abondance relative de l'espèce i dans le relevé est souvent estimée par la formule :

$$p_i = \frac{N_i}{N} \text{ qui est un estimateur biaisé - au sens statistique.}$$

Chaque relevé est donc une donnée multidimensionnelle dont les composantes quantitatives sont des 1 (présence), des 0 (absence) ou des valeurs d'abondance.

Dans toute étude consacrée à la biodiversité, GOSSELIN et LAROUSSINIE (2004) insistent sur la nécessité d'appréhender les diverses composantes qualitatives (notions de richesse et d'équitabilité⁴, indices de dissimilarité...) et quantitatives (regroupements d'espèces par niveau de rareté, capacités de dispersion...) de la diversité. Ils ajoutent qu'une image plus juste de l'évolution d'une communauté est obtenue en considérant le triplet (richesse spécifique, abondance totale et équitabilité), avec l'impossibilité de conclure sur une tendance de « la » biodiversité si les trois ne varient pas dans le même sens. Il convient aussi de préciser la ou les échelle (s) spatiale (s) auxquelles on l'étudie. Une des caractéristiques de l'étude de la biodiversité est même de l'analyser à plusieurs échelles simultanément, ce qui a donné lieu notamment aux notions de diversités alpha (α), bêta (β) et gamma (γ) (GOSSELIN et LAROUSSINIE, 2004).

GOSSELIN et LAROUSSINIE (2004) proposent une définition détaillée de ces trois notions, que nous jugeons utile de citer dans son intégralité (Encart 5). Ces trois notions seront abordées dans le cadre de notre recherche.

⁴ Dans la littérature anglo-saxonne, le terme régularité se dit « evenness » (terme dû à Pielou) ou « equitability » ceci a conduit la majorité des auteurs francophones à adopter la traduction « équitabilité », ce qui entretient une certaine confusion. Nous utiliserons le terme de régularité.

Encart 5 : Les notions de diversités alpha (α), bêta (β) et gamma (γ)

(in GOSELIN et LAROUSSINIE, 2004)

« Les diversités α et γ expriment toutes les deux une diversité au sein d'une zone délimitée, mais se distinguent essentiellement par l'échelle d'étude : la diversité α désigne la diversité d'un relevé à une échelle locale assez restreinte (placette, peuplement, parcelle, station) ou la moyenne de ces diversités, tandis que la diversité γ désigne la diversité au sein d'un ensemble de relevés à une échelle plus large (massif, région, voire pays). Le plus souvent, la diversité α est calculée au niveau d'un relevé relativement homogène alors que la diversité γ est calculée sur un ensemble de plusieurs relevés, éventuellement hétérogènes, en tout cas clairement séparés dans l'espace ou le temps.

La diversité β exprime les dissemblances de compositions en entre lieux différents (entre parcelles, entre peuplements, entre massifs...). Elle ne s'exprime jamais en nombre d'espèces, puisque c'est par définition un taux ou une proportion. Elle est évaluée pour les indices de diversité classiques, comme le rapport – ou la différence, suivant l'indice de diversité considéré – entre la diversité γ d'une région et la diversité α des parcelles dans cette région.

On mesure donc la diversité β , en comparant l'évolution de la valeur de la diversité lors du passage d'un niveau inférieur – ou local – du plan d'échantillonnage, à un niveau supérieur – ou global » (GOSELIN et LAROUSSINIE, 2004).

Ainsi, la diversité α^5 sera calculée à trois niveaux d'organisation (Figure 12) : l'écocomplexe, la station et la parcelle et la diversité γ , à l'échelle du massif de la Chartreuse en considérant que les cinq écocomplexes constituent des sites représentatifs de la biodiversité des mosaïques biorhexistatiques cartusiennes.

Traditionnellement, la biodiversité est mesurée par deux indices : la diversité spécifique et la richesse spécifique.

a) La diversité spécifique : les indices de Shannon-Weaver (1949) et Hill (1973)

Nous avons choisi d'utiliser l'indice de diversité spécifique de Shannon H (Shannon et Weaver, 1949). Selon la théorie de l'information, développée par Shannon en 1948, un événement apporte (quand il se réalise) d'autant plus d'informations qu'il était *a priori* improbable (DAGET, 1976; FRONTIER et PICHOD-VIALE, 1998; FAURIE *et al.*, 2003). Pour appliquer cette théorie aux relevés écologiques, on assimile un relevé à un *ensemble* d'évènements « l'espèce i est présente », ayant chacun une probabilité p_i de se réaliser (GOSELIN et LAROUSSINIE, 2004)⁶. L'indice de diversité de Shannon-Weaver voit la diversité comme l'**entropie** de cet ensemble, c'est-à-dire la quantité moyenne d'informations apportées par la détermination de l'espèce d'un individu tiré au sort dans le relevé (DAGET, 1976; FRONTIER et PICHOD-VIALE, 1998; FAURIE *et al.*, 2003). Par conséquent, GOSELIN et LAROUSSINIE (2004) ajoutent que l'on conçoit bien que plus la communauté est variée, plus cette incertitude est grande; à l'inverse, plus la communauté est pauvre (qu'il y ait peu d'espèces ou qu'une espèce domine fortement les autres), plus cette incertitude diminue.

Selon FRONTIER et PICHOD-VIALE (1998), l'application de la théorie de l'information à la mesure de la diversité résulte de ce que *l'entropie possède les qualités que l'on souhaite d'un indice de diversité* : quantité positive prenant sa valeur minimale quand un seul élément est représenté en plus d'un exemplaire, sa valeur maximale quand tous les éléments ont même fréquence, ces deux

⁵ L'échelle de mesure de la diversité α est laissée à la libre appréciation du chercheur. Toutefois, elle ne doit pas dépasser celle de la diversité γ (M. GOSELIN, 2005, com. pers.)

⁶ En l'occurrence, la probabilité de présence d'une espèce est estimée par sa fréquence observée dans le relevé : probabilité que l'espèce i soit présente = $p_i \approx f_i$.

bornes croissant avec le nombre total d'éléments. On définira cette entropie sur une collection d'organisme, où chaque individu déterminé est assimilé à un « événement-signal ».

Il y a N individus et S catégories (espèces par exemple) dans la collection. D'après DAGET (1976) et FRONTIER et PICHOD-VIALE (1998), les « probabilités » de ces catégories sont en principe leurs fréquences *dans la communauté* car en pratique, l'observateur ne peut connaître les probabilités de capture p_i ou de fréquences relatives des espèces dans l'ensemble du peuplement. Seules sont connues, par comptage direct, les fréquences absolues des espèces N_i dans un échantillon. On en déduit les fréquences relatives observées :

$$p_i \approx f_i = \frac{N_i}{N}$$

où N_i est l'effectif de l'espèce n° i dans l'échantillon et N l'effectif total ($\sum N_i = N$). L'indice de diversité de Shannon-Weaver n'est autre que l'entropie calculée dans ces conditions, c'est-à-dire :

$$\begin{aligned} H &= -\sum_{i=1}^s p_i \log_2 p_i && (p_i \text{ compris entre 0 et 1}) \\ &= -\sum_{i=1}^s f_i \log_2 f_i && (f_i \text{ compris entre 0 et 1}) \\ &= -\sum_{i=1}^s \frac{N_i}{N} \log_2 \frac{N_i}{N} && (N_i \text{ compris entre 0 et 1}) \end{aligned}$$

Il mesure précisément la quantité moyenne d'information donnée par l'indication de l'espèce d'un individu de la collection - moyenne calculée sur la collection, à partir des proportions d'espèces que l'on y a observées (FRONTIER et PICHOD-VIALE, 1998).

« D'après la théorie de l'Information, la quantité totale d'information apportée par un message s'évalue en bits par le logarithme de base 2 du nombre de compositions possibles et également probables a priori que le message peut avoir » (DAGET, 1976). Le choix de la base de logarithmes est un simple choix d'échelle, c'est-à-dire d'unité de mesure. On choisira comme unité de quantité d'information celle apportée par l'un de deux événements ayant une chance sur deux de se produire (« pile ou face »), ce qui implique que le logarithme soit de base 2. L'unité d'information, quantité d'information d'un événement ayant une chance sur deux de se réaliser, est le bit ou binit (abréviation de *binary digit unit*) (FRONTIER et PICHOD-VIALE, 1998; FAURIE *et al.*, 2003). Les logarithmes de base 2 se déduisent des logarithmes vulgaires de base 10 en multipliant ces derniers par la constante 3,322 (inverse \log_2), tous les calculs d'indices de diversité se font en logarithmes vulgaires et le résultat final est multiplié par 3,322 pour obtenir la valeur en bits⁷.

Le calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver se fait soit à partir de la formule présentée plus haut en multipliant pour chaque espèce la fréquence relative N_i/N par son logarithme, soit en utilisant une table spéciale donnant directement la valeur des produits⁸ $\frac{N_i}{N} \log_2 \frac{N_i}{N}$, soit en multipliant chaque fréquence absolue par son logarithme et en appliquant la formule suivante (DAGET, 1976):

⁷ Nous renvoyons à DAGET (1976) pour plus de précisions sur la définition et les propriétés des logarithmes en base 2 (p 27, annexe I de l'ouvrage).

⁸ DAGET (1976) propose une table simplifiée qui permet de calculer les indices de diversité de Shannon à partir des fréquences relatives spécifiques observées dans un échantillon (p 28, annexe I). Elle fournit rapidement un ordre de grandeur de H . Les valeurs sont disponibles pour des valeurs de p_i de 0,001 à 0,010 et de 0,01 à 1,00. Pour obtenir une valeur précise de l'indice, il est recommandé de recourir à une table plus complète ou de faire les calculs comme indiqué plus haut.

$$\begin{aligned}
 H &= -\sum \frac{N_i}{N} \log_2 \frac{N_i}{N} = 3,322 \left[\sum \frac{N_i}{N} (\log N - \log N_i) \right] \\
 &= 3,322 \left[\log N - \frac{1}{N} \sum N_i \log N_i \right]
 \end{aligned}$$

DAGET (1976) ajoute que ce mode de calcul permet de se rendre compte que les espèces les plus rares interviennent peu dans l'indice de diversité. Il en résulte que si certaines espèces très rares échappent à l'échantillonnage, l'estimation de la diversité du peuplement n'est pratiquement pas affectée.

Les valeurs de H varient de 0, dans le cas où la communauté n'est composée que d'une seule espèce (0,5 est un indice de diversité très faible), à 4,5 bits environ, ou exceptionnellement plus, dans le cas d'échantillon de grande taille de communautés complexes (MARGALEF, 1972 *in* GOSSELIN et LAROUSSINIE, 2004; FRONTIER et PICHOD-VIALE, 1998; FAURIE *et al.*, 2003). Ces valeurs dépendent à la fois de la richesse spécifique S et de la répartition des effectifs entre les diverses espèces. FAURIE *et al.* (2003) soulignent que les valeurs les plus faibles, inférieures à 1,5 bits/individu, sont associées à des peuplements dominés quantitativement par une ou quelques espèces. Ce genre de situation se rencontre lors de la phase de colonisation d'un biotope, alors que la communauté est essentiellement composée d'espèces pionnières. Ils ajoutent que si l'écosystème n'est soumis à aucune perturbation d'origine externe, l'évolution temporelle des peuplements s'effectue dans le sens d'une diversification. La valeur de H dépasse alors 2,5 bits/individu. Comme le maintien d'une structure complexe est coûteux en énergie, la diversité décroît légèrement en fin d'évolution. Les valeurs de H se stabilisent alors aux alentours de 3,5 à 4 bits/individus.

La diversité maximale ($H_{max} = \log_2 S$), qui correspond à la situation où toutes les espèces présentent des effectifs identiques, n'est jamais atteinte car il y a toujours un contingent d'espèces rares dans une communauté d'espèces.

« *L'indice de Shannon-Weaver est une quantité d'information, apportée par un échantillon, sur la structure du peuplement dont provient l'échantillon et sur la façon dont les individus y sont répartis entre diverses espèces* » (DAGET, 1976). L'auteur ajoute que toutes variations des indices de diversité relatifs à des échantillons tirés d'un même peuplement, et échelonnés dans le temps, reflèteront donc des modifications de la structure du peuplement et permettront de suivre globalement l'évolution de ce peuplement durant une certaine période ou durant un cycle de durée déterminée. De même, par les indices de diversité il est possible de comparer la structure de plusieurs peuplements et voir comment ceux-ci varient dans l'espace et non plus dans le temps. Cependant, comme les diversités dépendent à la fois des fréquences relatives des espèces et du nombre de celles-ci, qui peut varier largement d'un peuplement à l'autre, les comparaisons se font souvent par l'intermédiaire de **la régularité**⁹ (DAGET, 1976; BARBAULT, 1995; FRONTIER et PICHOD-VIALE, 1998; FAURIE *et al.*, 2003 et GOSSELIN et LAROUSSINIE, 2004).

FRONTIER et PICHOD-VIALE (1998) expliquent que l'entropie maximale H_{max} est réalisée par l'équifréquence des taxons inventoriés (voir plus haut), et est alors égale au log de base 2 du nombre de taxons, soit $\log_2 S$.

⁹ Ou équitabilité pour certains auteurs.

On appelle **régularité** d'un échantillon, le rapport de sa diversité à la diversité maximale¹⁰ pouvant être obtenue avec le même nombre de taxons, soit :

$$R = \frac{H}{H_{max}} = \frac{H}{\log_2 S} \text{ (PIELOU, 1966)}$$

On en déduit :

$$H = R \log_2 S$$

formule faisant apparaître l'indice de diversité de Shannon-Weaver comme le produit de la *régularité*, par le *nombre d'espèces* (exprimé en logarithme). Les deux composantes de la diversité, à savoir le nombre d'espèces et la plus ou moins grande « régularité » de la répartition des individus entre les espèces, se trouvent donc introduites explicitement dans l'indice global (FRONTIER et PICHOD-VIALE, 1998). Il est possible de les traiter séparément et voir par exemple, dans une augmentation de la diversité observée, ce qui revient à l'augmentation du nombre d'espèces et à la « régularisation » de leurs proportions.

La régularité varie de 0 à 1 : elle tend vers 0 lorsque la quasi-totalité des effectifs est concentrée sur une espèce ; elle est de 1 lorsque toutes les espèces ont la même abondance. Les régularités courantes sont de l'ordre de 0,8 à 0,9 (FRONTIER et PICHOD-VIALE, 1998).

Classiquement, l'indice de Shannon-Weaver permet de mesurer la diversité α , diversité inhérente à un site ou un milieu. Comme nous l'avons souligné plus haut, la diversité α sera calculée à trois niveaux d'observation : l'écosystème, la station et la parcelle.

Pour quantifier l'importance de la variation de composition en espèces entre les cinq sites (La Plagne, l'Aulp du Seuil, les Pelloux, le Grand Som et la Grande Sure), à chaque niveau d'organisation, nous calculerons la diversité β ¹¹ en utilisant l'indice de diversité de Hill (1973) :

$$D_{Hi, a, \beta} = D_{Hi, a, \gamma} / D_{Hi, a, \alpha}$$

Où $D_{Hi, a}$ est défini par :

$$D_{Hi, a} = \left(\sum_{i=1}^S p_i^a \right)^{1/(1-a)} \text{ (se lit "indice de Hill d'ordre a")}$$

où a est un réel positif. Cet ensemble d'indices est infini puisque a peut varier dans l'ensemble des réels positifs (GOSSELIN et LAROUCSSINIE, 2004). D'une manière générale, plus a augmente et moins l'indice donne de poids relatif aux espèces rares. « *La diversité β ainsi définie pour les indices de Hill peut augmenter avec le nombre de relevés; si les relevés proviennent de n « habitats » distincts (i.e n'ayant aucune espèce en commun) échantillonnés de manière homogène, mais ayant chacun le même graphe rang-abondance, la diversité β est égale à n* » (ROUTLEDGE, 1979).

Comme nous avons préalablement calculé la diversité α en utilisant l'indice de diversité de Shannon-Weaver H , nous travaillerons en diversité de Hill d'ordre 1 car lorsque a tend vers 1, $D_{Hi, a}$ tend vers l'exponentielle de l'indice de Shannon-Weaver H (Hill, 1973; GOSSELIN M. et GOSSELIN F., com. pers., 2005).

¹⁰ Ou la diversité observée à la diversité théorique maximale (BARBAULT, 1995).

¹¹ Pour rappel, la diversité β peut être calculée par un rapport ou une différence entre diversité γ et diversité α , cela dépend de l'indice de diversité utilisé. Pour les indices de Hill, on utilise un rapport.

Dans ce cas, la diversité β s'exprime par un rapport des diversités γ et α d'indices de Hill d'ordre 1 (GOSELIN M. et GOSELIN F., com. pers., 2005).

b) La similarité : l'indice de Dice, une autre façon de mesurer la diversité β

Les indices de similarité permettent de comparer deux sites car ils évaluent la ressemblance entre deux relevés en calculant le rapport entre les espèces communes aux deux relevés et celles propres à chaque relevé.

Parmi les indices habituellement utilisés figurent :

- **l'indice de Jaccard**, S_{ij}

$$S_{ij} = \frac{a}{a+b+c}$$

où

a = nombre d'espèces communes au relevé i et au relevé j

b = nombre d'espèces présentes seulement dans le relevé i

c = nombre d'espèces présentes seulement dans le relevé j

- **l'indice de Dice** ou Czekanowski (SAPORTA, 1990 *in* VANPEENE-BRUHIER, 1998)

$$D_{ij} = \frac{2a}{2a+b+c}$$

où

a = nombre d'espèces communes au relevé i et au relevé j

b = nombre d'espèces présentes seulement dans le relevé i

c = nombre d'espèces présentes seulement dans le relevé j

Cet indice peut également s'écrire (VANPEENE-BRUHIER, 1998) :

$$D_{ij} = \frac{a}{\frac{(a+b) + (a+c)}{2}}$$

ce qui traduit le rapport du nombre d'espèces communes à i et j sur la moyenne des espèces de i ($a+b$) et de j ($a+c$).

Ces indices sont compris entre 0 (aucune espèce commune aux deux relevés) et 1 (relevés identiques). Ils portent sur la présence ou l'absence des espèces et non sur leur coefficient d'abondance. Comme VANPEENE-BRUHIER (1998), nous avons préféré utiliser l'indice de Dice, car il augmente plus vite que l'indice de Jaccard pour des coefficients faibles à moyens (inférieur à 0,7) ce qui entraîne des différences d'indices plus fortes donc plus repérables.

L'indice de Dice sera utilisé pour comparer la variation de composition floristique entre les cinq sites, à chaque niveau d'organisation.

c) La richesse spécifique

Nous avons choisi d'aborder la richesse spécifique en nous basant sur la méthodologie proposée par VANPEENE-BRUHIER (1998), qui consiste à l'examiner à différents niveaux hiérarchiques. D'autre part, en terme de gestion, nous pensons que celle-ci est certainement plus facilement exploitable par le gestionnaire, car d'après GOSSELIN et LAROUSSINIE (2004), les mesures de biodiversité à partir des seules données de présence/absence des espèces sont les plus simples à obtenir. **La richesse spécifique (nombre total d'espèces dans la communauté étudiée)** est l'indice le plus intuitif de la biodiversité. C'est aussi la mesure de diversité la plus couramment employée.

D'après VANPEENE-BRUHIER (1998), la richesse spécifique doit être calculée à plusieurs niveaux hiérarchiques car elle dépend de la surface sur laquelle elle est calculée (une placette, un type de milieu, un secteur), mais aussi de l'identité des espèces que l'on répertorie. L'auteur propose de la considérer à quatre niveaux de richesse : la richesse ponctuelle par placette, la richesse locale, la richesse globale et la richesse originale.

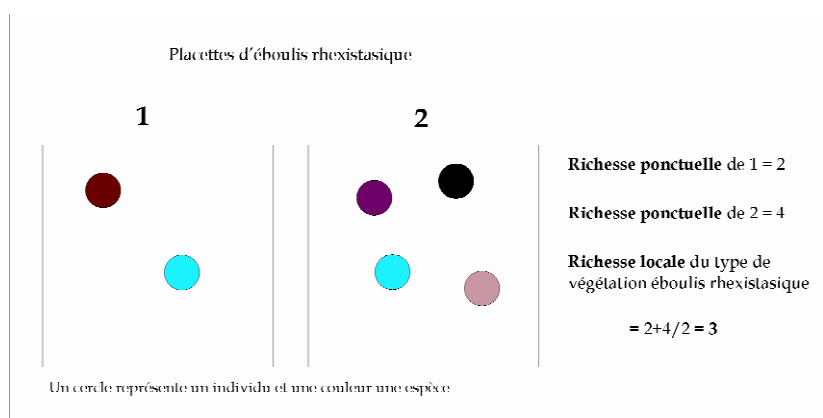
- La richesse ponctuelle par placette

La richesse ponctuelle par placette est le nombre d'espèces trouvées sur une placette de 2m². Son calcul est instantané placette par placette et rend compte du nombre d'espèces présentes sur une surface élémentaire en un endroit donné (Figure 27).

- La richesse locale

Il s'agit de la moyenne du nombre d'espèces par placette. Elle traduit, pour une catégorie (forêt, pelouse, prairie, éboulis rhexistatique) ou un nombre de placettes données (les 411 relevés par exemple), la moyenne de la richesse ponctuelle par placette et permet de prendre en compte l'hétérogénéité des placettes.

Figure 27 : Calcul de la richesse ponctuelle par placette et de la richesse locale (d'après VANPEENE-BRUHIER, 1998, modifié)



Dans les deux cas, le nombre calculé ne prend pas en compte la nature des espèces mais l'aspect quantitatif du relevé. Pour accéder à un autre niveau hiérarchique de richesse, prenant en compte l'identité des espèces, VANPEENE-BRUHIER (1998) fait appel à l'information supplémentaire qu'est l'identification des espèces.

- La richesse globale

A partir des listes d'espèces trouvées sur chacune des placettes d'une catégorie, il est possible de construire une liste répertoriant les espèces rencontrées au moins une fois. La richesse globale correspond à la somme de ces espèces (Figure 28). VANPEENE-BRUHIER (1998) souligne que l'avantage de cet indice est de pouvoir être calculé à tous les niveaux d'agrégation spatiale : transect, écosystème... L'auteur ajoute que la comparaison des différentes listes par catégorie similaire (les écosystèmes, les types physiologiques, les degrés d'abondance d'une espèce,...) permet de rendre compte de l'hétérogénéité et du degré de distinction des catégories. On ne s'intéresse pas seulement à l'identité de l'espèce mais aussi à sa répartition. VANPEENE-BRUHIER (1998) ajoute que c'est la richesse globale qui aura un impact en termes de potentiel de colonisation et de gestion de la biodiversité à l'échelle des écosystèmes.

- Le fond commun d'espèces

Il s'agit du nombre d'espèces présentes dans toutes les classes de la catégorie étudiée (par exemple dans les 5 écosystèmes à éboulis). Il traduit l'homogénéité de la végétation, les espèces communément répandues ou n'ayant pas d'exigence écologique particulière (Figure 28).

- La richesse originale

Contrairement au fond commun d'espèces, la richesse originale indique la somme des espèces qui ne sont représentées que dans une seule classe (Figure 28). Nous évaluerons la richesse originale de l'ensemble des mosaïques biorhexistatiques, puis uniquement celle qui caractérise les talus d'éboulis. Les espèces originales rendent compte de l'hétérogénéité des milieux. Un écosystème contribuera plus ou moins à la richesse globale du secteur d'étude en fonction de sa part de richesse originale.

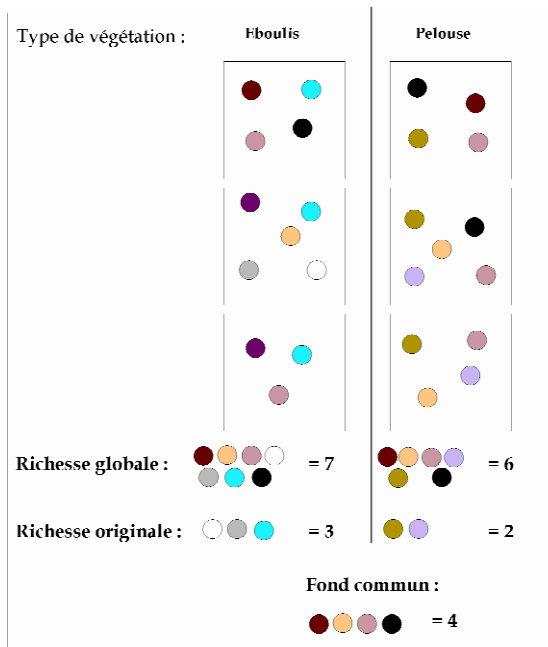


Figure 28 : Calcul de la richesse globale, originale et du fond commun d'espèces (d'après VANPEENE-BRUHIER, 1998, modifié)

Les cinq mosaïques biorhexistatiques d'éboulis seront comparées en termes de richesse locale, globale, originale et de fond commun d'espèces.

Comme le souligne VANPEENE BRUHIER (1998) et GOSSELIN et LAROUSSINIE (2003), la richesse spécifique, tout comme la diversité spécifique, permet de mesurer la diversité de type α . Cependant, VANPEENE BRUHIER (1998) ajoute que la définition de quatre niveaux de richesse amène à reconsidérer ce point de vue car les notions de richesse originale et de fonds commun d'espèces relèvent d'une diversité de type β puisqu'ils comparent la flore de deux milieux.

B. La rareté

Le Livre Rouge propose une liste des habitats¹² qui s'inspire des grandes catégories du code « Corine biotopes », servant notamment de référence pour la Directive « Habitats, faune, flore¹³ ». Cinq types d'habitats ont été définis : eaux douces, fourrés et pelouses, forêts, tourbières et zones humides, falaises, **éboulis** et grottes. L'examen des groupes d'habitats montre que la part majoritaire des espèces et sous-espèces du Livre Rouge, se rencontre dans des habitats de fourrés et pelouses (subalpines, alpines) ou de falaises, éboulis ou grottes alors que les habitats habituellement considérés comme menacés en France ou en Europe : habitats littoraux, tourbières et zones humides, eaux douces ou encore forêts, en hébergent moins. Ainsi pour la plupart, les espèces rares ou menacées aujourd'hui en France se rencontrent d'une part dans des habitats ouverts en voie de fermeture pour cause de déprise pastorale ou agricole, et d'autre part dans des habitats rupestres ou des éboulis, lieux traditionnels de refuge de l'endémisme en France et en Europe. Cette constatation conforte notre position quant à l'intérêt d'une évaluation de la biodiversité sur les talus d'éboulis cartusiens.

L'étude de la rareté sera réalisée sur la totalité des 126 espèces répertoriées sur l'ensemble des cinq éco-complexes. Nous nous sommes pour cela basés sur des travaux bien connus (GEHU et GEHU, 1981; SCHUMACHER, 1991). Nous avons considéré qu'il y avait deux types de rareté, une rareté absolue et une rareté relative.

-La rareté absolue : elle concerne les espèces rares ou endémiques, protégées et/ou menacées à l'échelle de la France, de la région Rhône Alpes ou du département de l'Isère;

-La rareté relative : concerne la présence des espèces seulement au sein de nos différents éco-complexes.

Le coefficient de rareté d'une espèce est donné par l'expression (GEHU et GEHU, 1981) :

$$R_{sp} = \frac{\text{Nombre total de sites} - \text{nombre de fois où l'espèce est présente}}{\text{Nombre total de sites}} \times 100$$

¹² Définition de la Directive : désigne à la fois des habitats-biotopes d'espèces, dont le maintien est indispensable au maintien de ces mêmes espèces et des habitats-écosystèmes. A noter une proportion non négligeable d'espèces rares ou menacées dans des habitats anthropisés.

¹³ Directive communautaire « Habitats, faune, flore », 21 mai 1992, concernant « La conservation des habitats naturels ainsi que de la flore et de la faune sauvage », dite Directive Habitats, faune, flore.

C. Le caractère indicateur des espèces

a) Les valeurs écologiques indicatrices de Landolt

Pour connaître le caractère indicateur des espèces, il convient de s'intéresser à leur autécologie. La composition floristique d'un relevé peut apporter des informations sur les conditions mésologiques. Comme le soulignent GALLANDAT *et al.* (1995), chaque espèce est considérée comme un bio-indicateur des conditions climatiques (continentalité, température, lumière) et édaphiques (pH, richesse trophique, humidité, humus, texture). L'échelle des valeurs indicatrices de Landolt varie de 1 à 5¹⁴ (Tableau 7). La valeur 0 signifie l'absence de l'information (en général, l'espèce a une trop grande plasticité).

Nous avons utilisé la flore de RAMEAU *et al.* (1993) et la *Flora Helvetica* de LAUBER et WAGNER (2000). Dans un premier temps, les relevés sont édités individuellement, avec les valeurs indicatrices des espèces. **La valeur écologique moyenne** de chaque placette est calculée en faisant la moyenne des valeurs écologiques des espèces, pour chaque indice. Ces moyennes, calculées pour chaque placette constituent des variables supplémentaires dans les analyses multivariées. Elles sont regroupées en classes et codifiées pour chaque indice. Le détail des modalités des valeurs, leur signification et la liste des valeurs indicatrices de chaque espèce sont présentés dans l'annexe I.

Tableau 7 : Liste des valeurs écologiques indicatrices de Landolt

	Valeur indicatrice	
F	Valeur d'humidité	Indique l'humidité moyenne du sol exigée pendant la période de végétation
R	Valeur de réaction	Indique quelle acidité une plante exige
N	Valeur de substances nutritives	Indique surtout la teneur en azote du sol
H	Valeur d'humus	Indique la classe d'humus
D	Valeur de dispersité	Caractérise la texture, la structure, la porosité, l'aération du sol
L	Valeur de lumière	Indique les besoins relatifs en lumière pendant la période de végétation
T	Valeur de température	Indique la température moyenne relative à laquelle la plante est soumise pendant la période de végétation, liée à l'altitude
K	Valeur de continentalité	Caractérise les différences de températures annuelles et journalières et l'humidité de l'air

Les valeurs de continentalité et d'humus n'ont pas été traitées, leur variation est quasi-nulle.

b) Les types biologiques de Raunkiaer

« *Le spectre biologique d'un type de végétation, qui traduit la répartition relative des différents types biologiques de Raunkiaer, donne des indications sur les stratégies adaptatives et sur la structure de la végétation* » (GALLANDAT *et al.*, 1995).

Nous avons utilisé les types biologiques suivants (le détail figure dans l'annexe I) :

- 1 = Phanérophyte vert estival
- 2 = Phanérophyte sempervirent

¹⁴ Celle d'Ellenberg *et al.* (1991), de 1 à 9.

- 3 = Nanophanérophyte vert estival
- 4 = Nanophanérophyte sempervirent
- 5 = Chaméphyte ligneux
- 6 = Chaméphyte herbacé
- 7 = Hémicryptophyte
- 8 = Géophyte
- 9 = Thérophyte
- 10 = Thérophyte-hémicryptophyte

Nous analyserons la variation des spectres biologiques en fonction des types de milieux (éboulis, écotone et type périphérique) et des écocomplexes.

Toutes ces données floristiques et écologiques sont synthétisées à différents niveaux spatiaux et notamment à l'échelle des transects et des écocomplexes, grâce à des calculs d'indices quantitatifs ou à des regroupements qualitatifs et fonctionnels. Les données sont représentées sous forme de tableaux et de graphiques.

2.1.3.2. Analyse univariée des relevés phyto-écologiques

A. L'analyse des distributions simples

Dans un premier temps, notre approche sera essentiellement descriptive. Nous analyserons les distributions simples des différentes variables biotiques et abiotiques.

B. Les spectres des groupes fonctionnels

Pour l'étude des groupes fonctionnels nous représentons graphiquement la répartition relative de chaque groupe : spectres biologiques et spectres des valeurs écologiques. Des comparaisons sont réalisées à l'échelle des écocomplexes.

2.1.3.3. Analyse bi-variée

Le test d'indépendance du χ^2 permet d'analyser des variables qualitatives ou quantitatives (ramenées à du qualitatif ordinal) en comparant les effectifs réels observés par rapport à des effectifs calculés suivant une règle d'équidistribution (CHADULE, 1994). Nous pourrions utiliser ce test ici et notamment pour étudier les relations entre facteurs du milieu. Cependant, il est soumis à des conditions d'utilisation spécifique (règle de Cochran¹⁵) qui en limitent pour nous l'utilisation car les effectifs relatifs aux coefficients d'abondance-dominance des espèces sont souvent faibles. Dans l'optique de réaliser des analyses bi-variées homogènes, permettant de mettre en évidence les relations entre facteurs du milieu mais aussi entre variables mésologiques et facteurs biotiques, nous avons préféré réaliser un test non paramétrique. Nos analyses bivariées reposent sur le calcul du coefficient de corrélation de rang de Spearman (ρ)¹⁶. Nous sommes conscients des biais induits par l'utilisation de ce coefficient mais faute de mieux, il permet néanmoins de cerner l'essentiel des relations bi-variées.

¹⁵ Pour réaliser un test du χ^2 , il faut que 80% des effectifs théoriques soient supérieurs à 5. Ce n'est pas souvent notre cas.

¹⁶ Lorsque l'on dispose de données qualitatives ordinales.

2.1.3.4. Un traitement de synthèse : Analyse Factorielle des Correspondances et Classification Ascendante Hiérarchique¹⁷

L'ensemble des relevés floristiques forme une matrice de données à n lignes (relevés) et p colonnes (espèces et variables environnementales dont les valeurs écologiques de Landolt). La structure de cette matrice, révélée à travers une analyse multivariée, amène à faire une typologie des unités phyto-morphologiques, par regroupement de relevés semblables. La matrice des relevés est exploitée par une analyse factorielle des correspondances (AFC), complétée par une classification ascendante hiérarchique (CAH).

A. L'analyse factorielle des correspondances (AFC)

« On appelle analyse multivariée une famille de traitements statistiques dont le but est de rendre intelligible un ensemble d'observations dont la structure profonde n'est pas immédiatement décelable : l'analyse multivariée condense cette collection d'observations pour en donner une représentation simplifiée et organisée » (CHADULE, 1994). Il existe plusieurs types d'analyse multivariée, analyse en composantes principales (ACP), analyse en composantes multiples (ACM). Lorsque l'on est en présence de variables qualitatives et quantitatives codées, l'Analyse Factorielle des Correspondances (A.F.C) s'impose. D'autre part, l'AFC est moins sensible que l'ACP aux doubles zéros en raison de la distance du χ^2 utilisée (PRODON et LEBRETON, 1994).

« L'A.F.C consiste en la recherche d'une hiérarchisation de l'information contenue dans un tableau de données à n lignes et p colonnes, en le traduisant par une répartition de n points dans un nuage à p dimensions(...) Elle présente le grand intérêt de permettre le traitement de variables qualitatives et de mettre en évidence des structures qui ne sont pas nécessairement linéaires » (SANDERS, 1989). L'A.F.C décompose donc l'information initiale en facteurs hiérarchisés (ou axes factoriels). L'interprétation des résultats est réalisée en fonction de la contribution de chaque variable à la formation de ces axes. C'est-à-dire, la part de l'information qu'elle apporte.

Les individus et les modalités des variables sont projetés sur le même graphique et c'est à l'aide de celui-ci que l'on peut établir des typologies d'individus et par là même de les caractériser.

VANPEENE-BRUHIER (1998) souligne que l'AFC ne prend pas en compte l'organisation des relevés sous forme de transect. Chaque relevé est considéré comme indépendant des autres. Seul le repérage manuel des placettes en fonction de leur position sur les transects permet de retrouver cette information spatiale.

L'AFC constitue le premier traitement multivarié réalisé.

C. La classification ascendante hiérarchique (CAH)

La CAH est la technique de classification multivariée la plus usuellement pratiquée. C'est un algorithme (suite d'opérations) portant sur les distances entre les points (individus). A partir d'un tableau de données, elle regroupe en classes homogènes les individus les plus proches. Elle suit une méthode de construction hiérarchique dont le résultat est une arborescence graphique. « C'est sur l'arborescence que l'on choisit le nombre de classes et donc leur composition exacte, en fonction de la distance entre regroupements successifs » (CHADULE, 1994).

La CAH peut être effectuée sur le tableau initial des données (individus en ligne, variables en colonne), ou alors sur un tableau de résultats de l'analyse factorielle (individus en ligne, coordonnées sur les premiers axes factoriels en colonne). Dans le premier cas, la métrique à utiliser

¹⁷ Les différents traitements statistiques ont été réalisés avec le logiciel SPSS v. 12 (Statistical Package for Social Sciences).

pour mesurer la distance entre individus est, par exemple, la distance euclidienne ou la distance du Khi-2, et le critère d'agrégation mesurant la distance entre groupe est celui du moment centré d'ordre 2 d'une partition maximum (JAMBU, 1978 *in* FELTGEN-DIDIER, 1998). D'après FENELON (1981), dans le deuxième cas, comme la distance inhérente aux calculs de l'AFC est le chi-2, le critère d'agrégation recommandé est le moment centré d'ordre 2. Nous avons fait plusieurs essais, notamment en travaillant avec un autre critère d'agrégation couramment utilisé dans ce type d'étude (hiérarchie de Ward). Finalement, nous avons retenu la deuxième méthode et chaque CAH a été réalisée à partir des résultats des AFC selon le critère d'agrégation du moment centré d'ordre 2.

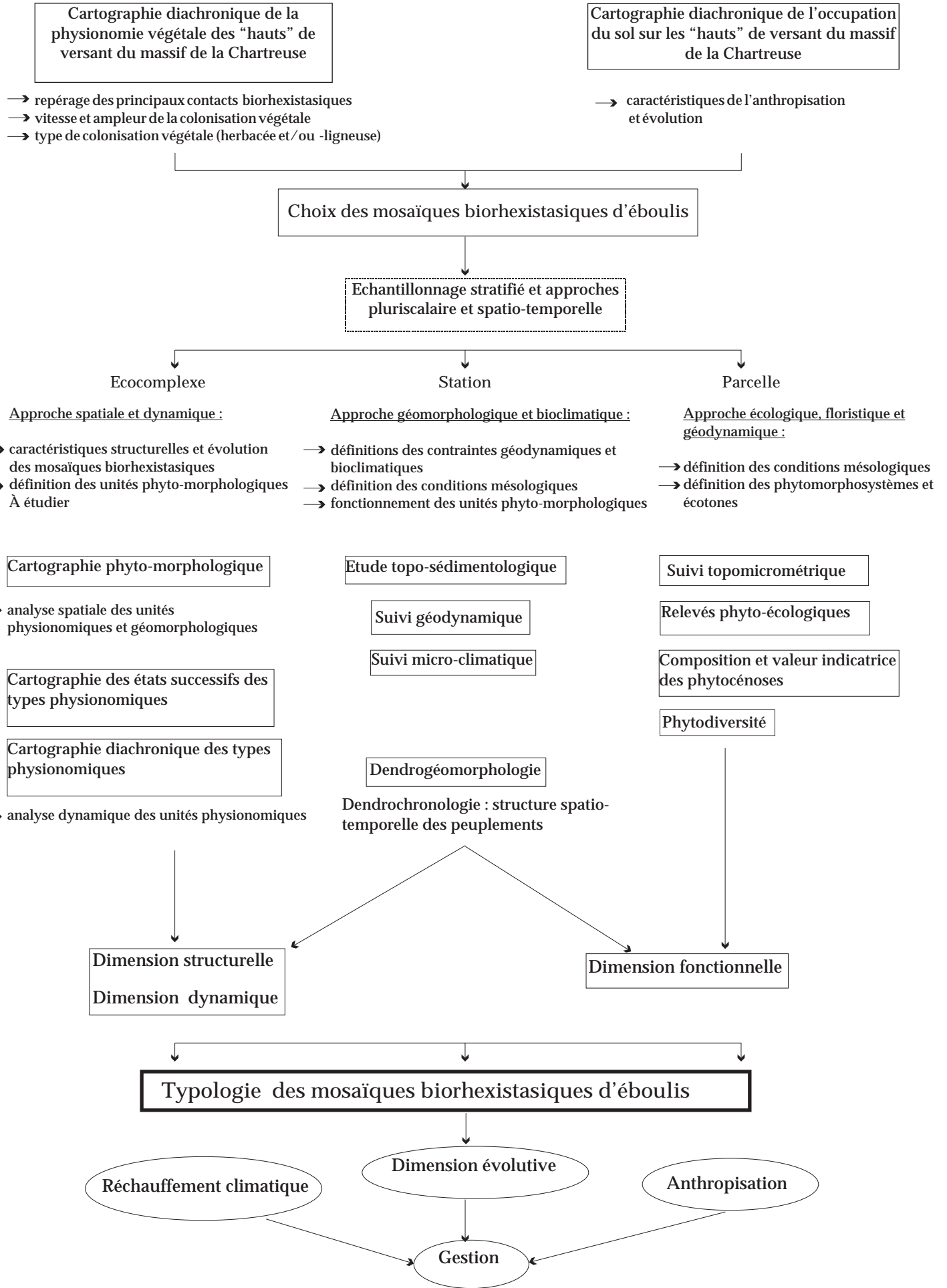
Pour résumer, les grandes étapes du traitement multivarié sont les suivantes :

- 1) Saisie des relevés.
- 2) Tri des espèces, en éliminant les espèces rares (présentes dans moins de trois relevés).
- 3) Analyse factorielle des correspondances, avec création de fichiers contenant les coordonnées factorielles, les contributions et les poids des relevés, des espèces et des variables environnementales (abiotiques et biotiques).
- 4) Projection des espèces rares comme éléments supplémentaires sur les plans de l'analyse; ces espèces ont ainsi des coordonnées factorielles, mais ne contribuent pas aux axes.
- 5) Classification ascendante hiérarchique des relevés à partir des coordonnées factorielles.
- 6) Réalisation d'une typologie synthétique où les relevés sont rangés dans l'ordre de la CAH.

Ces analyses multivariées seront réalisées pour l'ensemble des écosystèmes. Elles devraient nous permettre de définir une typologie des mosaïques biorhéologiques d'éboulis et de préciser les caractéristiques phyto-écologiques des différentes unités phyto-morphologiques rencontrées. Dans le cas des talus d'éboulis de La Plagne et de l'Aulp du Seuil, ces résultats seront couplés aux données issues de l'analyse de la géodynamique de surface dans l'optique de définir de nouvelles unités phyto-morphodynamiques (Chapitre 8). L'ensemble des résultats est spatialisé (Chapitres 7 et 8).

Conclusion de la deuxième partie : contribution méthodologique pour l'étude géo-écologique des mosaïques biorhexistasique d'éboulis

tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2006



TROISIEME PARTIE

Résultats et discussion

Chapitre 6 : Structure et dynamique des mosaïques biorhexistasiques à l'échelle des écocomplexes

- I. Analyse spatiale et phyto-morphologique des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis
- II. Analyse dynamique des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis

Chapitre 7 : Analyse phyto-écologique : vers une typologie fonctionnelle des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis

- I. Caractérisation mésologique des mosaïques biorhexistasiques
- II. Typologie affinée et cartographie actuelle des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis

Chapitre 8 : Approche micro-climatique, bioclimatique et géodynamique : contribution à la validation du réchauffement climatique dans l'étage infra-périglaciaire

- I. Une ambiance morphoclimatique de moyenne montagne
- II. Les caractéristiques des régimes thermiques à 20 cm et - 10 cm le long du gradient biorhexistasique : approches bioclimatique et morphoclimatique
- III. L'évolution morphodynamique des talus d'éboulis de La Plagne et de l'Aulp du Seuil : principales caractéristiques de la géodynamique de surface en relation avec le gradient biorhexistasique
- IV. Contribution à la validation du réchauffement climatique dans l'étage infra-périglaciaire : les apports de la dendrochronologie et de la dendrogéomorphologie

Chapitre 6

Structure et dynamique des mosaïques biorhexistasiques d'éboullis à l'échelle des écocomplexes

I. Analyse spatiale et phyto-morphologique des mosaïques biorhexistasiques

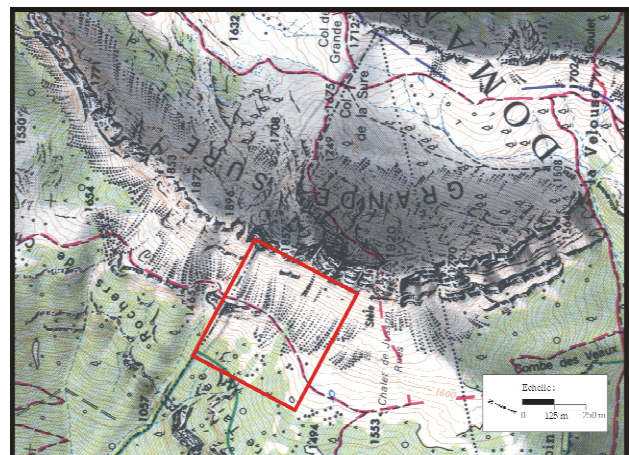
Les caractéristiques des mosaïques biorhexistasiques, déterminées par la physionomie végétale et les modelés seront présentées pour chaque écocomplexe. Comme nous l'avons souligné dans le chapitre précédent, les écocomplexes de l'Aulp du Seuil et de La Plagne constituent des sites témoins, qui ont été instrumentés et régulièrement suivis au cours des trois dernières années. Par conséquent, leur description sera ici plus fine. Cette analyse sera assortie de données concernant l'évolution de l'occupation des sols sur la période 1820-1960.

1.1. L'écocomplexe de la Grande Sure

L'écocomplexe de la Grande Sure est situé sur la bordure occidentale du massif de la Chartreuse, en situation d'ubac (Carte 5, chapitre 5). D'une largeur de 255 mètres, d'une surface de 10,6 ha et d'un dénivelé d'environ 200 mètres (1500-1700 m), il est dominé par une corniche urgonienne à vires herbeuses, dont le commandement atteint parfois 50 m (Figure 29). Il est limité :

- à l'ouest, par les Rochers de Pierre Taillée;
- à l'est, par la corniche de calcaire urgonien;
- au sud, par l'alpage de Jusson;
- au nord, par les Rochers de Chorolant et le Bois le Roi.

Figure 29 : Localisation de l'écocomplexe de la Grande Sure



Six types physiologiques forment la mosaïque biorhexistatique de la Grande Sure (Carte 6). La pelouse biostatique et le secteur rhexistatique couvrent les plus vastes surfaces. Le talus d'éboulis est mixte. Il est constitué d'un tablier surmonté, dans sa zone apico-proximale, par trois petits cônes coalescents. La présence de quelques terrassettes végétalisées (*Valeriana montana*, *Carex sempervirens*, *Hypericum nummularium* et *Thymus praecox*), dans le prolongement des cônes, indique probablement un fonctionnement ralenti. Le talus d'éboulis présente une zonation longitudinale triphasée constituée :

-d'une zone apico-proximale, rhexistatique à *Allium narcicifolium*, qui occupe le tiers supérieur. La granulométrie moyenne¹ est de 6 cm et la pente d'environ 28°;

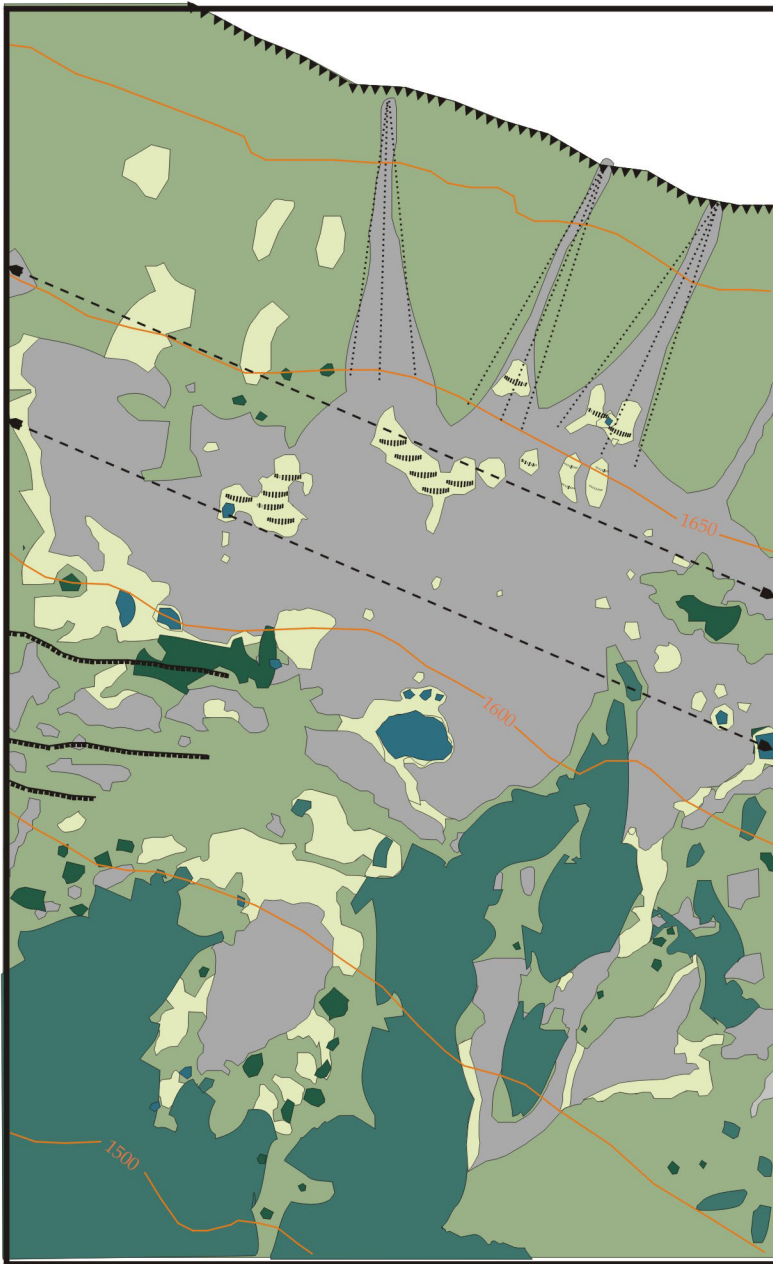
-d'une zone médiale, rhexistatique à *Allium narcicifolium*, qui occupe le tiers médian. La pente moyenne est de l'ordre de 31° et la granulométrie de 20 cm;

-et d'une zone distale, rhexistatique, qui occupe environ le tiers inférieur. La pente moyenne est de 24° et la granulométrie de 28 cm.

L'écocomplexe de la Grande Sure est certainement celui qui a connu la plus forte pression pastorale. Millénaire, elle s'entend jusqu'à aujourd'hui et l'alpage n'a jamais cessé son activité depuis au moins 1820 (Cartes 3 et 4 et détails en annexe A)². En 1960, il intégrait encore l'ensemble de l'écocomplexe mais depuis quelques années, une clôture le sépare du talus d'éboulis au Sud. La forêt présente une répartition sporadique mais son développement pourrait être dorénavant favorisé par une diminution de la pression pastorale au moins localement, sur ce secteur.

¹ La granulométrie et la pente moyennes ont été calculées d'après les mesures effectuées lors des relevés phytologiques. Il s'agit donc d'une estimation sur quelques m² et non de données issues de profils conventionnels.

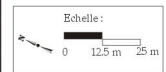
² Annexe A : 2^{ème} feuille (section C) de Saint-Julien-de-Raz, parcelles n° 201 bis, 202 bis, 206, 211 à 221. 4^{ème} feuille (section D) de Saint-Joseph-de-Rivière, parcelles n° 1126 à 1131.



Zone apico-proximale à matériaux fins

Zone médiale à matériaux hétérométriques

Zone distale à gros blocs




Légende :


Classes physionomiques :

Formation (s) ligneuse (s)

 Forêt

Formation (s) de transition

 Ilot arbustif sur formation végétale herbacée

 Ilot arbustif sur éboulis

Formation (s) non boisée (s)

 Piquetage herbacé


 Pelouse

Données géomorphologiques :

 Corniche principale (calcaire urgonien)

 Escarpement secondaire

 Zonation longitudinale

 Cône apical stabilisé

 Terrassettes

 Secteur rhexistasique

 Non cartographié

1.2. L'écoComplexe du Grand Som

L'écoComplexe du Grand Som est situé en Chartreuse centrale (Carte 5, chapitre 5). Il bénéficie d'une exposition plein sud. D'une largeur de 302 m, d'une surface avoisinant 11 ha, il présente un dénivelé d'environ 200 m (1500-1700 m). Il est surmonté d'une corniche urgonienne massive d'environ 75 m de haut (Figure 30). Il est délimité :

- au sud, par le Col du Frenay (1628 m) et le Bois de la Suiffière;
- au nord, par le Col de Mauvernay (1774);
- à l'est, par la corniche urgonienne;
- à l'ouest, par un escarpement secondaire (Calcaires du Fontanil) et la Combe de Montvernet.

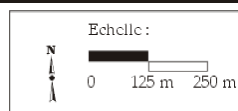
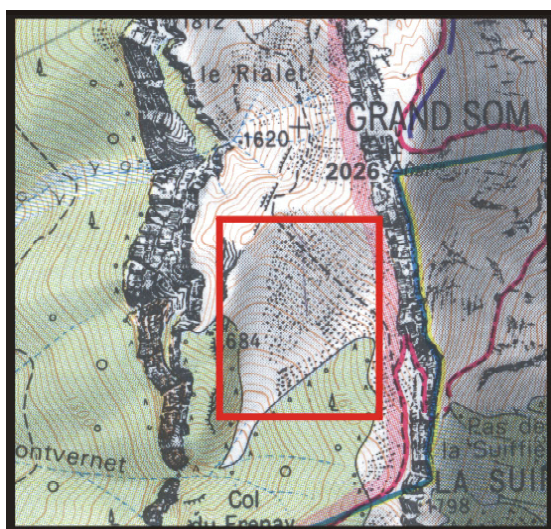
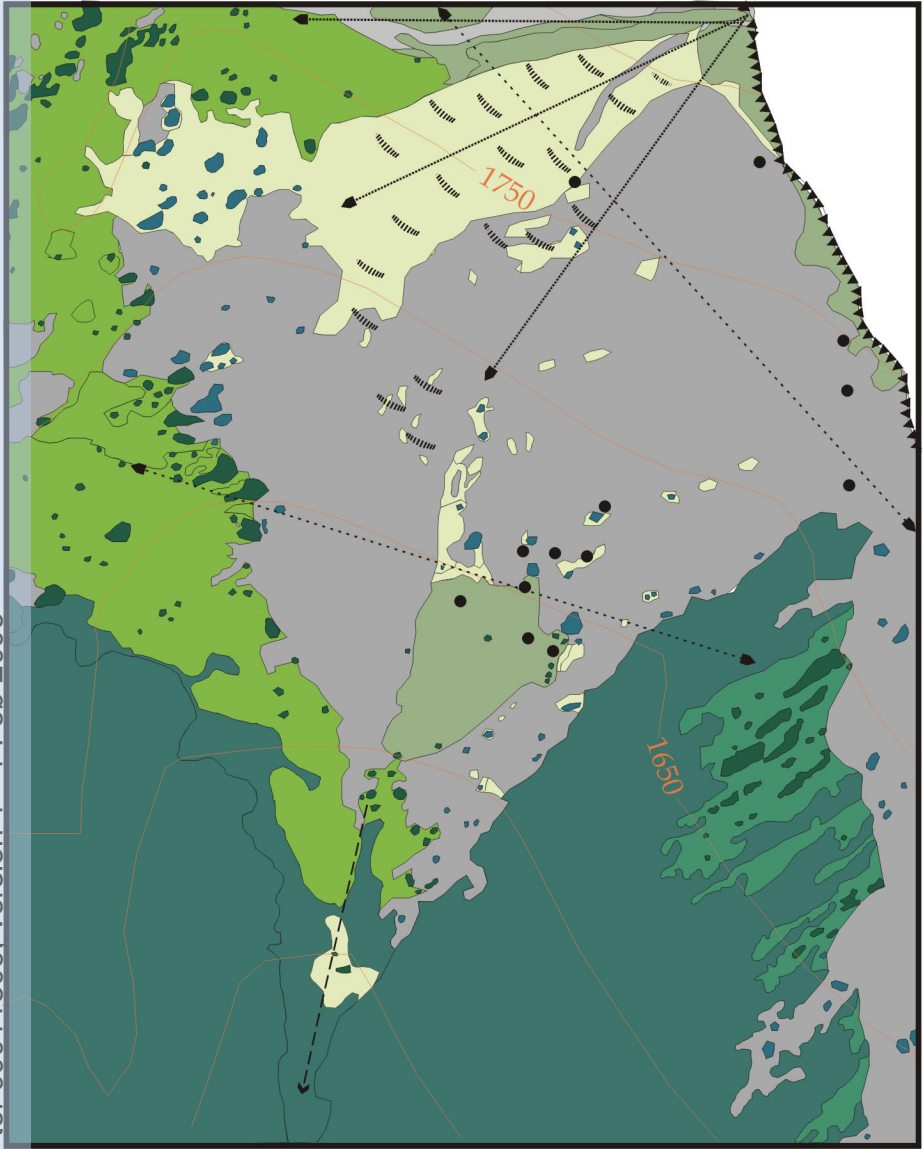


Figure 30 : Localisation de l'écoComplexe du Grand Som

Sept types physiologiques composent la mosaïque biorhexistatique (Carte 7). La forêt, la prairie et le secteur rhexistatique à *Centranthus angustifolius* et *Thalictrum minus* occupent presque la totalité de la surface cartographiée. Le talus d'éboulis est mixte et plus complexe que celui de la Grande Sure. Sa partie sud prend l'allure d'un vaste tablier délimité au nord par un cône légèrement déjeté vers l'intérieur du dépôt (sud). Le talus se referme à sa base sous la forme d'un entonnoir qui se confond, un peu plus bas, avec la Combe de Montvernet. Il s'agit d'un ancien couloir d'avalanche aujourd'hui végétalisé. Le cône d'éboulis est légèrement bombé dans sa partie axiale et présente une micro-topographie composée de nombreuses terrassettes à piquetage herbacé principalement colonisées par *Valeriana montana*, *Poa cenisia*, *Rumex scutatus*, *Thymus praecox*, *Leucanthemum adustum* et *Pritzelago alpina*. Un lambeau de pelouse à *Carex sempervirens* et *Sesleria varia* occupe la zone apicale du tablier et du cône ($P = 30^\circ$ et $G = 4$ cm). Au contact des zones médiale et distale, un îlot de pelouse à *Carex sempervirens* est parvenu à s'installer, protégé par les nombreux blocs décimétriques situés plus en amont.

Carte n°7 : Carte phyto-morphologique du Grand Som (2001)

tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2006



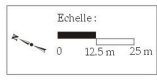
Zone apico-proximale à matériaux fins

Zone médiale à matériaux hétérométriques

Zone distale à gros blocs

Sources : S. ARQUES, 2003

- Photographie aérienne, IGN, mission 2001 (couleurs naturelles), n°2737, 1/25 000°.
- Photographie oblique S. ARQUES (2003)
- Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000°, Top 25, OT 3334.



Légende :

Classes physionomiques :

Formation (s) ligneuse (s)

Forêt

Formation (s) de transition

- Lande
- Ilot arbustif sur formation végétale herbacée et sous-arbustive
- Ilot arbustif sur éboulis

Formation (s) non boisée (s)

- Piquetage herbacé
- Pelouse
- Prairie
- Non cartographié

Données géomorphologiques :

- Corniche principale (calcaire urgonien)
- Zonation longitudinale
- Cône d'éboulis "peu actif" (bombement végétalisé)
- Ancien couloir d'avalanche
- Blocs décamétriques
- Terrassette
- Secteur rhexistatique stabilisé
- Secteur rhexistatique actif (couloir d'alimentation)

Tout comme la Grande Sure, le Grand Som a connu une exploitation pastorale intense. Annexes des Pères Chartreux (le couvent est situé en dessous), la prairie et les lambeaux de pelouse de l'écocomplexe ont été pâturés jusqu'en 1914 (Cartes 3 et 4 et détails en annexe A)⁵⁵.

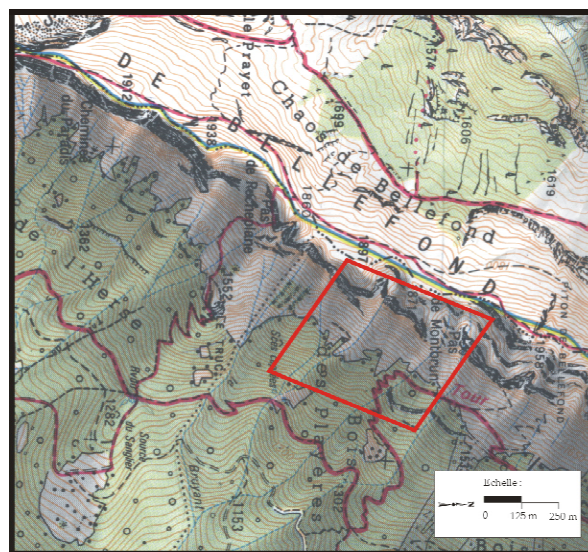
Le talus d'éboulis était classé en « terre vaine » (parcelle n°113) sur la période 1820-1914 mais la prairie périphérique (parcelles n°110 et 111) et le petit îlot de pelouse situé dans la zone distale (parcelle n°112), étaient bien classés en « pâture ». L'écocomplexe jouxte l'alpage central situé un peu plus au nord (Bovinant) et dont il devait constituer l'un des quartiers de pâture. En plus de l'exploitation pastorale, il est probable que les bergers aient régulièrement coupé quelques arbustes, sur le talus ou au sein des formations périphériques, pour leurs besoins personnels.

1.3. L'écocomplexe des « Pelloux »

L'écocomplexe des « Pelloux » est situé sur la bordure orientale du massif, en situation d'adret (Carte 5, chapitre 5). Il couvre une surface de 12 ha, pour une largeur de 392 m et d'un dénivelé d'environ 150 m (1500-1650 m). La corniche présente un commandement de 50 m (Figure 31). Il est délimité :

- à l'est, par le bois des Playères;
- au sud par le Pas de Rocheplane et le bois de l'Herse;
- au nord par le Piton de Bellefond (1958 m);
- à l'ouest par la corniche urgonienne (Rochers de Bellefond)

Figure 31 : localisation de l'écocomplexe des « Pelloux »

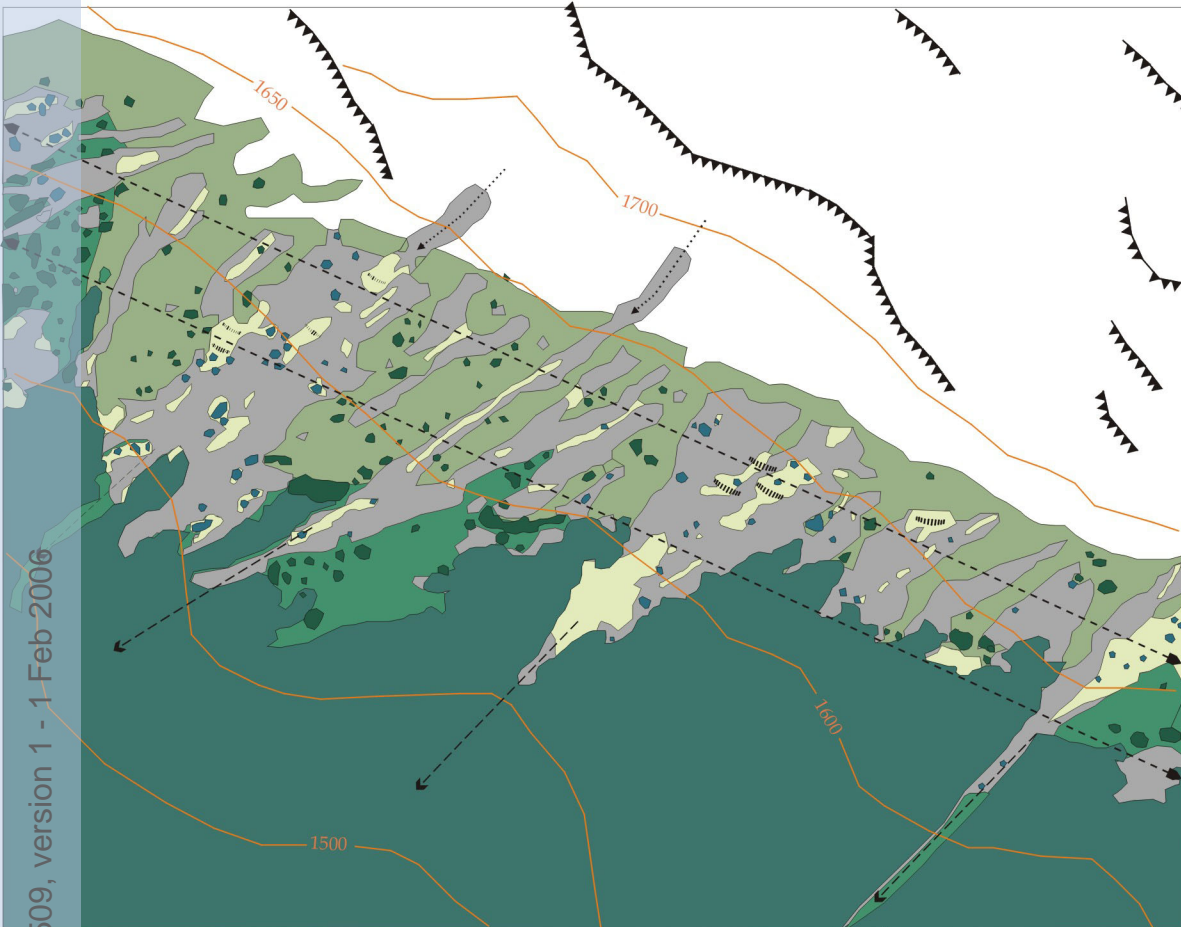


Six types physiologiques forment l'écocomplexe (Carte 8). La forêt couvre la plus vaste surface et se présente sous la forme d'une frange continue au contact de la zone distale du talus. La forme dominante est celle d'un tablier d'éboulis qui devait probablement constituer, au Tardiglaciaire (Chapitre 3), une jupe à peu près continue sur l'ensemble du versant. La pente moyenne est d'environ 31° pour la zone apico-proximale, 28° pour la zone médiale et 24° pour la zone distale. La granulométrie moyenne est respectivement de 17 cm, 21 cm et 22 cm. Les tapis de fracts sont prolongés dans leur partie distale par des chenaux avalancheux dont les degrés de végétalisation soulignent une activité ralentie. Les formations à pelouse, lande et piquetage herbacé ont été pâturées jusqu'en 1914 (Cartes 3 et 4 et détails en annexe A)⁵⁶.

⁵⁵ Annexe A : 1^{ère} feuille (section 1) de Saint-Pierre-de-Chartreuse, parcelles n° 41, 50 et de 103 à 130.

⁵⁶ 1^{ère} feuille (section 1) de la commune de Saint-Bernard-du-Touvet, parcelles n° 1 à 16.

Carte n°8 : Carte phyto-morphologique des "Pelloux" (2001)



Zone apico-proximale à matériaux fins

Zone médiale à matériaux hétérométriques

Zone distale à gros blocs

Sources : S. ARQUES, 2003

- Photographie aérienne, IFN, mission 1993 (IRC), n°1528, 1/17 000°
 - Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000°, Top 25, OT 3334.



Légende :

Classes physionomiques :

Formation (s) ligneuse (s)

Forêt

Formation (s) de transition

Lande

Ilot arbustif sur formation végétale herbacée et sous-arbustive

Ilot arbustif sur éboulis

Formation (s) non boisée (s)

Piquetage herbacé

Pelouse

Données géomorphologiques :

Corne principale (calcaire urgonien)

Zonation longitudinale

Ancien couloir d'avalanche

Terrassette

Secteur rhexistatique stabilisé

Non cartographié (secteurs à vires herbeuses)

tel-00011509, version 1 - 1-Feb-2006

1.4. L'écoComplexe de l'Aulp du Seuil

L'écoComplexe de l'Aulp du Seuil est situé sur le grand adret du rebord oriental à quelques kilomètres au Nord des « Pelloux » (Carte 5, chapitre 5). D'une largeur de 177 m, d'une surface de 4,8 ha et d'un dénivelé de 150 m (1500-1650), il est surplombé par une corniche dont le commandement atteint 100 m par endroit (Figure 32). Il est délimité :

- au sud, par le passage de l'Aulp du Seuil;
- à l'est, par le bois du Grand Essart et la Forêt de Bresson;
- à l'ouest par la corniche urgonienne;
- au nord par le Cirque du bresson.

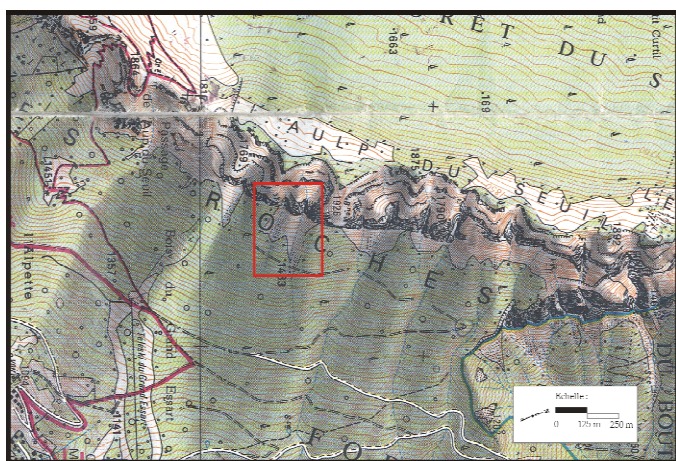


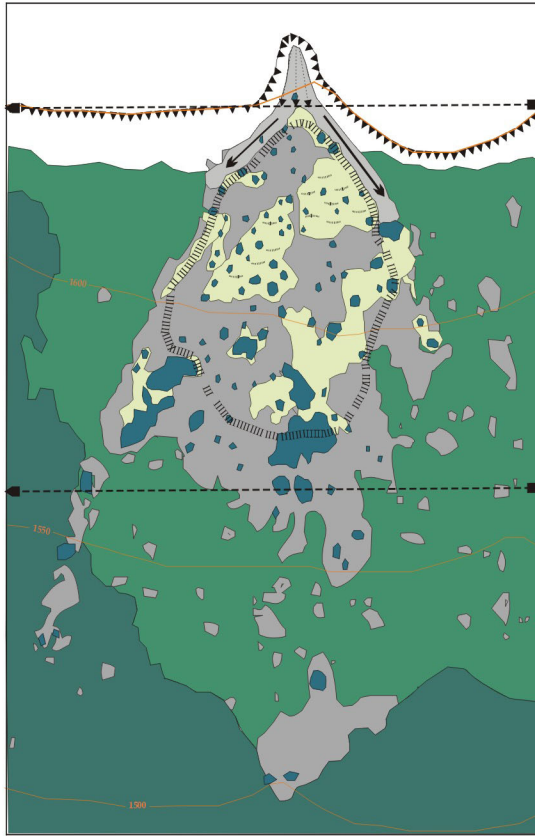
Figure 32 : Localisation de l'écoComplexe de l'Aulp du Seuil

Quatre types physiologiques composent la mosaïque biorhexistatique (Carte 9). La lande arborée couvre la plus vaste surface périphérique. Le cône d'éboulis est essentiellement végétalisé dans sa partie médiale où alternent terrassettes à piquetage herbacé et îlots arbustifs.

La configuration particulière de la corniche, constituée d'une succession de piliers et rentrants, est à l'origine de la présence du cône d'éboulis sous-jacent. Cette précision pourrait paraître banale. Cependant en Chartreuse, dans l'étage infra-périglacière, la forme dominante est le tablier d'éboulis et le cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil est le seul cône semi-végétalisé, de cette dimension, présent au sein de cet étage.

Le profil longitudinal effectué suivant la génératrice principale ne confirme pas *ipso facto* la présence d'un modèle de fonctionnement triphasé mais plutôt polyphasé (Figure 33A et carte 9). Il présente un granoclassement sensiblement similaire sur toute sa longueur dont les nuances sont quelque peu masquées par la présence de gros blocs qui ponctuent le profil de manière régulière. Les zones apico-proximale et distale sont, en fin de compte, très courtes sur ce dépôt (< à 10 m) et les données granulométriques réelles sont masquées par la nature hétérométrique des segments relevés dans les zones de contact avec la partie médiale. Nous renvoyons à la figure 15 pour la localisation des profils.

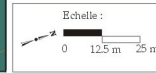
Carte n°9 : Carte phyto-morphologique de l'Aulp du Seuil (2001)



Zone apico-proximale à matériaux fins et chenaux actifs

Zone médiale à matériaux hétérométriques et blocs décimétriques

Zone distale à gros blocs



Sources : S. ARQUES, 2003

-Photographie aérienne, IFN, mission 1993 (IRC), n°1545, 1/17 000.

-Photographie oblique, S. ARQUES (2001).

-Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000, Top 25, OT 3334.

tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2006

Légende :

Classes physionomiques :

Formation (s) ligneuse (s)

Forêt

Formation (s) de transition

Lande arborée

Ilot arbustif sur éboulis

Formation (s) non boisée (s)

Piquetage herbacé

Données géomorphologiques :

▼▼▼▼▼ Corniche principale (calcaire urgonien)

↔ Zonation longitudinale

▲▲▲▲▲ Cône apical actif (régulièrement alimenté et soumis à des processus avalanches)

→ Chenal à matériaux mobiles

⤿ Bombement central stabilisé

▬▬▬▬ Terrassette

■ Secteur rhexistasique actif

■ Secteur rhexistasique stabilisé

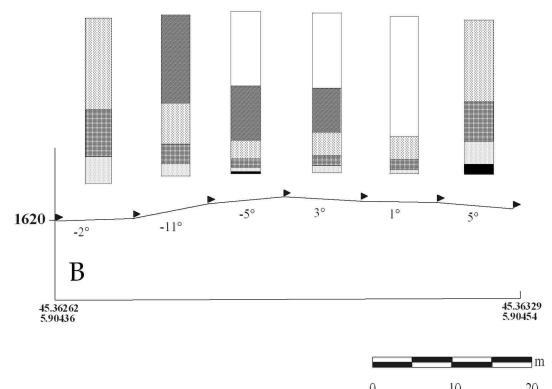
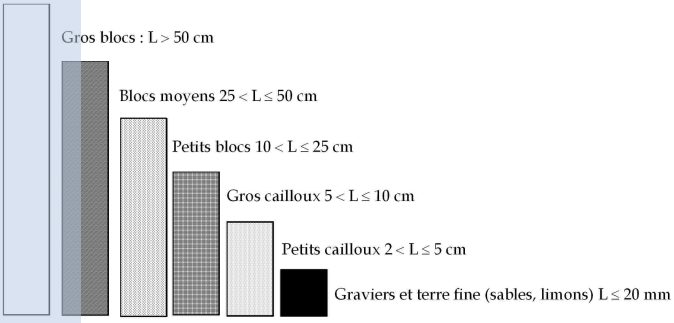
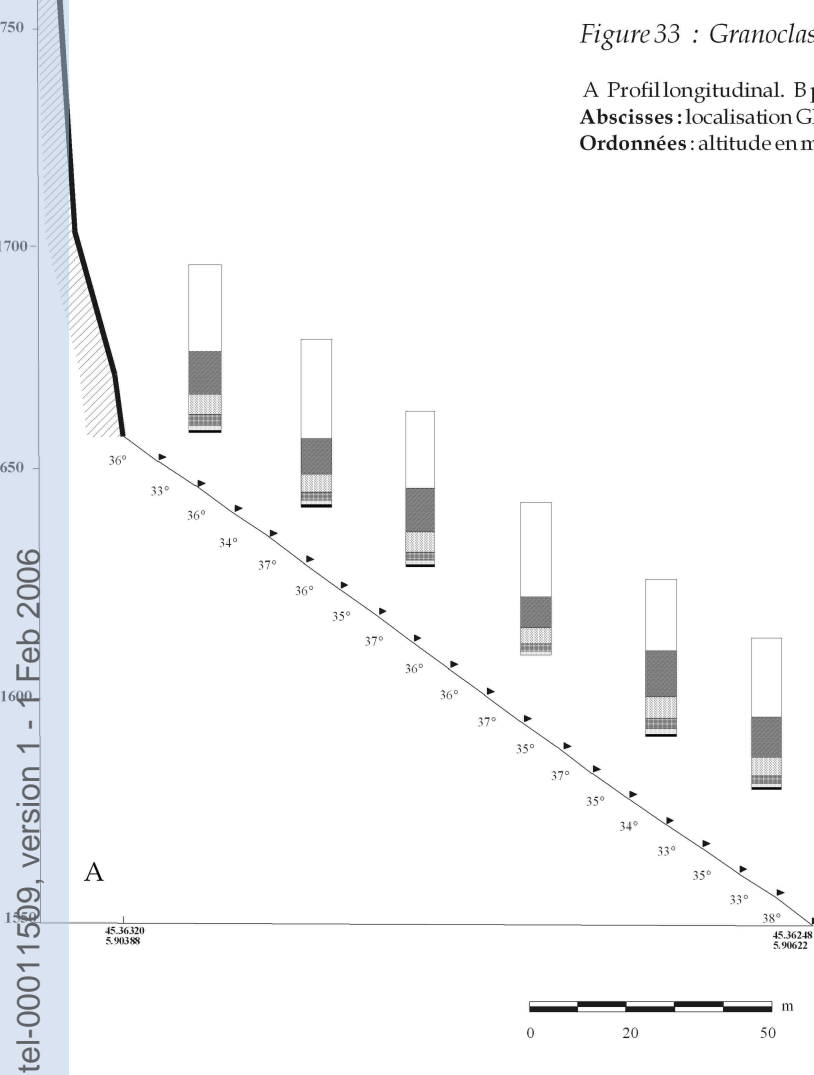
□ Non cartographié

Figure 33 : Granoclasement de surface : cône de l'Aulp du Seuil

A Profil longitudinal. B profil transversal.

Abcisses : localisation GPS (lat/long, WGS 84).

Ordonnées : altitude en m.



Globalement, de l'amont vers l'aval on distingue (Figure 33A) :

- une zone apico-proximale rhexistasiqne très courte, digitée, qui se caractérise par une inclinaison de 36° et un granoclassement constitué de blocs moyens et de gros blocs. Une matrice plus fine existe mais en proportion moindre. Le cône apical actif est régulièrement remanié par des avalanches courtes. Au contact de la zone médiale et du bombement central, il est prolongé par deux chenaux latéraux à matériaux mobiles dont l'extension basale est limitée par la présence d'îlots arbustifs.
- une zone médiale hétérostasiqne à biostasiqne, constituée d'une granulométrie grossière et dont l'inclinaison moyenne est comprise entre 35 et 37°. Elle prend l'allure d'un vaste bombement axial très végétalisé qui traduit un phénomène de stabilisation en cours du dépôt. Dans le détail, elle est caractérisée par une alternance de segments à matrice grossière et matrice moyenne à fine, notamment au contact des portions constituées de terrassettes à fort piquetage herbacé et sous arbustif (*Sideritis hyssopifolia*, *Rumex scutatus*, *Leucanthemum adustum*, *Thymus praecox* et *Globularia cordifolia*).
- enfin, une zone distale rhexistasiqne à gros blocs dont l'inclinaison moyenne avoisine les 33°. Les îlots arbustifs sont plus développés car la nature granulométrique est trop contraignante pour la strate herbacée. Leur présence traduit un processus de colonisation végétal frontal, certainement favorisé par la présence du bombement axial qui fait office de protection. La matrice fine s'accumule entre les interstices des gros blocs et permet l'installation des ligneux (*Rhamnus alpina* et *Salix caprea* essentiellement).

La zonation transversale révèle la convexité du cône d'éboulis et un fonctionnement transversal caractéristique (Figure 33B). Il est assez proche des modèles développés par WILSON (1990) et ROVERA (1990) sur éboulis quartzitiques.

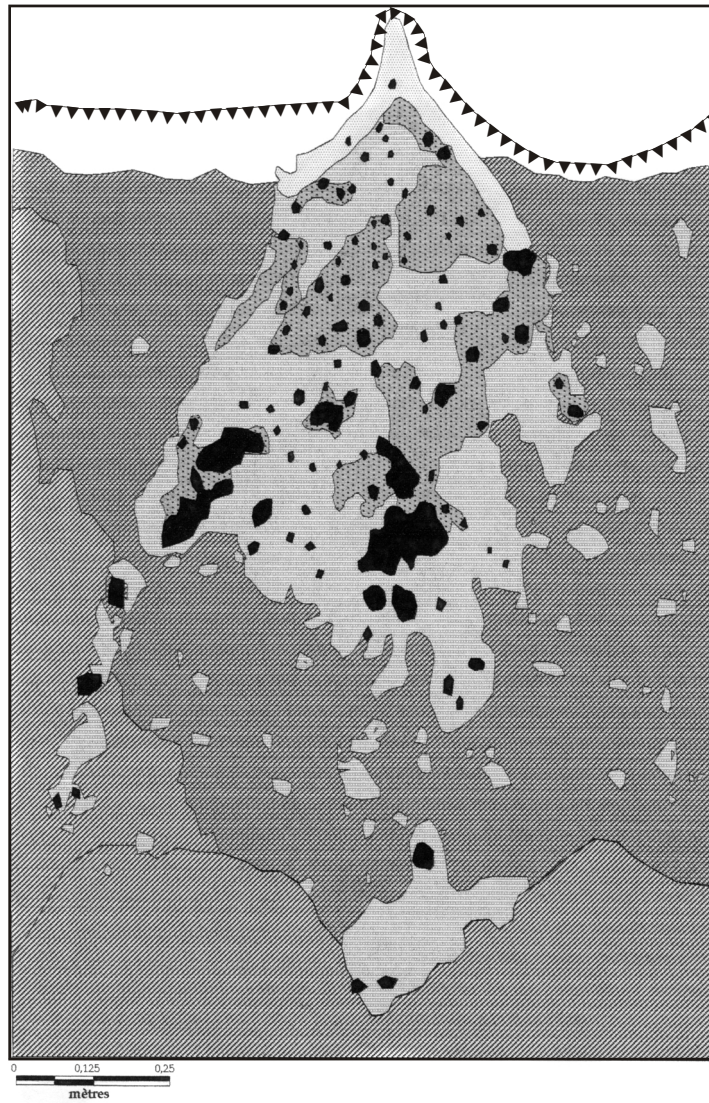
Le bombement central est légèrement déjeté sur la gauche. De gauche à droite on distingue :

Une petite partie déprimée, située au contact du flanc gauche du bombement axial. Il s'agit d'un chenal à matériaux mobiles, de granulométrie moyenne colonisé par *Centranthus angustifolius*.

Progressivement, le profil prend une allure convexe et la granulométrie devient plus grossière notamment dans la partie centrale du bombement. La présence de blocs décimétriques contribue à stabiliser le substrat et les petites plages colluviales à fines sont progressivement colonisées par la végétation. La densité végétale intervient fortement dans le processus de stabilisation progressive du dépôt.

On atteint ensuite une deuxième lanière graveleuse latérale, un peu moins déprimée que la précédente, à matériel récent et mobile.





Si un découpage tripartite est suggéré par la zonation longitudinale, la zonation transversale et la densité végétale soulignent plutôt l'existence d'un fonctionnement polyphasé. Au sein de la zone médiale, la présence de gros blocs et un ralentissement géodynamique ont contribué (Chapitre 8) à l'isolement fonctionnel du bombement axial. Cet isolement fonctionnel a favorisé la formation des chenaux à matériaux mobiles latéraux, situés au contact des zones apico-proximale et médiale (Carte 9). Ces chenaux constituent donc une quatrième partie qui vient s'ajouter au découpage tripartite originel. Ce polyphasage géodynamique est encore accentué par la colonisation végétale ligneuse et herbacée, qui contribue aussi à l'isolement fonctionnel de nombreuses plages colluviales à matériaux fins et grossiers (polyphasage phytologique).





Carte n°10 : Cartographie géodynamique et physionomique du cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil (2001)

Zonation géodynamique et physionomique

Zonation géodynamique

-  Secteur colluvial à patine grisâtre (recouvrement végétal < 10)
-  Secteur colluvial non patiné (recouvrement végétal < 10)
-  Piquetage herbacé sur secteur colluvial (recouvrement végétal > 10; < 50)
-  Piquetage arbustif sur secteur colluvial (recouvrement végétal > 10; < 50)

Zonation physionomique

-  Formation arbustive ou arborée
-  Forêt

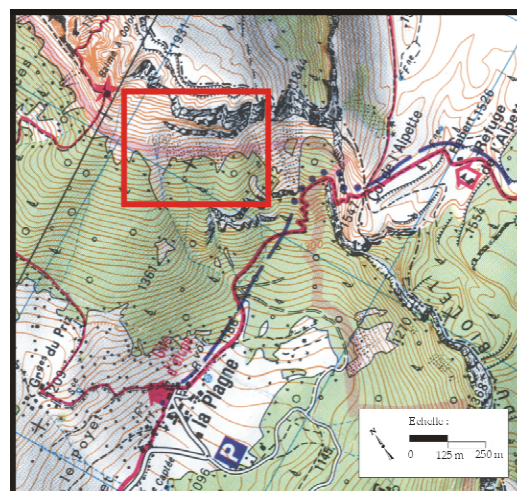
En terme de géodynamique, la photogrammétrie nous permet de confirmer l'existence d'un cône apical actif et de chenaux latéraux mobiles (Carte 10). Le bombement central et la zone distale sont visiblement plus stables (patine grisâtre des matériaux). Un processus de stabilisation du dépôt est amorcé ici dans les zones médiale et distale.

L'éco-complexe de l'Aulp du Seuil n'a jamais fait l'objet d'une exploitation pastorale au cours du siècle dernier. Il est classé en bois sur la période 1820-1960 (Cartes 3 et 4 et annexe A). Nous pensons aussi que son exploitation forestière a été quasiment nulle en raison de la présence d'une vaste forêt en contrebas qui ne devait certainement pas inciter les forestiers et les habitants à monter plus haut. Ces considérations sont plutôt favorables à notre hypothèse de départ et pourraient nous permettre de privilégier ici le rôle du réchauffement climatique.

1.5. L'éco-complexe de La Plagne

L'éco-complexe de La Plagne est situé sur le versant occidental du rebord oriental (Carte 5, chapitre 5). D'une largeur de 255 m, d'une surface de 5 ha et d'un dénivelé de 150 m (1500-1650), il est surplombé par deux escarpements séparés par une vire herbeuse. Le premier est une imposante corniche urgonienne dont le commandement oscille entre 75 et 100 m, le second, est un escarpement secondaire constitué par un affleurement marno-calcaire du Barrémien inférieur et pouvant atteindre 25 m de haut (Figure 34).

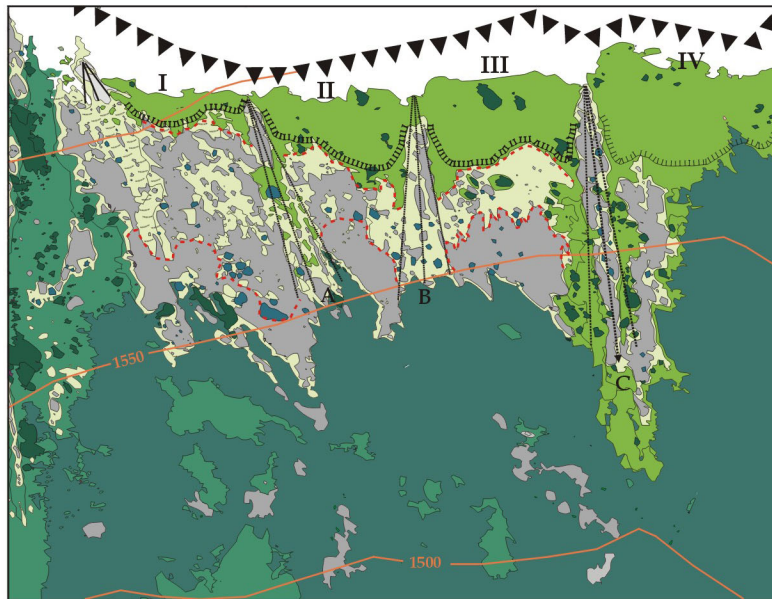
Figure 34 : Localisation de l'éco-complexe de La Plagne



Six types physiologiques composent la mosaïque biorhexistatique de La Plagne. La forêt périphérique est la plus vaste mais les formations de type prairie, îlots arbustifs et piquetage herbacé sont largement représentées sur le talus d'éboulis (Carte 11). La forme principale est un tablier d'éboulis dont les zonations longitudinale et transversale révèlent une structure géomorphologique complexe, fortement influencée par la présence végétale. L'éco-complexe de La Plagne est le versant à éboulis le plus végétalisé.

Transversalement, on distingue de l'ouest vers l'est quatre petits tabliers à développement végétal différent (Carte 11, I, II, III et IV), séparés par des petits cônes semi-végétalisés pénestables. Ce gradient végétal est aussi plus ou moins prononcé au niveau de la structure longitudinale. La présence des bombements apicaux herbeux, de dimension croissante de l'ouest vers l'est, entraîne un décalage progressif du granoclassement et une réduction de la surface échantillonnée.

Carte n°11 : Carte phyto-morphologique de La Plagne (2001)



Zone apico-proximale à matériaux fins

Zone médiale à matériaux hétérométriques

Zone distale à gros blocs

Sources : S. ARQUES, 2003

-Photographie aérienne, IGN, mission 2001 (couleurs naturelles), n°1129, 1/25 000.
 -Photographie oblique S. ARQUES (2003)
 -Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000, Top 25, OT 3334.




Légende :


Classes physiologiques :


Formation (s) ligneuse (s)

 Forêt


Formation (s) de transition


 Lande

 Ilot arbustif sur formation végétale herbacée et sous-arbustive

 Ilot arbustif sur éboulis

Formation (s) non boisée (s)


 Piquetage herbacé


 Prairie


Données géomorphologiques :


 Escarpement secondaire

 Zonation longitudinale


 Cône apical actif

 Cône pénestable

 Cône "raviné" pénestable

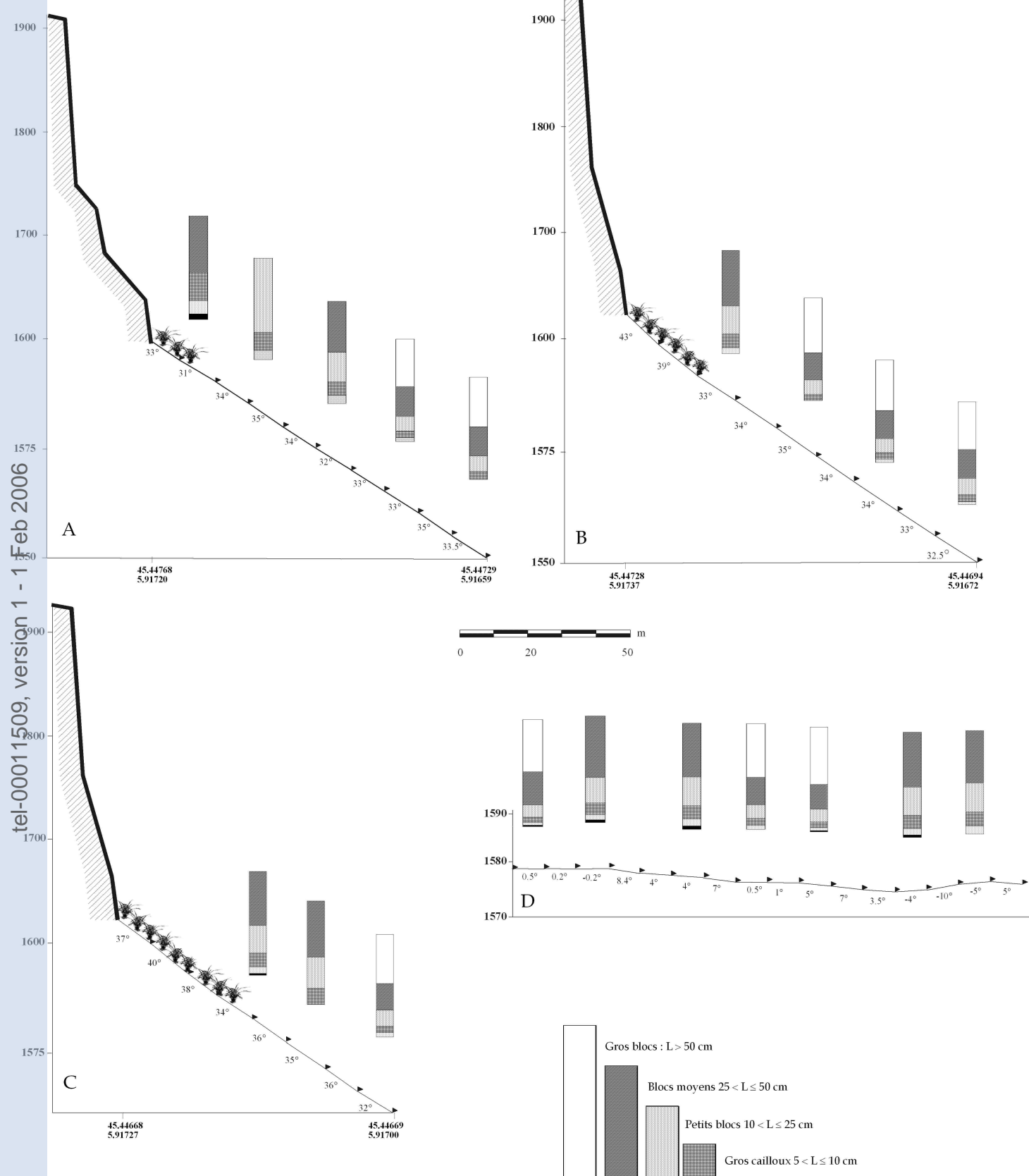
 Terrassette (sur micro-lave hydro-gravitaire active)

 Bombement apical à fines

 Secteur rhexistasique actif

 Secteur rhexistasique

 Non cartographié




tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2006

Figure 35: Granoclassement de surface : tablier de La Plagne

A, B, C Profils longitudinaux. D profil transversal.

Abcisses : localisation GPS (lat/long, WGS84).

Ordonnées : altitude en m.

 Prairie à *Calamagrostis varia* (bombements apicaux)

Un modèle de fonctionnement triphasé est assez net pour les tabliers II et III (Carte 11 et figure 35). Il est suggéré pour les tabliers I et IV qui relèvent plus d'un polyphasage géodynamique et phytologique. Comme pour le cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil, au sein de la zone « médiale », la densité végétale contribue à l'isolement fonctionnel de plages colluviales à matériaux moyens à grossiers.

Si l'on examine les segments extrêmes de la zonation longitudinale (Figure 35 A, B et C), les matériaux sont plus petits à l'amont et plus gros à l'aval pour les trois profils et les segments médians sont très hétérogènes. Nous renvoyons à la figure 16 pour la localisation des profils.

Dans le détail, on distingue (Figure 35 A, B et C et Carte 11) :

- des zones apico-proximales biostasiques, fortement inclinées qui se présentent sous la forme de bombements herbeux constitués d'une matrice fine et colonisés par *Calamagrostis varia*. L'escarpement secondaire (Barrémien inférieur) qui surplombe le tablier est soumis à des processus d'haloclastie¹ (Photo 3) qui permettent une alimentation régulière en éléments très fins (« farine de roche », BALLAIS, 1998). Son commandement est très faible dans la partie ouest du tablier (3 à 5 m contre 25 m à l'est) ce qui peut contribuer à expliquer le gradient végétal différent observé. Nous pensons qu'il fait office de « protection » contre l'arrivée des matériaux issus de l'éboulisation de l'escarpement principal. Cette « protection » est donc moins efficace dans cette portion du tablier et elle est croissante au fur et à mesure que l'on se décale vers l'est.



Photo 3 : Facettes de la paroi favorables à l'haloclastie (efflorescences de sels, en blanc)

Pour l'ensemble des trois profils, le granoclassement révèle une proportion importante de blocs moyens et secondairement de petits blocs (à l'exception du profil A), de gros cailloux et de petits cailloux. La matrice fine est peu abondante. Les mesures granulométriques n'ont pas été effectuées directement sur les bombements apicaux où la proportion de fines dépasse les 90% mais juste en dessous (Figure 35, A, B et C). Ce granoclassement peut s'expliquer par la présence de l'escarpement secondaire qui libère des fragments plus grossiers, emprisonnés dans la matrice marno-calcaire fine. Lorsqu'ils se détachent, ils roulent sur les bombements apicaux et viennent se

¹ Il s'agit d'un processus de fragmentation physique dû aux pressions développées dans les discontinuités de la roche (pores, diaclases) sous l'effet de l'apparition et de la croissance de cristaux de sel par suite de l'évaporation d'une solution saline (BALLAIS, 1998). Ce processus est peu fréquent en Chartreuse.

déposer et s'accumuler à leur base. Plus le bombement est long, plus le transit est long. Les fines sont issues d'un phénomène de lessivage qui s'exerce au niveau des bombements herbeux lors de précipitations.

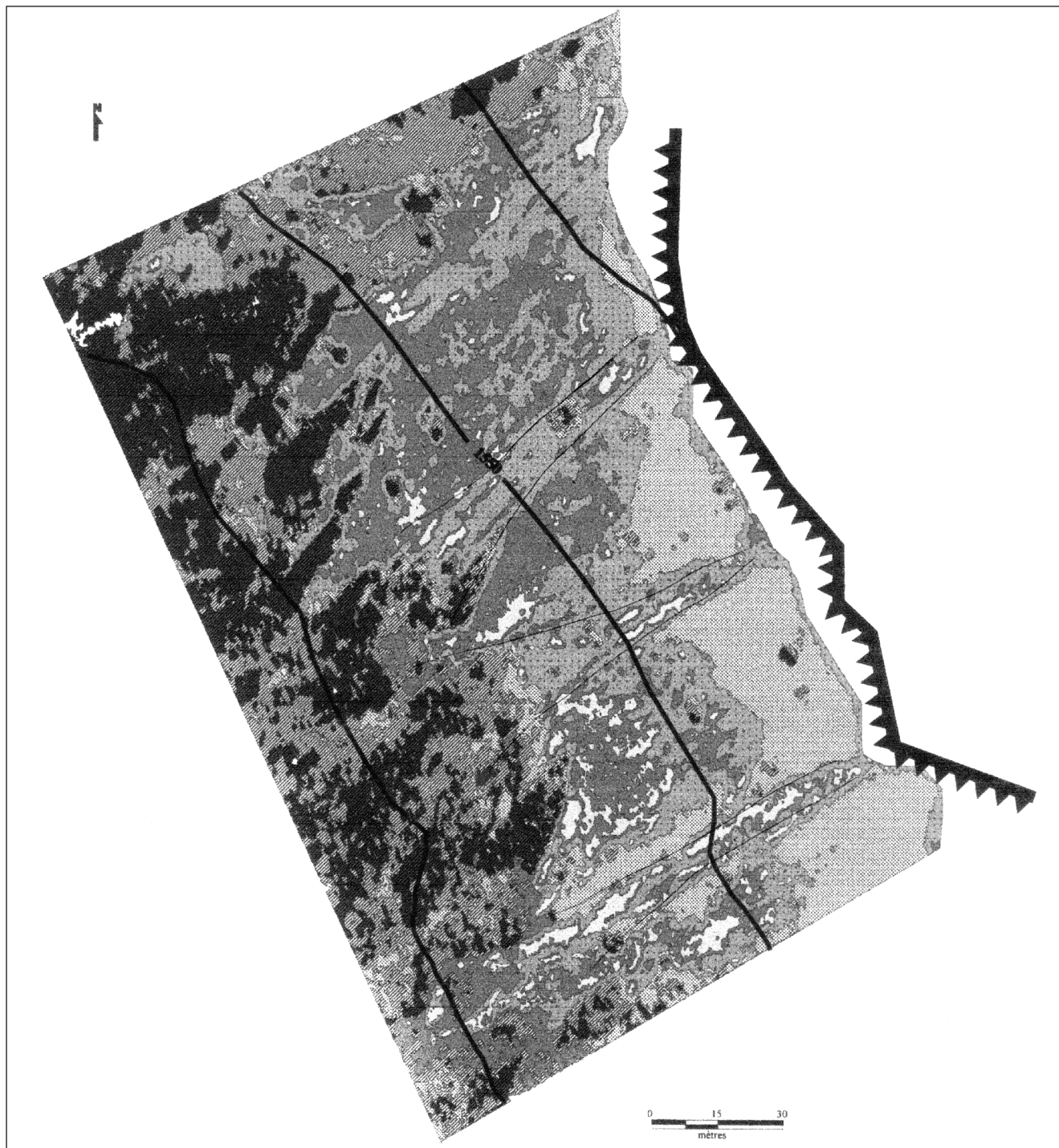
En raison de la présence d'une large vire herbeuse qui sépare les deux escarpements (25 m de large), les matériaux issus de l'ébouilisation de la corniche principale n'atteignent pas l'ensemble (ou pas immédiatement) de la zone apico-proximale du dépôt (à l'exception de la portion située plus à l'ouest et des cônes semi-végétalisés pénestables) mais profitent de ce plan de glissement pour se déposer plus loin au niveau des zones médiale et surtout distale. L'examen de la couleur de la patine (ocre clair) de la corniche principale indique que la portion la plus active se situe au-dessus de la zone A.

- des zones médiales hétérostasiques à *Centranthus angustifolius*, moins pentues, qui présentent un granoclassement légèrement plus grossier que celui de la zone apico-proximale pour les profils A et C. Le transit des blocs moyens et des petits blocs est ralenti par la densité végétale (Carte 11). Nous le verrons plus loin, les matériaux en transit sont bloqués par la présence de certaines espèces qui se développent sous forme de larges et robustes touffes. C'est notamment le cas de *Centranthus angustifolius* dont les individus peuvent atteindre 50 cm de haut sur 50 cm de large. Une densité importante de cette espèce a autant d'effet en terme de freinage géodynamique qu'un îlot arbustif. Le profil B présente une configuration différente. Si le secteur n'est pas directement soumis au processus d'ébouilisation de la corniche principale, il se situe dans le prolongement d'un pan de paroi de l'escarpement secondaire présentant une fissuration dense. Les petits éboulements sont fréquents, le dernier date du printemps 2004 (Photo 4). Cette configuration est à l'origine d'un granoclassement où dominent les gros blocs et les blocs moyens.



Photo 4 : Eboulement de l'escarpement secondaire du talus d'éboulis de La Plagne (printemps 2004).




Les matériaux ont entraîné dans leur chute un pin à crochets.






Carte 12 : Cartographie géodynamique et phytosomique du tablier d'éboulis de La Plagne (2002)

Zonation géodynamique et phytosomique

Zonation géodynamique

-  Secteur colluvial à patine grisâtre (recouvrement végétal <10)
-  Secteur colluvial non patiné (recouvrement végétal <10)
-  Piquetage végétal sur secteur colluvial (recouvrement végétal >10 ; <50)

Zonation phytosomique

-  Formation herbacée
-  Formation arbustive ou arborée
-  Forêt

- des zones distales rhexistasiques à gros blocs mais où la proportion de petits cailloux augmente. Ces zones reçoivent les fragments grossiers issus de l'ébouilisation des deux escarpements. Les petits cailloux proviennent essentiellement de l'escarpement secondaire, ils roulent sur les bombements herbeux et leur transit n'est pas interrompu par la densité végétale. Ils viennent se stocker ensuite entre les gros blocs. Les profils B et C présentent une plus grande proportion de petits cailloux car les plans de glissement des bombements herbeux sont plus longs.

La zonation transversale révèle un profil légèrement ondulé, incliné vers l'est. De l'ouest vers l'est, on distingue cinq zones (Figure 35, D).

Une partie rectiligne rhexistasique au contact d'un interfluve végétalisé (lande). La proportion de gros matériaux s'explique par la présence de gros blocs issus de petits éboulements antérieurs et qui sont aujourd'hui enchâssés dans la matrice fine. Ils proviennent de l'escarpement principal.

Progressivement, le profil traverse un secteur hétérostasique à terrassettes, localisé sur une petite lave hydro-gravitaire stabilisée, dans sa partie amont, par un piquetage herbacé et sous arbustif dense à *Thymus praecox*, *Globularia cordifolia*, *Sideritis hyssopifolia*, *Rumex scutatus* et *Leucanthemum adustum* (Carte 11). Il s'agit d'une coulée sèche (CARSON, 1977) assistée lors de sa mise en place par un certain degré de saturation hydrique acquis à l'occasion de séquences pluvieuses. Son alimentation se fait par « à-coup » comme en témoigne la présence d'un petit cône apical actif situé au contact de l'escarpement secondaire. La matrice est essentiellement constituée de graviers, terre fine, cailloux et petits blocs mais la présence en surface de blocs moyens en transit, masque le granoclassement sous-jacent. Sa terminaison basale active, est annuellement remaniée par la nivoreptation. A cet endroit, elle se sépare en deux petites coulées dont la matrice graveleuse avance progressivement et tend à recouvrir le secteur rhexistasique à matériaux grossiers.

Le tablier prend ensuite une allure concave et présente un granoclassement identique au secteur précédent. Le profil traverse préalablement une portion rhexistasique, pour se terminer au sein d'un secteur à piquetage herbacé dense à *Centranthus angustifolius* où pointent de nombreux blocs moyens. Quelques mètres plus loin, le granoclassement confirme la présence d'une matrice à gros blocs caractéristique de la zone médiale du secteur B. Au sein du cône pénestable, à piquetage herbacé et arbustif, la proportion de fines augmente.

Au sein du secteur C et au contact de l'interfluve situé à l'est, le granoclassement présente une structure similaire à celui des bordures ouest du tablier. Les proportions de blocs moyens et petits blocs augmentent rapidement.

Le profil longe la bordure aval rhexistasique de la formation à piquetage herbacé, là où se concentrent les blocs moyens provenant de l'ébouilisation de l'escarpement secondaire. Au contact de l'interfluve est, le degré de végétalisation est très prononcé ce qui contribue à diminuer la surface occupée par le secteur rhexistasique et à isoler des plages à fractis grossiers.

La photogrammétrie réalisée à grande échelle permet une première appréciation de la géodynamique du tablier d'ébouil (Carte 12). A cette échelle, il semble être assez stable. Paradoxalement, les secteurs colluviaux non patinés, donc supposés être plus actifs, se concentrent essentiellement à l'est du tablier d'ébouil, là où la densité végétale est importante. Ils ne sont pas continus et couvrent de petites surfaces. L'escarpement secondaire à connu, à cet endroit, un éboulement qui a emporté le sommet de la corniche sur environ une vingtaine de mètres de large. La cicatrice, qui se distingue du reste de l'escarpement par sa couleur ocre, est marquée par

l'absence du pin à crochet dont les individus, qui poussaient en bordure d'escarpement, ont été expulsés au moment de la chute. Comme pour l'éboulement de 2004 (Photo 4), les matériaux présents en aval du bombement apical sont de granulométrie grossière et de couleur ocre (secteurs colluviaux non patinés, carte 12). L'étude des cicatrices d'impact réalisée par LAURENT (2004), sur les ligneux du tablier, confirme ce phénomène et permet de dater l'éboulement aux alentours de 1998. Avant 1998, cette portion du tablier était relativement stable en terme de cicatrices d'impact sur la population ligneuse. Depuis, la fracturation de la roche a contribué à favoriser la sensibilité de cette facette de la paroi à l'éboulisation et l'absence des pins à crochets permet aux matériaux, issus de l'éboulisation de l'escarpement principal, d'atteindre plus facilement cette portion du tablier.

Finalement, le tablier de La Plagne présente un modèle de fonctionnement épidermique complexe, triphasé ou polyphasé, où l'existence d'une zone médiale résulte d'une phase morphogénique postérieure à la mise en place du dépôt. Celle-ci est fortement conditionnée par le degré de végétalisation et l'apport ponctuel de gros blocs, qui participent conjointement à un processus de stabilisation.

Contrairement au cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil, la zonation transversale du tablier de La Plagne n'est pas très significative. Si elle confirme, très légèrement, l'existence d'une matrice plus fine en bordure du tablier, elle fait un peu double emploi avec les informations issues de l'analyse des segments de profil longitudinaux, effectués dans le tiers médian du tablier. Concrètement, nous pensons que le modèle de fonctionnement transversal, décrit par WILSON (1990) et ROVERA (1900) et confirmé dans le cas du cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil, n'est pas applicable ici. Ce type de fonctionnement est fortement lié à la présence d'un cône d'alimentation apical et d'un bombement central axial qui assurent une redistribution des matériaux plus fins sur les bordures.

En revanche, un autre type de modèle de fonctionnement transversal aurait pu être mis en évidence, en augmentant la résolution des profils topo-sédimentologiques (au pas de 1 m) lors de la traversée des cônes allongés pénestables (A, B et C, carte 11). Une analyse plus fine de ces cônes aurait contribué à approfondir l'étude du fonctionnement polyphasé du tablier. D'autre part, elle aurait aussi permis de mettre en évidence une partition transversale particulière qui ne peut se voir qu'au niveau de chaque cône allongé et qui sert potentiellement de corridors pour la colonisation végétale (cône « raviné » C, carte 11).

En ce qui concerne l'anthropisation de l'écocomplexe, en 1729, il était répertorié en « Bois taillis »¹. La commune d'Épernay, les hameaux de La Plagne et de la Grenery étaient propriétaires des parcelles. Nous pouvons donc supposer que les habitants effectuaient régulièrement quelques coupes de bois. De 1820 à 1914, il a fait l'objet d'une exploitation pastorale régulière² (Cartes 3 et 4, détails en annexe A). Les deux parcelles initiales ont été divisées en de multiples parcelles appartenant à des propriétaires privés. Les jeunes pousses arbustives étaient certainement pâturées par les ovins et les caprins mais il est aussi fortement probable que les prélèvements de petits bois se soient poursuivis jusqu'en 1914.

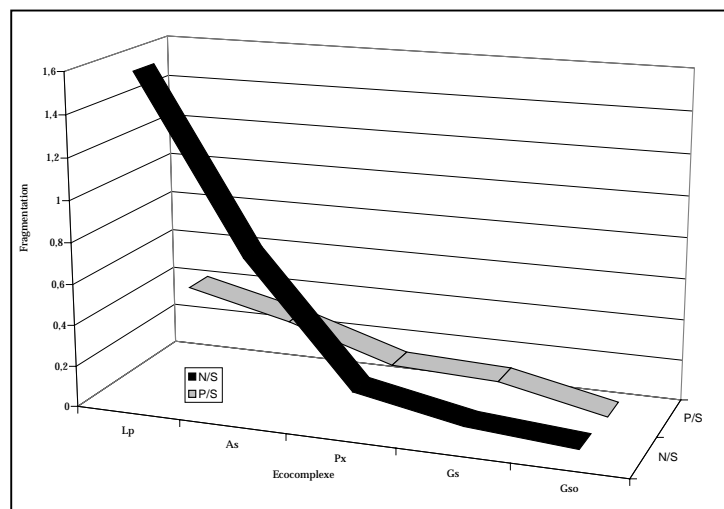
1.6. Analyse spatiale comparée de la fragmentation du type physiologique « secteur rhexistasique »

L'utilisation des rapports *P/S* « *périmètre par unité de surface* » et *N/S* « *nombre de taches par unité de surface* » nous permet d'apprécier les degrés relatifs de fragmentation des mosaïques

¹ Mappede Sarde, commune d'Entremont-le-Vieux, parcelles n° 1587 et 1592.

² Annexe A, commune d'Entremont-le-Vieux, section F2 (parcelles n°).

biorhexistasiques d'éboulis. Appliqués aux secteurs rhexistasiques, ils révèlent ici les degrés de végétalisation et les structures phyto-morphologiques complexes des différents écosystèmes. Les deux indices sont relativement bien concordants et soulignent chacun un degré relatif de fragmentation (Graphique 19).



Graphique 19 : Degrés de fragmentation des secteurs rhexistasiques.

Lp : La Plagne
As : Aulp du Seuil
Px : Pelloux
Gs : Grande Sure
Gso : Grand Som

Le rapport N/S accentue les différences entre les écosystèmes et isole nettement les secteurs rhexistasiques de La Plagne et de l'Aulp du Seuil. Effectivement, visuellement, la structure interne des secteurs rhexistasiques de ces deux écosystèmes semble être très fragmentée. Le rapport P/S présente une amplitude beaucoup plus faible mais confirme la tendance observée précédemment.

Cette première approche spatiale de la structure des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis, souligne le caractère assez complexe des structures phyto-morphologiques des écosystèmes, en fonction de la forme rencontrée et du degré de végétalisation observé. D'autre part, les données historiques concernant l'évolution de l'occupation des sols, mettent en évidence une anthropisation différente dont l'activité s'arrête pour la plupart des écosystèmes en 1914. Dans l'optique de préciser et distinguer les effets potentiels de la déprise sylvo-pastorale et du réchauffement climatique sur les trajectoires d'évolution végétale et géomorphologiques des écosystèmes, il convient maintenant de s'intéresser aux mosaïques biorhexistasiques sous un angle dynamique. Cette approche nous permettra de mieux comprendre les structures actuelles des différentes mosaïques biorhexistasiques et d'isoler certains paramètres explicatifs.

II. Analyse dynamique des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis

La colonisation végétale observée des différents écosystèmes n'est pas homogène, ni dans l'espace, ni dans le temps. L'exploitation qualitative et quantitative des différentes cartes d'états successifs et du diachronisme va nous permettre de caractériser la nature et les modalités du processus. L'examen précis de l'évolution végétale des différents écosystèmes sur un siècle ou un demi-siècle devrait nous permettre à terme de préciser les rôles respectifs de l'homme et du climat.

Pour analyser l'évolution de la structure des mosaïques biorhexistasiques, plusieurs paramètres et indices vont être utilisés. Chacun se révèle être riche en enseignements. Outre l'évolution des surfaces, nous nous intéresserons aussi à l'évolution des périmètres et du nombre de taches des différentes unités physiologiques biorhexistasiques. Puis les indices de l'écologie du paysage nous permettront de caractériser la structure plus ou moins diversifiée et complexe des écosystèmes.

2.1. L'évolution de la structure de l'écosystème de la Grande Sure

L'analyse quantitative et qualitative des trajectoires d'évolution de la structure de l'écosystème de la Grande Sure, repose sur la carte 13 qui illustre les états successifs d'évolution de la mosaïque biorhexistasique, sur la période 1956-2003. La carte 14 synthétise l'évolution diachronique sur le demi-siècle.

2.1.1. Etat de la mosaïque biorhexistasique en 1956

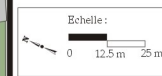
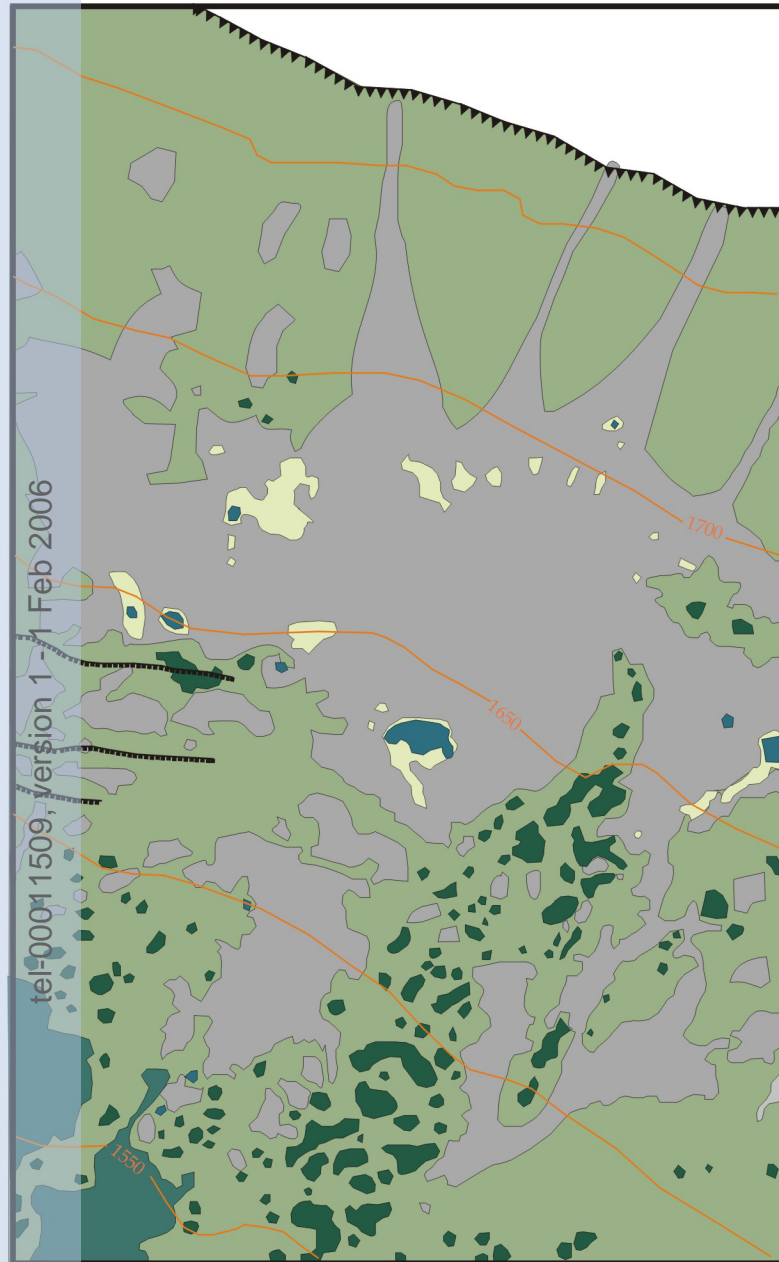
L'état de la mosaïque biorhexistasique en 1956 se caractérise par une forte hétérogénéité (Carte 13, tableau 8). La répartition des types physiologiques montre :

- la surface importante occupée par des formations herbacées biostasiées, de type « pelouse », en périphérie du talus d'éboulis;
- une fragmentation notable des formations de transition de type « îlot arbustif sur formation végétale herbacée »;
- l'absence d'un front forestier dense;
- l'installation progressive d'un piquetage herbacé au sein du talus d'éboulis qui semble annoncer un début de colonisation du dépôt;
- un secteur rhexistasique fortement représenté.

Tableau 8 : Surface occupée par les unités physiologiques en 1956

Type physiologique	Surface (ha)
Pelouse	5,62
Secteur rhexistasique	3,22
Ilot arbustif sur formation végétale	0,289
Forêt	0,247
Piquetage herbacé	0,135
Ilot arbustif sur éboulis	0,026
Total	9,537

1956





Sources : S. ARQUES, 2003
 -Photographie aérienne, IGN, mission 1956 (noir et blanc), n°237, 1/30 000°.
 -Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000°, Top 25, OT 3334.

2003



Sources : S. ARQUES, 2003
 -Photographie aérienne, IGN, mission 2003 (couleurs naturelles), n°2345, 1/25 000°.
 -Photographie oblique S. ARQUES (2003)
 -Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000°, Top 25, OT 3334.

Légende :


-  Corniche principale (calcaire urgonien)
-  Escarpement secondaire

Formation (s) ligneuse (s)

 Forêt

Formation (s) de transition


 Ilot arbustif sur formation végétale herbacée

 Ilot arbustif sur éboulis

Formation (s) non boisée (s)

 Piquetage herbacé

 Pelouse

 Secteur rhexistasique stabilisé

 Non cartographié

2.1.2. Etat de la mosaïque biorhexistasique en 2003

En 2003, l'hétérogénéité¹ tend à diminuer (Carte 13, tableau 9). La répartition des types physiologiques révèle :

- le maintien de surfaces élevées pour les types « pelouse » et « secteur rhexistasique »;
- l'importance du couvert forestier à l'est de l'éco-complexe;
- un piquetage herbacé plus prononcé sur éboulis;
- une réduction de la surface occupée par la formation de transition « îlot arbustif sur formation végétale herbacée (pelouse) ».

Tableau 9 : Surface occupée par les unités physiologiques en 2003

Type physiologique	Surface (ha)	Fréquence (%)
Secteur rhexistasique	2,879	38,4
Pelouse	1,864	25
Forêt	1,822	24,3
Piquetage herbacé	0,768	10,2
Ilot arbustif sur formation végétale	0,096	1,2
Ilot arbustif sur éboulis	0,052	0,6
Total	7,481	

2.1.3. Evolution de la végétation entre 1956 et 2003 : les enseignements du diachronisme

La carte diachronique obtenue par croisement des états successifs de la mosaïque biorhexistasique, permet de préciser les phases d'évolution des différents types physiologiques (Carte 14). Elle révèle un phénomène de colonisation végétale généralisé en périphérie et au sein du talus d'éboulis.

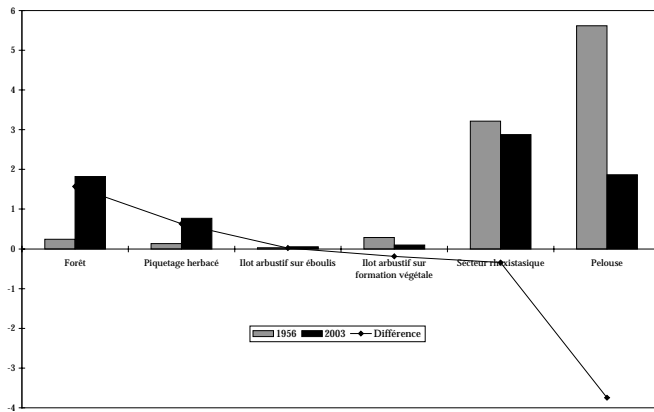
2.1.3.1. L'évolution des surfaces occupées par les types physiologiques entre 1956 et 2003

Le tableau 10 et le graphique 20 résument l'évolution de la surface relative des unités cartographiées sur près d'un demi-siècle (47 ans).

Tableau 10 : Evolution de la surface des types physiologiques entre 1956 et 2003

Type physiologique	Surface (ha)		Différence (ha)
	1956	2003	
Forêt	0,247	1,822	1,57
Piquetage herbacé	0,135	0,768	0,63
Ilot arbustif sur éboulis	0,026	0,052	0,02
Ilot arbustif sur formation végétale	0,289	0,096	-0,19
Secteur rhexistasique	3,22	2,879	-0,34
Pelouse	5,62	1,864	-3,75

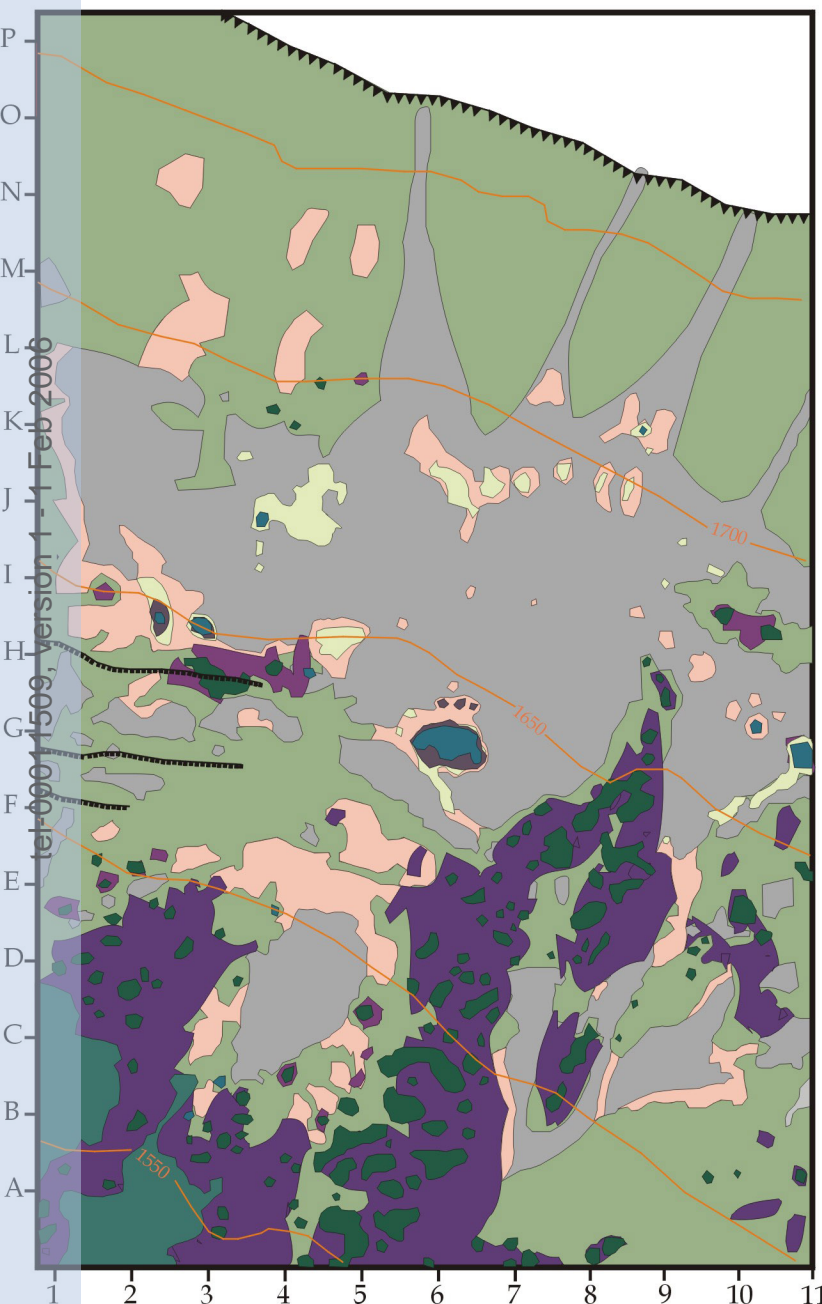
¹ Au sens large du terme et non en référence à l'écologie du paysage.





Graphique 20 : Evolution de la surface occupée par les types physionomiques entre 1956 et 2003.

La forêt dont la couverture était presque inexistante en 1956 enregistre la plus forte évolution sur la période 1956-2003. Cette densification importante du couvert forestier s'est réalisée au détriment de la pelouse et des formations de transition arbustives (succession physionomique classique), dont les surfaces ont fortement diminué. Cette évolution du couvert forestier peut être attribuée à une diminution de la pression pastorale, les bovins sont moins nombreux et ne pâturent plus dans ce secteur depuis quelques décennies. Au sein du secteur rhexistatique et notamment sur le talus d'éboulis vif, la surface occupée par le piquetage herbacé a été multipliée par cinq au cours des 47 dernières années. Les portions végétalisées initiales ont progressé dans la zone apico-proximale (Carte 14 : 6-9 J) et de nouveaux îlots sont apparus au sein de la zone médiale (I 6-7) et au sud du dépôt (H-I 8; H-I 9; H 10). Ceci traduit une réduction de l'activité des petits cônes apicaux et une stabilisation de la portion de la zone distale, située dans l'axe des secteurs à piquetage herbacé de la zone apico-proximale. Parallèlement, la colonisation ligneuse arbustive du dépôt a légèrement progressé (G6; H-I2) et les semenciers ont donné naissance à de nouveaux individus en zone distale (H-G6). La structure de la mosaïque biorhexistatique a aussi subi quelques changements depuis 1956.

Carte n° 14 : Evolution de la physionomie végétale du talus d'éboulis de la Grande Sure (versant occidental) entre 1956 et 2003.









Légende :







-  Corniche principale (calcaire urgonien)
-  Escarpement secondaire

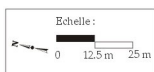
Classes physionomiques et dynamiques

Formations présentes en 1956

- Formation (s) ligneuse (s)
 -  Forêt
- Formation (s) de transition
 -  Ilot arbustif sur formation végétale herbacée
 -  Ilot arbustif sur éboulis
- Formation (s) non boisée (s)
 -  Piquetage herbacé
 -  Pelouse
- Secteurs faiblement végétalisés
 -  Secteur rhexistasique stabilisé

Formations développées entre 1956 et 2003

- Formation (s) ligneuse (s)
 -  Forêt
- Formation (s) de transition
 -  Ilot arbustif sur formation végétale herbacée
 -  Ilot arbustif sur éboulis
- Formation (s) non boisée (s)
 -  Piquetage herbacé
 -  Pelouse
- Non cartographié
 - 



Sources : ARQUES, 2003.

- Photographie aérienne, IGN, mission 1956 (noir et blanc), n°237, 1/30 000° (env.).
- Photographie aérienne, IGN, mission 2003 (couleurs naturelles), n°2345, 1/25 000°.
- Photographie oblique S. ARQUES (2003).
- Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000 °, Top 25, OT 3334.

2.1.3.2. L'évolution de la structure de la mosaïque biorhexistasique

A. L'évolution des périmètres des unités physiologiques

Le périmètre des unités physiologiques évolue en même temps que leur surface (Tableaux 10 et 11). Les trois types physiologiques qui ont enregistré une augmentation de leur surface sur la période 1956-2003, ont vu leur périmètre augmenter simultanément. Il s'agit des types « piquetage herbacé, forêt et îlot arbustif sur éboulis ». Et inversement, pour les trois autres types physiologiques. Les types « piquetage herbacé et îlot arbustif sur éboulis » ont connu une progression par petites taches isolées ce qui contribue à faire augmenter rapidement leur périmètre. La forêt enregistre la plus forte progression sur la période et sur une très grande surface. Ce qui se traduit par une augmentation conséquente de son périmètre.

Tableau 11 : Evolution des périmètres des unités physiologiques entre 1956 et 2003

Type physiologique	Périmètre (m)		Différence (m)
	1956	2003	
Piquetage herbacé	722,5	2762,5	2040
Forêt	350	1780	1430
Îlot arbustif sur éboulis	162,5	227,5	65
Secteur rhexistasique	4472,5	3717,5	-755
Pelouse	4260	3215	-1045
Îlot arbustif sur formation végétale	2165	457,5	-1707,5

En termes de complexification et d'hétérogénéité de la mosaïque, les valeurs du rapport « périmètre/surface » nous amènent à distinguer trois cas, évoqués par FELTGEN-DIDIER (1998) (Tableau 12) :

-Périmètre et surface augmentent mais le rapport « périmètre/surface » diminue : cela signifie que le périmètre augmente moins vite que la surface et qu'il y a une simplification des contours. C'est le cas de la forêt et des îlots arbustifs sur éboulis. A noter le cas particulier du type « piquetage herbacé » qui théoriquement devrait appartenir à ce cas mais dont l'évolution montre plutôt une complexification des contours et une progression sous forme d'une « régularisation » du tracé des lisières.

-Périmètre et surface diminuent et le rapport « périmètre/surface » diminue : cela traduit une simplification des contours par régression, le périmètre diminuant ici plus vite que la surface. C'est le cas des îlots arbustifs sur pelouse, présents sous forme de nombreuses petites taches en 1956, dont le rapport « périmètre/surface » était plus élevé mais qui ont disparu, par fusion, au profit de la forêt. Le secteur rhexistasique a lui aussi connu une régression rapide de son périmètre et une simplification de ses contours au profit du piquetage herbacé qui s'étend progressivement à partir de sources déjà présentes en 1956.

-Périmètre et surface diminuent mais le rapport « périmètre/surface » augmente : ici, le périmètre diminue moins vite que la surface. Cela traduit une fragmentation et/ou une complexification des contours, par régression. C'est le cas de la pelouse, dont la fragmentation et la complexification des contours ont augmenté sur la période 1956-2003, sous l'effet d'un recouvrement forestier important à l'est de l'écosystème.

Tableau 12 : Evolution du rapport « périmètre/surface » des unités physiologiques, entre 1956 et 2003

Type physiologique	P/S		Différence
	1956	2003	
Piquetage herbacé	0,53	0,35	-
Forêt	0,14	0,09	-
Ilot arbustif sur éboulis	0,62	0,43	-
Secteur rhexistasique	0,13	0,12	-
Pelouse	0,07	0,17	+
Ilot arbustif sur formation végétale	0,74	0,47	-

L'évolution du nombre de taches sur la période 1956-2003 permet de préciser la tendance à la fragmentation ou au « colmatage » des unités physiologiques de la mosaïque.

B. Evolution du nombre de taches

Le nombre de taches de pelouse a presque triplé entre 1956 et 2003 (Tableau 13). Cela est dû à la progression du couvert forestier qui a engendré une fragmentation de la pelouse à l'est du dépôt et non à un développement de ce type physiologique sous forme de petites taches. De plus, cette évolution du couvert forestier a contribué à diminuer la surface occupée par la pelouse depuis 1956.

Le nombre de taches forestières augmente lui aussi considérablement. Cependant, la fragmentation n'est pas très importante car il y a eu une fusion rapide des taches du type « îlot arbustif sur formation végétale » et non une progression sous forme de petites taches boisées isolées. La structure de cette portion de l'éco-complexe était plus fragmentée en 1956 en raison de la présence d'une multitude d'îlots arbustifs, dont le nombre a considérablement diminué depuis 1956 au profit d'un couvert forestier stable et dense (Tableau 13).

Tableau 13 : Evolution du nombre de taches par unité physiologique, entre 1956 et 2003

Type physiologique	Nombre de taches		Différence
	1956	2003	
Pelouse	8	23	15
Forêt	2	12	10
Piquetage herbacé	22	24	2
Ilot arbustif sur éboulis	8	8	0
Secteur rhexistasique	43	25	-18
Ilot arbustif sur formation végétale	133	32	-101

Le piquetage herbacé et le type « îlot arbustif sur éboulis » enregistrent une progression par « capillarité » et non sous forme de taches, ce qui explique la faible évolution constatée sur l'ensemble de la période. Le secteur rhexistasique montre une régression du nombre de taches dont la plupart ont été « colmatées » par le piquetage herbacé et la pelouse.

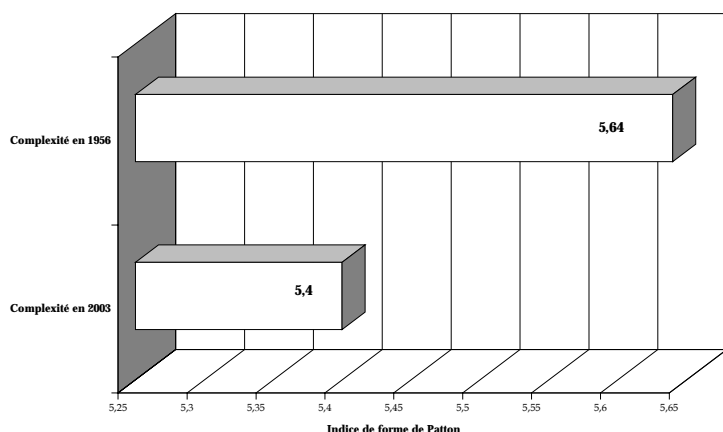
La tendance générale montre que la mosaïque biorhexistasique de la Grande Sure est moins fragmentée en 2003. Mais cet état est loin d'être figé. Il est possible qu'elle évolue progressivement vers une stabilité physiologique par fusion et/ou « colmatage » des taches existantes au sein des formations biostasiques et/ou rhexistasiques. Ou inversement, qu'elle connaisse une nouvelle phase de fragmentation sous l'effet d'une densification du piquetage herbacé sur secteur rhexistasique, sous forme de multiples petites taches.

Les indices de complexité et de diversité spatiale permettent de synthétiser et de mesurer l'impact paysager des évolutions structurelles observées précédemment, sur la mosaïque biorhexistasique. Même s'il convient d'interpréter ces indices avec prudence et de relativiser les résultats obtenus en

terme de représentativité, nous sommes toutefois en mesure de les comparer aux résultats issus des analyses précédentes.

C. L'évolution de la complexité de la mosaïque biorhexistatique entre 1956 et 2003 :
l'indice de forme de Patton

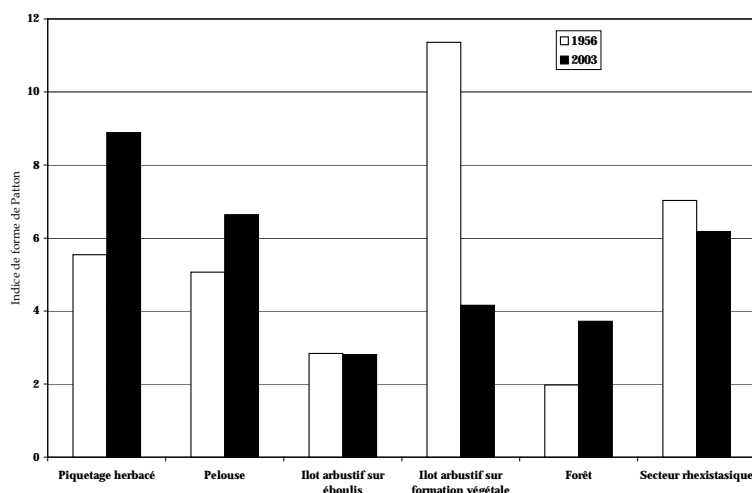
Dans l'optique de réduire l'amplitude des valeurs entre les différents types physiologiques, les taches dont la surface est inférieure à 25m² ont été exclues des calculs. Nous avons donc fait abstraction des plus petites taches mais nous avons veillé à conserver les proportions entre les types physiologiques.



Graphique 21 : Evolution de la complexité globale de la mosaïque biorhexistatique de la Grande Sure, entre 1956 et 2003.

Conformément à la tendance générale observée précédemment, en termes de diminution de la fragmentation et de simplification des contours des taches des types physiologiques, la complexité globale (moyenne de la complexité de toutes les taches \geq à 25 m²) de la mosaïque biorhexistatique de la Grande Sure diminue entre 1956 et 2003 (Graphique 21). Cette diminution s'explique en partie par la fusion des multiples petites taches qui constituaient en 1956 le type « îlot arbustif sur formation végétale », au profit d'une densification du couvert forestier (Graphique 22).

Graphique 22 : Evolution de la complexité des types physiologiques entre 1956 et 2003



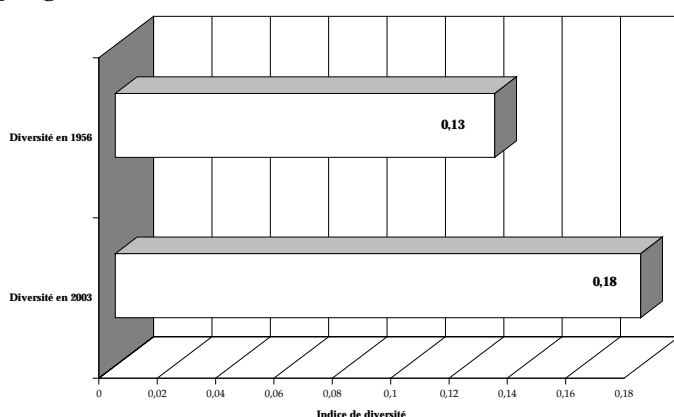
La régression des formations de transition arbustives sur pelouse est tellement importante qu'elle masque l'évolution positive de la complexité des autres types physiologiques (Graphique 22). La complexité des taches « piquetage herbacé » et « forêt » augmente, sous l'effet de l'apparition de contours plus sinueux. La fragmentation de la pelouse par le développement du couvert forestier

contribue simultanément à augmenter sa complexité. La complexité des îlots arbustifs sur éboulis diminue, sous l'effet de l'apparition de petites taches dont les contours graphiques sont plus simples. Enfin, les unités du secteur rhexistasique, en se rétractant sous l'effet d'un « colmatage » des lisières et un lissage des périphéries, par le piquetage herbacé et la pelouse, prennent des formes plus simples ce qui induit une diminution de leur complexité.

La complexité et la fragmentation de la mosaïque biorhexistasique de la Grande Sure ont diminué entre 1956 et 2003. Dans le détail, la régression du type « îlot arbustif sur formation végétale » « parasite » sans aucun doute l'évolution globale.

D. La diversité spatiale de la mosaïque biorhexistasique

La mosaïque biorhexistasique est légèrement plus diversifiée en 2003 (Graphique 23). Le calcul de l'indice étant basé sur le rapport des surfaces occupées par les types physiologiques sur le nombre total d'unités de l'éco-complexe, sa valeur en 2003 s'explique essentiellement par la progression du couvert forestier.



Graphique 23 : Evolution de la diversité spatiale globale, entre 1956 et 2003.

Si la colonisation végétale observée au sein des différents éco-complexes est susceptible de conduire progressivement à une homogénéisation, voire une fermeture paysagère, des mosaïques biorhexistasiques, il semble que le seuil ne soit pas encore atteint pour l'éco-complexe de la Grande Sure.

2.2. L'évolution de la structure de l'éco-complexe du Grand Som

Les trajectoires d'évolution de la structure de la mosaïque biorhexistasique du Grand Som sont analysées sur trois périodes : 1920, 1956 et 2001. L'analyse qualitative et quantitative repose sur la carte 15 qui illustre les états successifs d'évolution de la mosaïque et les cartes 16 et 17 qui synthétisent l'évolution diachronique sur 81 ans.

2.2.1. Etat de la mosaïque en 1920

L'état de la mosaïque biorhexistasique en 1920 se caractérise par la présence de trois principales unités structurantes : le secteur rhexistasique stabilisé, la forêt et la prairie (Carte 15, tableau 14). Cette configuration souligne une certaine monotonie de la mosaïque et une structure relativement simple.

Le secteur rhexistasique stabilisé occupe la plus grande surface. Il est bordé par deux formations périphériques denses : une prairie au nord et à l'ouest et une forêt au sud et au sud-ouest. Il est aussi présent au sein de ces deux formations sous forme de nombreuses petites taches.

Tableau 14 : Surface occupée par les types physiologiques en 1920

Type physiologique	Surface (ha)	Fréquence (%)
Secteur rhexistasique stabilisé	4,43	44,3
Forêt	3,32	33,2
Prairie	1,50	15
Secteur rhexistasique actif	0,34	3,4
Pelouse	0,27	2,7
Ilot arbustif sur éboulis	0,10	1
Ilot arbustif sur formation végétale	0,01	0,1
Total	10	

Contrairement à ce que nous avons pu observer pour la Grande Sure, le front forestier est ici très présent et couvre une vaste surface au sein du secteur rhexistasique. Le secteur rhexistasique actif occupe une surface limitée à l'est de l'éco-complexe, au sein de la zone apico-proximale du talus d'éboulis. La pelouse est présente mais de manière ponctuelle sous forme de petits lambeaux au nord et d'un îlot plus vaste, en zone distale du talus. Les formations de transition arbustives couvrent de faibles surfaces et colonisent de manière sporadique les bordures du secteur rhexistasique. La mosaïque biorhexistasique du Grand Som en 1920 est marquée par une absence de piquetage herbacé sur secteur rhexistasique, l'essentiel des formations végétales s'est développé à l'ouest d'un axe nord-sud.

2.2.2. Etat de la mosaïque biorhexistasique en 1956

En 1956, l'hétérogénéité tend à augmenter avec notamment l'apparition d'un piquetage herbacé au sein du secteur rhexistasique stabilisé (Carte 15, tableau 15).

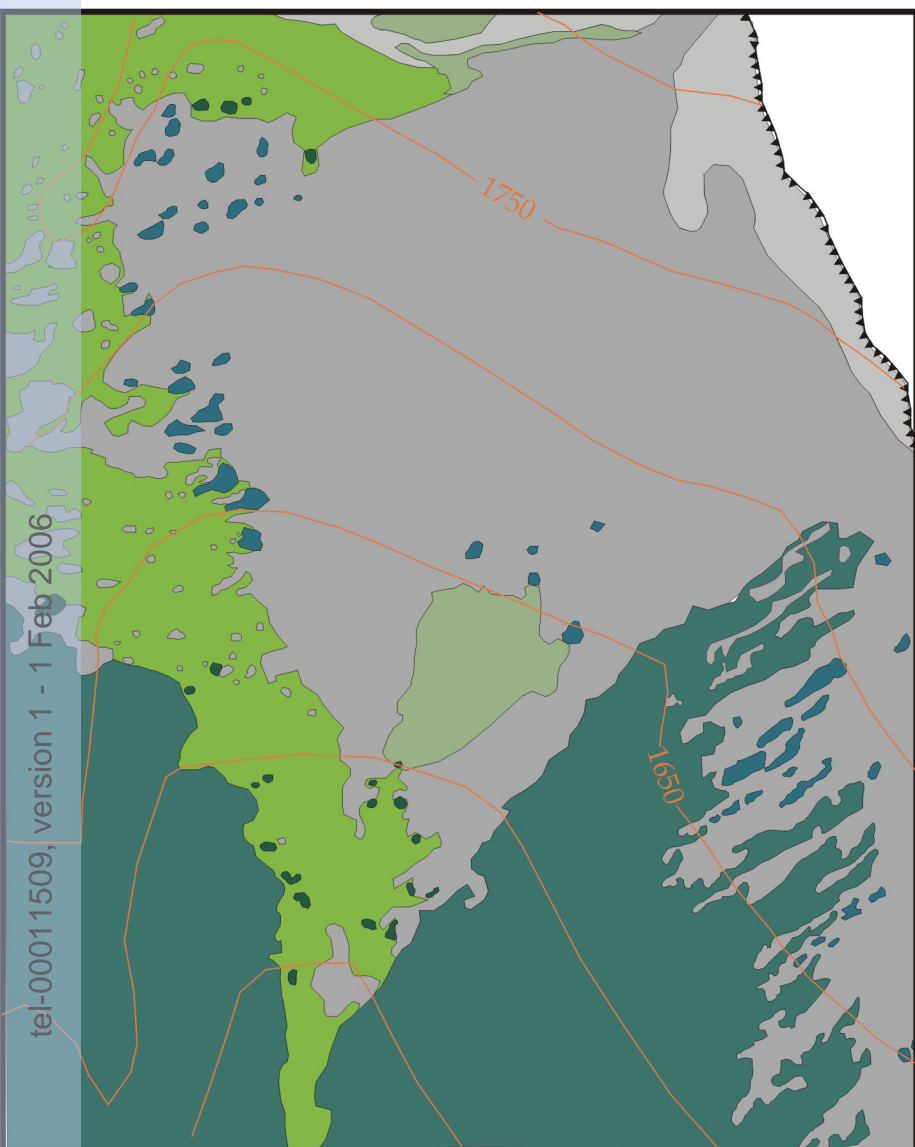
Tableau 15 : Surface occupée par les types physiologiques en 1956

Type physiologique	Surface (ha)	Fréquence (%)
Secteur rhexistasique stabilisé	4,39	45
Forêt	3,32	34
Prairie	1,34	13,6
Pelouse	0,27	2,7
Piquetage herbacé	0,21	2,1
Ilot arbustif sur éboulis	0,11	1,1
Secteur rhexistasique actif	0,08	0,8
Ilot arbustif sur formation végétale	0,07	0,7
Total	9,79	

La répartition des types physiologiques montre :

- le maintien des surfaces élevées pour les types « secteur rhexistasique stabilisé, forêt et prairie »;
- une stagnation du type « pelouse »;
- la multiplication des îlots arbustifs sur prairie au nord et à l'ouest de l'éco-complexe;
- la présence d'un piquetage herbacé dense, sur secteur rhexistasique stabilisé, au nord;
- une régression du secteur rhexistasique actif au profit du piquetage herbacé dans la zone apico-proximale du talus.

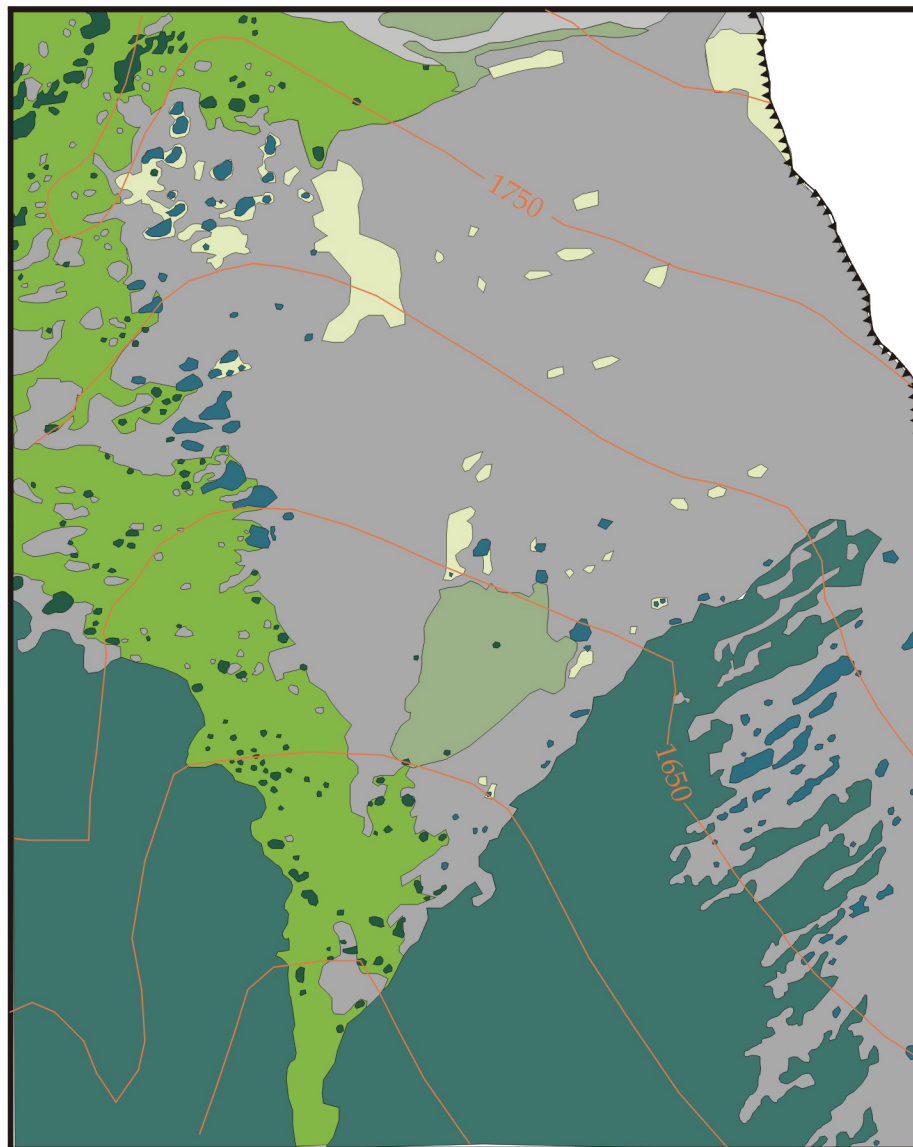
1920



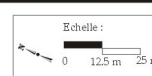
Sources : S. ARQUES, 2003
 -Photographie oblique F. POULAT (env. 1920)
 -Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000°, Top 25, OT 3334.



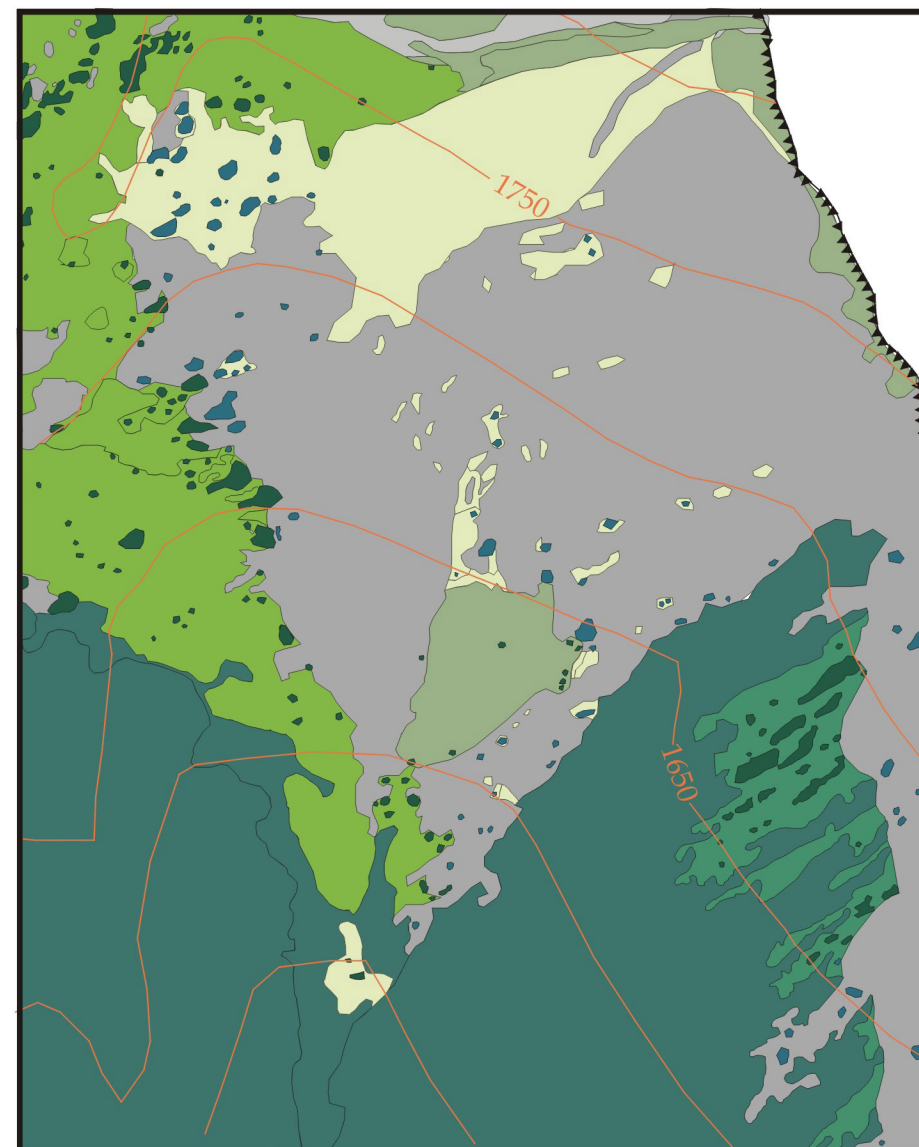
1956



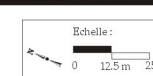
Sources : S. ARQUES, 2003
 -Photographie aérienne, IGN, mission 1956 (noir et blanc), n°095, 1/30 000°.
 -Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000°, Top 25, OT 3334.



2001



Sources : S. ARQUES, 2003
 -Photographie aérienne, IGN, mission 2001 (couleurs naturelles), n°2737, 1/25 000°.
 -Photographie oblique S. ARQUES (2003)
 -Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000°, Top 25, OT 3334.



Légende:

▼▼▼▼ Corniche principale (calcaire urgonien)

Formation (s) ligneuse (s)

■ Forêt

Formation (s) de transition

■ Lande

■ Ilot arbustif sur formation végétale herbacée

■ Ilot arbustif sur éboulis

Formation (s) non boisée (s)

■ Piquetage herbacé

■ Pelouse

■ Prairie

■ Secteur rhexistasique stabilisé

■ Secteur rhexistasique actif

□ Non cartographié

2.2.3. Etat de la mosaïque biorhexistasique en 2001

En 2001, l'hétérogénéité se maintient. L'état de la mosaïque révèle (Carte 15, tableau 16) :

- l'apparition d'un nouveau type physionomique « lande » au sud de l'écocomplexe;
- une progression du couvert forestier au détriment de la strate arbustive et de la prairie à l'Est de l'écocomplexe. La forêt couvre la surface la plus vaste en 2001;

Tableau 16 : Surface occupée par les types physionomiques en 2001

Type physionomique	Surface (ha)	Fréquence (%)
Forêt	3,6	38
Secteur rhexistasique stabilisé	3,3	34,6
prairie	1,1	11,5
Piquetage herbacé	0,8	8,4
Pelouse	0,3	3
Lande	0,2	2
Ilôt arbustif sur formation végétale	0,1	1
Secteur rhexistasique actif	0,08	0,8
Ilôt arbustif sur éboulis	0,04	0,4
Total	9,52	

- une progression de la prairie par « colmatage » des petites taches appartenant au type « secteur rhexistasique stabilisé » et par progression des lisières, en bordure du talus;
- une progression de la pelouse sur secteur rhexistasique stabilisé et sur piquetage herbacé au nord/est de l'écocomplexe. Cette progression traduit ici un processus de succession végétale évident;
- une extension rapide du piquetage herbacé au nord de l'écocomplexe;
- une diminution du nombre de taches arbustives sur éboulis au profit d'une formation de transition de type « lande » et d'un changement d'état en lisière de prairie.

La présence importante du piquetage herbacé au niveau des zones de contact pelouse/secteur rhexistasique stabilisé, laisse suggérer un processus de succession végétale susceptible de se poursuivre dans les décennies à venir. Cela tend à confirmer l'hypothèse d'une stabilisation en cours des écocomplexes.

Nous allons maintenant étudier les modalités de cette évolution paysagère, en termes de nature et de vitesse de progression.

2.2.4. Evolution de la végétation entre 1920 et 1956

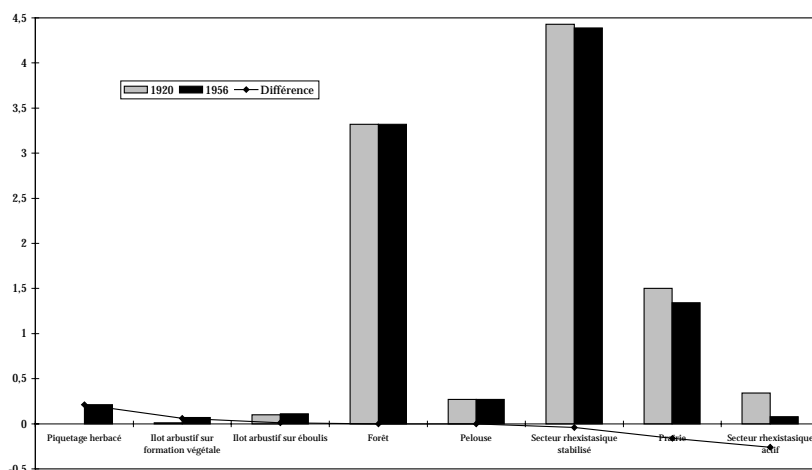
L'étude diachronique permet de préciser les modalités d'évolution de la mosaïque biorhexistasique sur 36 ans (cartes 16 et 17).

2.2.4.1. L'évolution des surfaces occupées par les types physiologiques entre 1920 et 1956

Le tableau 17 et le graphique 24 résument l'évolution de la surface des types physiologiques sur la période considérée.

Tableau 17 : Evolution de la surface des types physiologiques entre 1920 et 1956

Type physiologique	Surface (ha)		Différence (ha)
	1920	1956	
Piquetage herbacé	*	0,21	0,21
Ilot arbustif sur formation végétale	0,01	0,07	0,06
Ilot arbustif sur éboulis	0,10	0,11	0,01
Forêt	3,32	3,32	0
Pelouse	0,27	0,27	0
Secteur rhexistasique stabilisé	4,43	4,39	-0,04
Prairie	1,50	1,34	-0,16
Secteur rhexistasique actif	0,34	0,08	-0,26

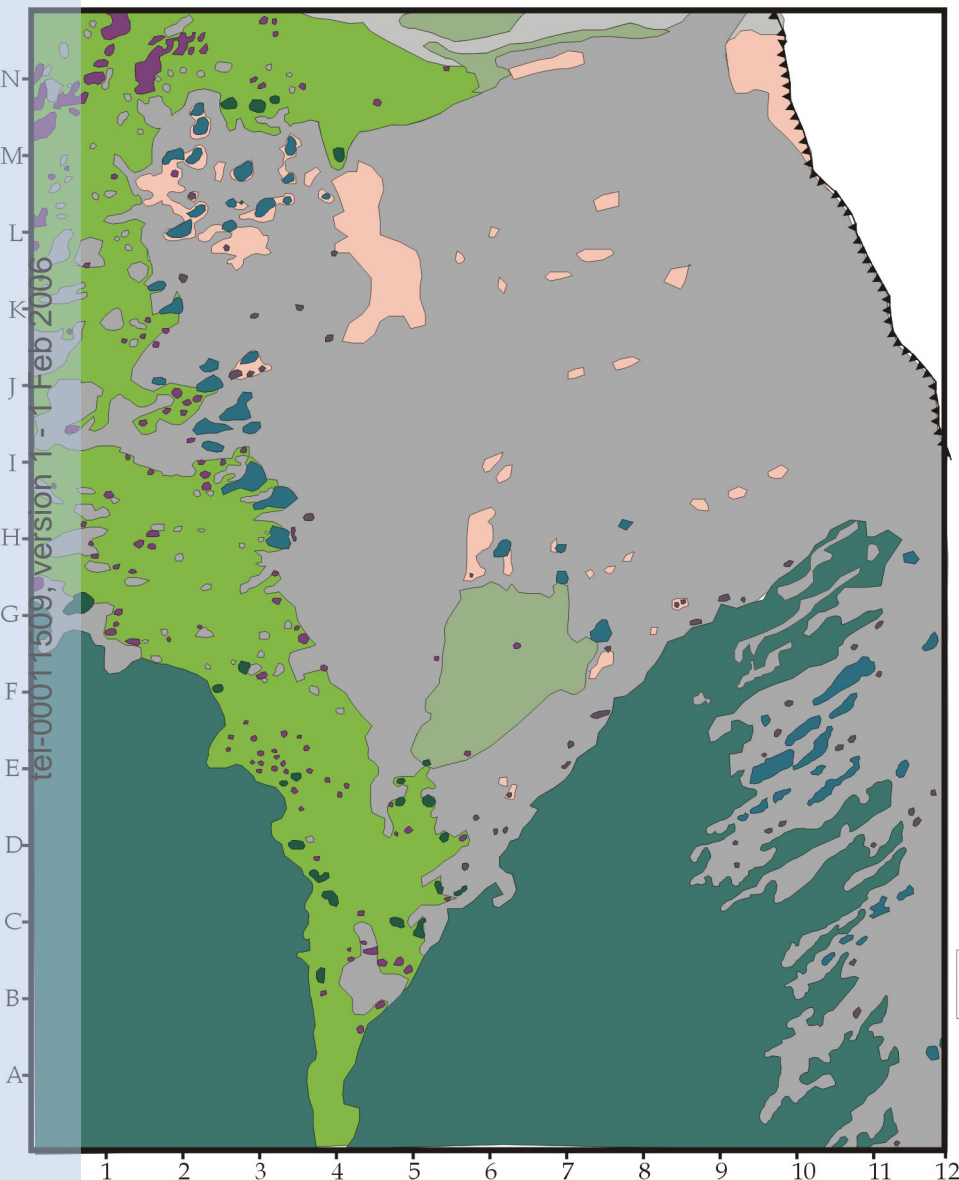


Graphique 24 : Evolution de la surface occupée par les types physiologiques entre 1920 et 1956.

Finalement, deux types physiologiques ont connu une évolution sensible. Il s'agit des formations de transition arbustives dont la progression a été rapide entre 1920 et 1956. Le piquetage herbacé n'était pas présent en 1920 mais son apparition sur secteur rhexistasique constitue certainement le fait le plus marquant de la période. L'exploitation pastorale de l'éco-complexe s'est arrêtée en 1914, et l'état de la mosaïque en 1920 est certainement, à peu de choses près, identique. Par conséquent, la réduction de la pression pastorale est ici à l'origine de l'amorce de la colonisation végétale ligneuse et herbacée observée.

Deux facteurs confirment cet aspect : a) Le petit îlot de pelouse (G6, carte 16) et la prairie étaient classés sur la période 1820-1914 en parcelles pâturées (Cartes 3 et 4 et détails en annexe A). Par conséquent, les troupeaux essentiellement constitués d'ovins et de caprins devaient régulièrement brouter les jeunes pousses arbustives, ce qui a limité leur extension jusqu'en 1914. D'autre part, les bergers demeurant au habert de Bovinant situé à 1,5 km plus au nord devaient régulièrement prélever du petit bois pour se chauffer, b) Outre le fait que l'extension du piquetage herbacé dans la zone médiale (J-M 6-10) et dans la zone apico-proximale du talus (N10) puisse être attribuée, dans une moindre mesure, à une réduction de la fréquence et de l'intensité des processus d'érosion nivéo-péglaciaires, nous pensons qu'elle a aussi été favorisée par la déprise pastorale.

Carte n°16 : Evolution de la physionomie végétale du talus d'éboulis du Grand Som entre 1920 et 1956.



Légende :

----- Corniche principale (calcaire urgonien)

Classes physionomiques et dynamiques

Formations présentes en 1920

Formation (s) ligneuse (s)

Forêt

Formation (s) de transition

Ilot arbustif sur formation végétale herbacée
Ilot arbustif sur éboulis

Formations herbacées

Pelouse
Prairie

Secteurs faiblement végétalisés

Secteur rhexistasique stabilisé
Secteur rhexistasique actif

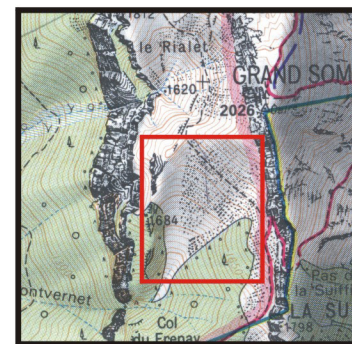
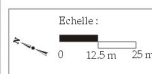
Formations développées entre 1920 et 1956

Formation (s) de transition

Ilot arbustif sur formation végétale herbacée
Ilot arbustif sur éboulis

Formation (s) herbacée (s)

Piquetage herbacé
Non cartographié



Localisation du secteur étudié. 1/25 000°

Sources : ARQUES, 2003.
-Photographie oblique F. POULAT (env. 1920).
-Photographie aérienne, IGN, mission 1956, n°095, 1/30 000° (env.).
-Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000 °, Top 25, OT 3334.

Certaines bêtes devaient circuler sur le talus et brouter les quelques petites touffes herbeuses présentes, notamment dans les parties les plus stables c'est-à-dire au sein de la zone distale (E-I 6-8) et au nord/ouest du dépôt (J-M 2-5).

2.2.4.2. L'évolution de la structure de la mosaïque biorhexistasique entre 1920 et 1956

A. L'évolution des périmètres des unités physionomiques

Les résultats sont ici semblables à ceux présentés pour la Grande Sure. Le périmètre des unités physionomiques évolue en même temps que leur surface. Par conséquent, le classement des types physionomiques est sensiblement identique à celui présenté dans le tableau 17.

Tableau 18 : Evolution des périmètres des unités physionomiques entre 1920 et 1956

Type physionomique	Périmètre (m)		Différence (m)
	1920	1956	
Piquetage herbacé	*	1000	1000
Ilot arbustif sur formation végétale	198,7	622	423,3
Secteur rhexistasique stabilisé	1997	1730	267
Ilot arbustif sur éboulis	901,2	1062,7	161,5
Forêt	1427,5	1425,5	0
Prairie	1350	1350	0
Pelouse	475	475	0
Secteur rhexistasique actif	675	320	-355

Les îlots arbustifs se sont multipliés ce qui a contribué à augmenter la valeur de leur périmètre. L'extension la plus importante concerne les îlots arbustifs sur prairie. Le secteur rhexistasique actif a régressé au profit du secteur rhexistasique stabilisé dans la zone apico-proximale du talus (J-N 9-12). Par conséquent, la valeur de son périmètre a augmenté. Cette régression confirme la tendance à un ralentissement de la morphodynamique du dépôt. Le piquetage herbacé revêt deux particularités qui déterminent la valeur de son périmètre : il s'est développé sous forme de taches moyennes et de grosses taches aux contours sinueux au nord/est de l'éco-complexe (J-M 2-5), et sous forme de nombreuses petites taches dans la zone médiale du talus d'éboulis (J-M 6-9). L'association de ces deux facteurs explique, par exemple, le fait que la valeur du périmètre de ce type physionomique soit supérieure à celle obtenue pour le type « îlot arbustif sur formation végétale ».

En terme de complexification et d'hétérogénéité de la mosaïque, les valeurs du rapport « périmètre/surface » nous permettent de distinguer quatre cas (Tableau 19) :

- périmètre et surface augmentent et le rapport « périmètre/surface » augmente : dans ce cas, le périmètre croît plus vite que la surface. C'est le cas du piquetage herbacé et des îlots arbustifs sur éboulis. Leur expansion se fait soit sous forme de taches isolées, soit par expansion sinueuse des bordures par « capillarité ».

- périmètre et surface augmentent mais le rapport diminue : le périmètre augmente ici moins vite que la surface et cela entraîne une simplification des contours des taches. C'est le cas des îlots arbustifs sur prairie dont les contours sont souvent réduits à des formes géométriques simples en raison de la petite taille des taches (D-F 2,5-4).

- périmètre et surface diminuent mais le rapport augmente : le périmètre diminue moins vite que la surface. Il y a fragmentation et/ou complexification des contours par régression. C'est le cas du secteur rhexistasique actif qui a presque entièrement disparu en zone apico-proximale du dépôt (J-N 9-12). Il ne reste plus que deux petites taches, dont l'une présente des contours assez sinueux. Cela a certainement contribué à faire augmenter la valeur de l'indice.

Tableau 19 : Evolution du rapport « périmètre/surface » des unités physiologiques, entre 1920 et 1956

Type physiologique	P/S		Différence (m)
	1920	1956	
Piquetage herbacé	0	0,47	+
Ilot arbustif sur éboulis	0,85	0,90	+
Secteur rhexistasique actif	0,19	0,36	+
Prairie	0,08	0,1	+
Pelouse	0,17	0,17	=
Forêt	0,04	0,04	=
Ilot arbustif sur formation végétale	1,04	0,86	-
Secteur rhexistasique stabilisé	0,04	0,03	-

- périmètre et surface diminuent et le rapport diminue : le périmètre diminue plus vite que la surface. Il y a simplification des contours, par régression. Le secteur rhexistasique stabilisé est dans ce cas et il semblerait que la disparition du secteur rhexistasique actif, dont la lisière était assez sinueuse dans la zone apico-proximale du talus, ait contribué à diminuer la valeur de l'indice.

B. Evolution du nombre de taches

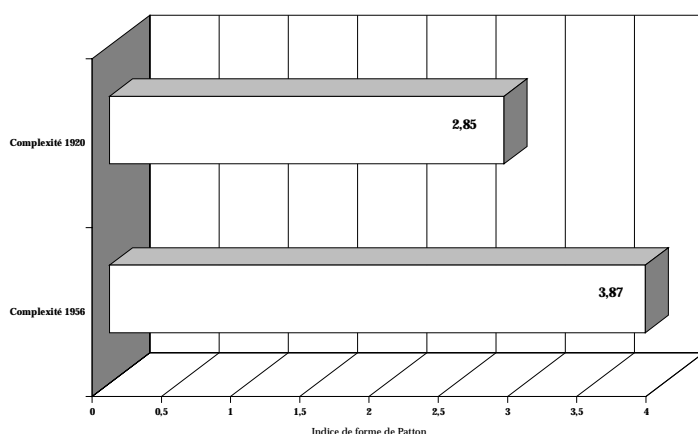
La progression des îlots arbustifs est considérable (Tableau 20). Le nombre d'îlots arbustifs sur prairie a été multiplié par sept entre 1920 et 1956 et celui des îlots sur éboulis par deux. Cette extension a contribué à fragmenter la prairie et le secteur rhexistasique stabilisé.

Tableau 20 : Evolution du nombre de taches par unité physiologique, entre 1920 et 1956

Type physiologique	Nombre de taches		Différence (m)
	1920	1956	
Ilot arbustif sur formation végétale	18	128	110
Ilot arbustif sur éboulis	52	102	50
Piquetage herbacé	0	41	41
Secteur rhexistasique actif	2	2	0
Prairie	2	2	0
Pelouse	3	3	0
Forêt	2	2	0
Secteur rhexistasique stabilisé	72	69	-3

Ainsi, la mosaïque biorhexistasique du Grand Som est plus fragmentée et plus complexe en 1956. Nous allons voir si cette tendance est confirmée par l'analyse des indices paysagers.

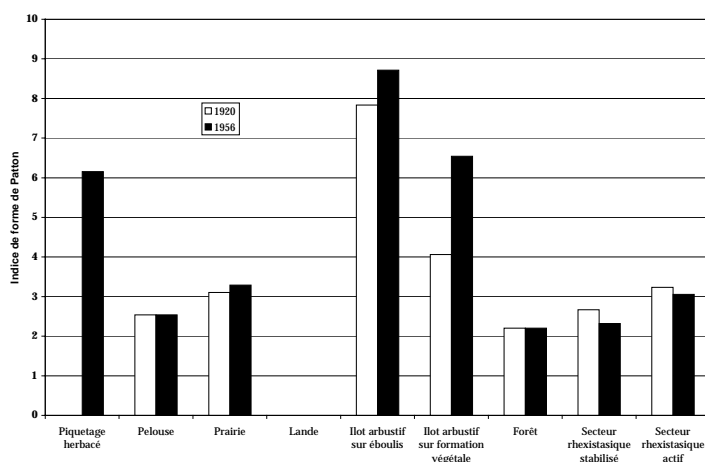
C. L'évolution de la complexité de la mosaïque biorhexistasique entre 1920 et 1956 : l'indice de forme de Patton



Graphique 25 : Evolution de la complexité globale de la mosaïque biorhexistasique du Grand Som, entre 1920 et 1956.

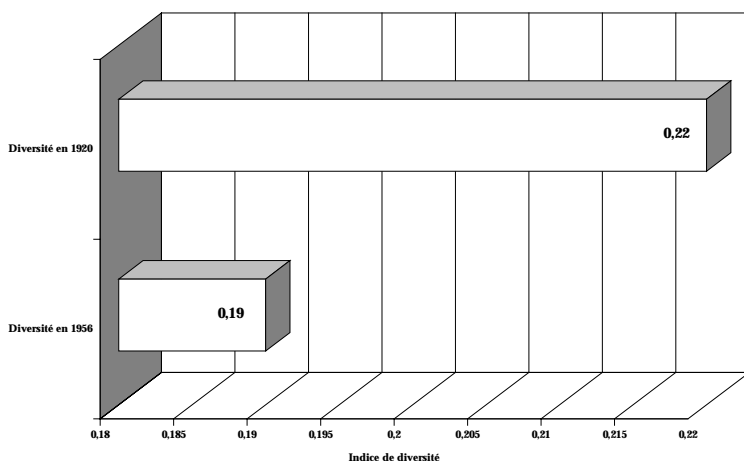
La complexité globale de la mosaïque augmente entre 1920 et 1956 (Graphique 25). Cette augmentation s'explique par l'extension des formations arbustives et du piquetage herbacé sous forme de multiples taches. Cette remarque est confirmée par l'analyse du graphique 26.

Graphique 26 : Evolution de la complexité des types physiologiques, entre 1920 et 1956



Les autres types physiologiques n'enregistrent pas de changements notables. Pour la plupart, la complexité stagne (pelouse et forêt) ou diminue (secteur rhexistasique stabilisé et secteur rhexistasique actif). En ce qui concerne le secteur rhexistasique stabilisé, cette diminution est contraire à ce que nous avons souligné plus haut. Sa fragmentation par le piquetage herbacé n'est pas suffisante pour contribuer à le complexifier. Il semblerait que la régression de la portion active du secteur ait eu un effet plus structurant.

D. Evolution de la diversité spatiale de la mosaïque biorhexistasique, entre 1920 et 1956



Graphique 27 : Evolution de la diversité spatiale globale, entre 1920 et 1956.

La mosaïque biorhexistasique du Grand Som est légèrement moins diversifiée en 1956 (Graphique 27). Les principaux types structurants, tels que le secteur rhexistasique stabilisé et la prairie, enregistrent une diminution de leur surface. Par conséquent, comme le calcul de l'indice est basé sur la surface de chaque type physiologique, cela contribue à faire chuter sa valeur. L'apparition d'un nouveau type physiologique en 1956 (piquetage herbacé) n'a aucun effet.

Finalement, l'évolution végétale de la mosaïque biorhexistasique du Grand Som sur la période 1920-1956 révèle : a) un processus de colonisation végétale généralisé, b) un processus diversifié en terme de nature car il s'agit conjointement d'une progression ligneuse et herbacée, c) un processus

diversifié en terme de vitesses de colonisation. La progression des formations de transitions arbustives est très rapide, et dans une moindre mesure celle du piquetage herbacé aussi, d) un processus de succession végétale qui s'opère en périphérie du talus et au sein du secteur rhexistasique stabilisé, et enfin, d) une colonisation végétale qui est la conséquence directe d'une diminution de la pression pastorale.

L'analyse de l'évolution de la végétation sur la période 1956-2001 devrait nous permettre de confirmer cette tendance.

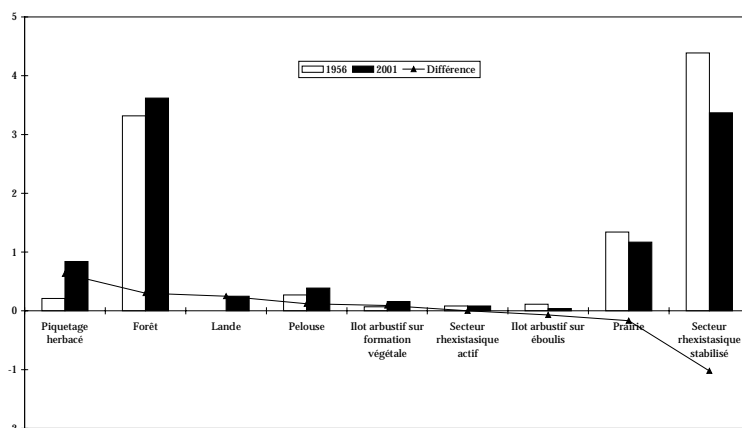
2.2.5. Evolution de la végétation entre 1956 et 2001

2.2.5.1. L'évolution des surfaces occupées par les types physiologiques entre 1956 et 2001

Le tableau 21 et le graphique 28 présentent l'évolution de la surface des types physiologiques sur la période.

Tableau 21 : Evolution de la surface des types physiologiques entre 1956 et 2001

Type physiologique	Surface (ha)		Différence (ha)	% de différence 1920-1956	% de différence 1956-2001
	1956	2001			
Piquetage herbacé	0,21	0,84	0,63	0	300
Forêt	3,32	3,62	0,30	0	9
Lande	*	0,25	0,25	0	0
Pelouse	0,27	0,39	0,12	0	44
Ilot arbustif sur formation végétale	0,07	0,16	0,09	600	128
Secteur rhexistasique actif	0,08	0,08	0	-76	0
Ilot arbustif sur éboulis	0,11	0,04	-0,07	10	-63
Prairie	1,34	1,17	-0,17	-10	-12
Secteur rhexistasique stabilisé	4,39	3,37	-1,02	-0,9	-23

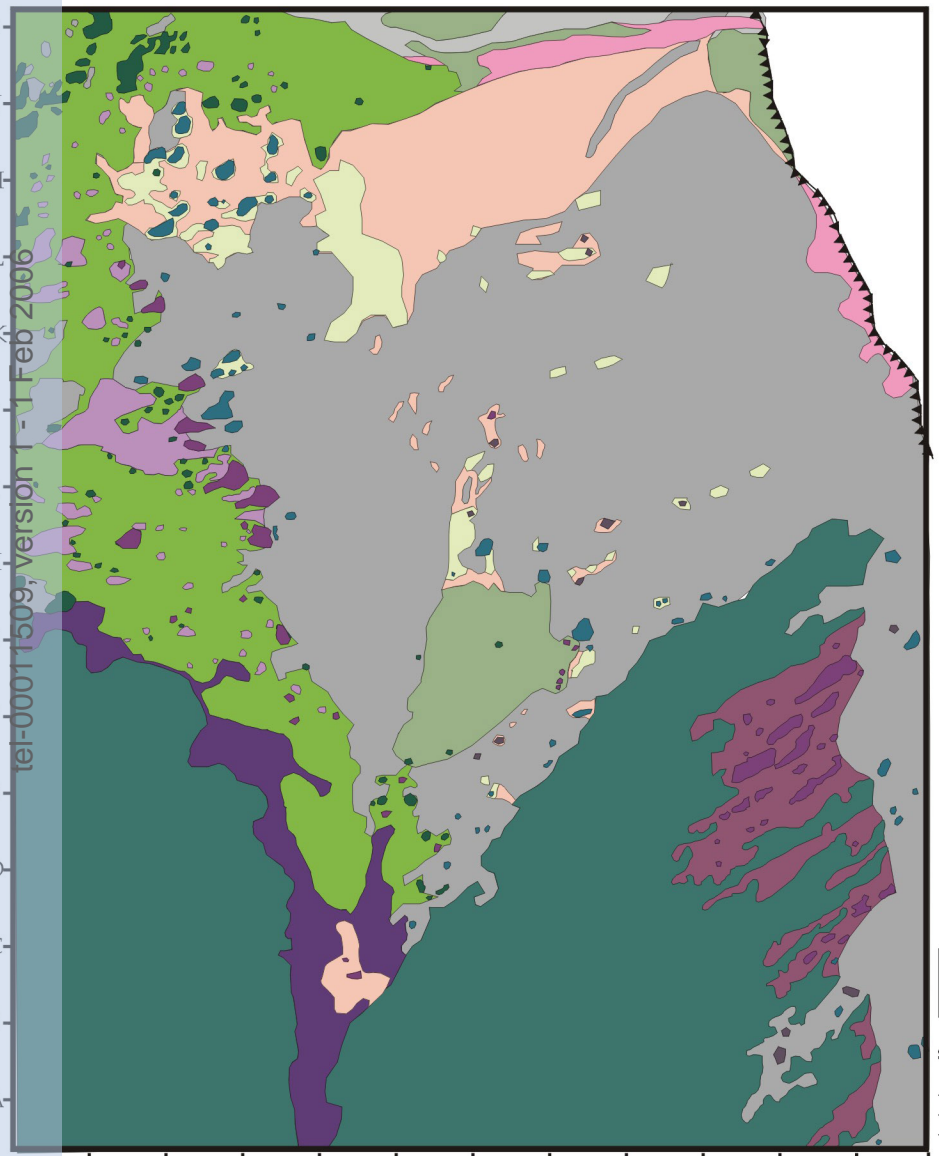


Graphique 28 : Evolution de la surface occupée par les types physiologiques, entre 1956 et 2001.

L'évolution constatée sur la période 1920-1956 se confirme. La colonisation végétale, ligneuse et herbacée, s'est amplifiée sur talus d'éboulis et en périphérie depuis 1956. Le piquetage herbacé enregistre une évolution de 0,63 ha sur le demi-siècle. Il a fortement progressé, par extension des bordures, au nord/est de l'éco-complexe (Carte 17, K-N 1-10.5) et secondairement sous forme de petites taches dans la zone médiale du talus d'éboulis (F-K 4,8-8). L'extension des bordures a été en moyenne de 45 mètres sur la période 1956-2001⁶¹. La plus grande atteint 65 mètres (K-N 5,8). Cette évolution contribue à valider l'hypothèse d'un ralentissement de la morphodynamique du dépôt. De plus, il ne s'agit pas d'un fait isolé. Le front forestier a progressivement végétalisé le couloir avalancheux situé au débouché de la zone distale du talus (B4), ce qui signifie que la distance parcourue par les avalanches a fortement diminué.

⁶¹ Moyenne des longueurs de 5 segments mesurées sur la tache la plus vaste (K-N 5-10).

Carte n° 171 : Evolution de la physionomie végétale du talus d'éboulis du Grand Som entre 1956 et 2001.



Légende :

▼▼▼▼ Corniche principale (calcaire urgonien)

Classes physionomiques et dynamiques

Formations présentes en 1956

- Formation (s) ligneuse (s)
 - Forêt
- Formation (s) de transition
 - Ilot arbustif sur formation végétale herbacée et sous-arbustive
 - Ilot arbustif sur éboulis
- Formation (s) non boisée (s)
 - Piquetage herbacé
 - Pelouse
 - Prairie
- Secteurs faiblement végétalisés
 - Secteur rhexistasique stabilisé
 - Secteur rhexistasique actif

Formations développées entre 1956 et 2001

- Formation (s) ligneuse (s)
 - Forêt
- Formation (s) de transition
 - Lande
 - Ilot arbustif sur formation végétale herbacée et sous-arbustive
 - Ilot arbustif sur éboulis
- Formation (s) non boisée (s)
 - Piquetage herbacé
 - Pelouse
 - Prairie
- Non cartographié



Sources : ARQUES, 2003.

-Photographie aérienne, IGN, mission 2001 (couleurs naturelles), n°2737, 1/25 000°.
 -Photographie oblique S. ARQUES (2003)
 -Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000°, Top 25, OT 3334.

D'autre part, la présence arbustive sur piquetage herbacé, en zone médiale et distale du dépôt, confirme la tendance à la stabilisation de cette portion du talus d'éboulis évoquée pour la période précédente (I-J 6,2 ; H-I 7-8 ; E-F 6-6,2). Enfin, l'installation d'une pelouse dense, dans la zone apico-proximale du talus, contribue à appuyer cette trajectoire d'évolution biostatique (J-M 10,2-12). Non seulement elle est apparue entre 1956 et 2001 mais elle enregistre une progression moyenne de 7 mètres.

Parallèlement, les surfaces occupées par les types physiologiques « îlot arbustif sur éboulis, secteur rhexistatique stabilisé et prairie » ont diminué. Cette évolution traduit, soit un changement d'état (îlot arbustif sur éboulis), soit une régression simple (secteur rhexistatique stabilisé), soit un combiné des deux (prairie).

La surface occupée par les îlots arbustifs sur éboulis enregistre une diminution de 63 %. Cette diminution est liée à un changement d'état qui s'est opéré au contact de la prairie, à l'ouest de l'éco-complexe (G-L 1,7-3,8) et à l'apparition d'une lande au sud (A-G 9-11,7). La strate arbustive qui s'est développée sur éboulis entre 1920 et 1956 se retrouve maintenant englobée au sein de deux formations denses biostatiques, ce qui explique son changement d'état en « îlot arbustif sur formation végétale ».

Le secteur rhexistatique stabilisé a régressé de 23 % au profit du piquetage herbacé, de la lande et de la pelouse. En 1956, les formations herbacées (pelouse et piquetage herbacé) occupaient 0,48 ha sur secteur rhexistatique stabilisé. Sur la période 1956-2001, leur surface a été multipliée par deux et demi, soit 1,23 ha. L'évolution des formations arbustives est identique (îlots arbustifs et lande). La strate arbustive couvrait 0,11 ha en 1956 et atteignait 0,29 ha en 2001.

La progression de la prairie, par « colmatage » des petites taches rhexistatiques (K-N 0-4 ; H-J 0-2,2) et par « capillarité » en lisière du secteur rhexistatique (H-I 2,2-4), est masquée par l'évolution du front forestier à l'ouest de l'éco-complexe. Les modalités d'évolution du couvert forestier sont ici identiques, en termes de nature et de vitesses, à celles que nous avons pu observer pour la Grande Sure. Son extension rapide est liée à la « fusion » de la strate arbustive développée sur prairie, entre 1920 et 1956 (B-G 0-5). L'exploitation pastorale du Grand Som s'est arrêtée à la même époque que celle de la Grande Sure⁶². Jusqu'en 1956 (2.2.4.1.) la progression ligneuse s'est effectuée sous la forme de multiples petits îlots et ce n'est qu'entre 1956 et 2001 qu'une fusion a eu lieu, permettant le développement d'un couvert forestier dense. Par conséquent, il est évident qu'il s'agit d'une réponse directe de la végétation à la disparition de l'exploitation pastorale des éco-complexes.

2.2.5.2. L'évolution de la structure de la mosaïque biorhexistatique entre 1956 et 2001

A. L'évolution des périmètres des unités physiologiques

L'évolution des périmètres suit logiquement celle des surfaces. La progression des périmètres des grandes taches (piquetage herbacé, lande, forêt) est plus importante sur la période 1956-2001.

En ce qui concerne la complexification et l'hétérogénéité de la mosaïque, les résultats du rapport « périmètre/surface » nous permettent de distinguer trois cas (Tableau 23) :

- périmètre, surface et rapport « périmètre/surface » augmentent : le périmètre croît plus vite que la surface. C'est le cas de la pelouse et de la forêt qui étaient stables sur la période 1920-1956. Leur progression est caractérisée par une expansion sinueuse rapide des bordures, de façon longitudinale pour la pelouse et frontale pour la forêt.

⁶² Nous rappelons que pour la Grande Sure, une clôture sépare l'éco-complexe étudié, autrefois pâturé, de l'alpage de Jusson toujours en activité.

Tableau 22 : Evolution des périmètres des unités physionomiques entre 1956 et 2001

Type physionomique	Périmètre (m)		Différence (m)
	1956	2001	
Piquetage herbacé	1000	2106,37	1106,37
Lande	*	740	740
Forêt	1425,5	2147,5	722
Ilot arbustif sur formation végétale	622	1304,75	682,75
Pelouse	475	915	440
Secteur rhexistasique actif	320	275	-45
Prairie	1350	1233	-117
Ilot arbustif sur éboulis	1062,7	494,12	-568,58
Secteur rhexistasique stabilisé	1730	1116,37	-613,63

- périmètre et surface augmentent et le rapport diminue : le périmètre augmente ici moins vite que la surface et cela entraîne une simplification des contours des taches. C'est le cas de la strate arbustive (sur prairie) qui a fortement régressé au profit de la forêt mais qui enregistre parallèlement une légère expansion, sous forme de petites taches dont les contours sont très simplifiés (D-F 3,8-5,7). Concernant le piquetage herbacé et contrairement à la période 1920-1956, son évolution révèle une forte progression des moyennes et grosses taches originelles sans que la sinuosité des bordures ait augmenté. Cette évolution révèle certainement une homogénéisation des conditions phyto-écologiques stationnelles au niveau de la zone de contact avec le secteur rhexistasique. Cette portion du talus (cône d'éboulis) est légèrement inclinée vers le sud (Carte 7) et l'avancée du piquetage herbacé est conforme à cette inclinaison. Par conséquent, il est probable que cette avancée s'effectue au rythme des largages réguliers de fines et sous l'effet de la présence d'espèces stabilisatrices à forte capacité de production de matière organique (*Thymus praecox* et *Globularia cordifolia*, par exemple). C'est aussi certainement ce processus qui explique la progression longitudinale de la pelouse dans la zone apico-proximale du dépôt. Nous reviendrons sur ces aspects dans le paragraphe 2.3.

Tableau 23 : Evolution du rapport « périmètre/surface » des unités physionomiques, entre 1956 et 2001

Type physionomique	P/S		Différence (m)
	1956	2001	
Ilot arbustif sur éboulis	0,90	1,20	+
Lande	*	0,29	+
Pelouse	0,17	0,22	+
Forêt	0,04	0,05	+
Prairie	0,1	0,1	=
Secteur rhexistasique stabilisé	0,03	0,03	=
Secteur rhexistasique actif	0,36	0,33	-
Piquetage herbacé	0,47	0,24	-
Ilot arbustif sur formation végétale	0,86	0,81	-

En ce qui concerne les types physionomiques tels que la prairie et le secteur rhexistasique, les surfaces et les périmètres ont diminué mais les rapports stagnent. Leur évolution ne montre pas de complexification ou de simplification suffisantes, en termes de sinuosité des contours ou en nombre de taches, pour modifier la valeur des indices. L'évolution intrinsèque de la prairie (colmatage des trous rhexistasiques) est atténuée par la diminution de sa surface au contact du front forestier, sans complexification ou simplification majeures de ses contours. La surface du secteur rhexistasique stabilisé se réduit peu à peu mais là, encore une fois, sans complexification ou simplification de ses bordures par régression.

B. Evolution du nombre de taches

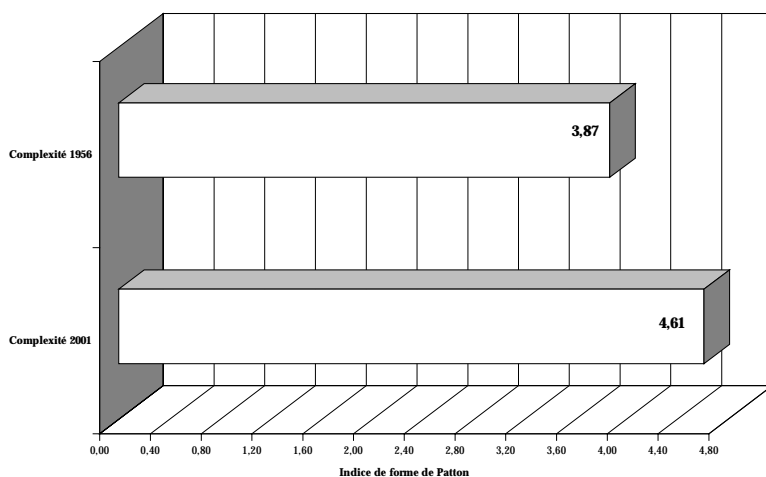
A l'exception de la lande, de la pelouse et de la prairie, tous les types physiologiques enregistrent une diminution du nombre de taches (Tableau 24). Après une extension de la plupart des types physiologiques sous forme d'une dispersion de petites taches sur la période 1920-1956, la période 1956-2001 est caractérisée par une « vague » de fusion et/ou de colmatage. Cette évolution traduit un processus de colonisation végétale plus rapide et une densification homogène. Les taches appartenant au secteur rhexistasique stabilisé ont été colonisées par la prairie. Comme nous l'avons souligné plus haut, la réduction du nombre de taches du type « îlot arbustif sur éboulis » s'explique par un changement d'état (2.2.5.1.). A contrario, la strate arbustive présente sur prairie entre 1920 et 1956 a connu une régression par fusion de ses taches au profit du couvert forestier. Les petites taches de piquetage herbacé, situées au nord/est de l'écocomplexe, ont aussi fusionné (L-N 1-4).

Tableau 24 : Evolution du nombre de taches par unité physiologique, entre 1956 et 2001

Type physiologique	Nombre de taches		Différence (m)
	1956	2001	
Lande	*	6	6
Pelouse	3	5	2
Prairie	2	2	0
Secteur rhexistasique actif	2	1	-1
Forêt	2	1	-1
Piquetage herbacé	41	34	-7
Îlot arbustif sur formation végétale	128	117	-11
Îlot arbustif sur éboulis	102	73	-29
Secteur rhexistasique stabilisé	69	14	-55

Les indices de complexité et de diversité devraient nous permettre d'analyser l'impact, sur la mosaïque biorhexistasique, de l'ensemble de ces changements.

C. L'évolution de la complexité de la mosaïque biorhexistasique entre 1956 et 2001



Graphique 29 : Evolution de la complexité globale de la mosaïque du Grand Som, entre 1956 et 2001.

La complexité globale de la mosaïque augmente de 19 % entre 1956 et 2001 (Graphique 29). Cette augmentation est inférieure à celle de la période précédente qui atteignait 35,5%, sous l'effet d'une extension des formations arbustives et du piquetage herbacé sous la forme de multiples petites taches. Ici, la complexification de la mosaïque est essentiellement due à l'extension des grandes taches par fusion, colmatage et/ou extension des bordures. L'analyse de l'évolution de la complexité des types physiologiques nous permet de distinguer (Graphique 30) :

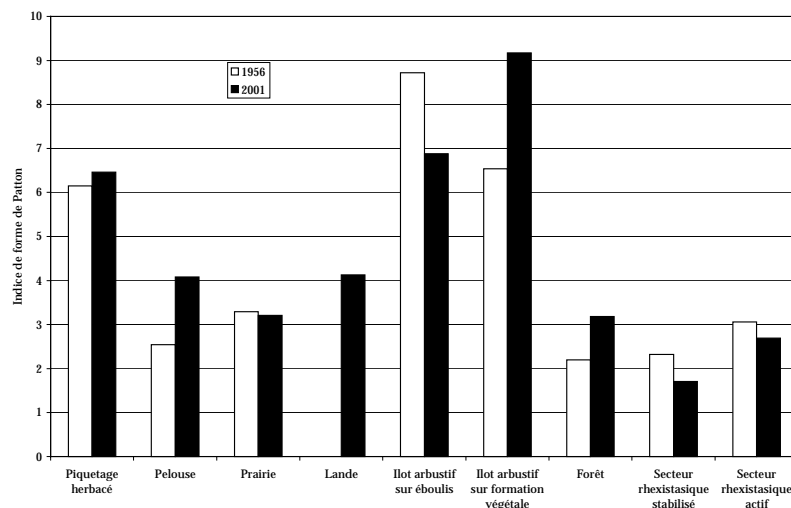
- une complexification du type « îlot arbustif sur formation végétale ». Si l'on considère la seule valeur de l'indice, il y a effectivement une augmentation de la complexité du type. Seulement, celle-ci n'est pas due à une profonde modification dans ses modalités de colonisation

végétale mais plutôt à un changement d'état du type « îlot arbustif sur éboulis » (2.2.5.1.). Si l'on considère la seule évolution réelle de la strate arbustive sur formation végétale, elle a essentiellement disparu à l'issue d'un processus de fusion. Les quelques petites taches qui se sont développées sur la période 1956-2001, ne sont pas assez nombreuses, ni sinueuses pour faire augmenter, à elles seules, la valeur de l'indice. Ces éléments expliquent pourquoi nous considérons que l'évolution de la complexité globale réelle est essentiellement due à l'extension des grandes taches, plus structurantes sur cette période.

- une augmentation de la complexité des formations herbacées sur éboulis. Pour la pelouse, il s'agit de l'apparition de nouvelles taches aux contours plus sinueux, notamment en zone apico-proximale du talus (K-M 10-12). Pour le piquetage herbacé, il s'agit de l'effet conjugué de la vaste extension surfacique de la grande tache située au nord/est de l'écocomplexe, dont certaines bordures sont assez sinueuses (L-N 1,2-4), et de sa progression sous forme de petites taches dans la zone médiale et distale (B4,5) du dépôt.

- une complexification des taches forestières, sous l'effet de la fusion de la strate arbustive (A-G 0-5,2).

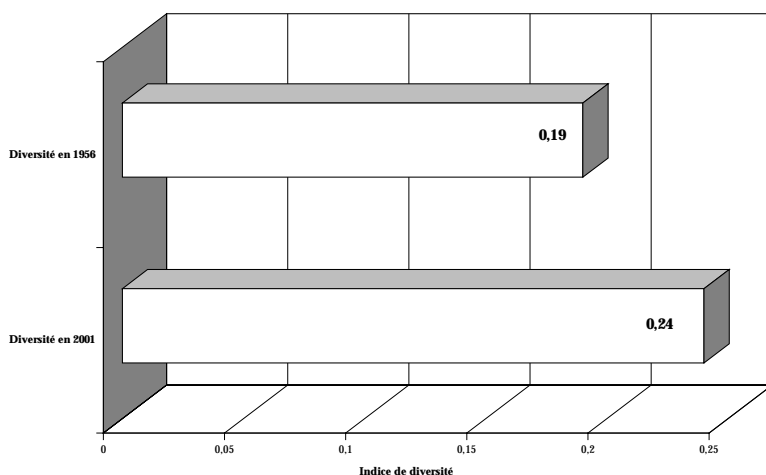
Graphique 30 : Evolution de la complexité des types physionomiques, entre 1956 et 2001



- une diminution de la complexité des types « prairie, secteur rhexistasique stabilisé et secteur rhexistasique actif, sous l'effet d'un lissage des bordures par colmatage (I-J 0,5-2,8 ; A-G 8,7-11,7). D'autre part, la progression de certains types physionomiques, comme le piquetage herbacé par exemple, entraîne une simplification des contours de la grande tache du secteur rhexistasique stabilisé car les zones de contact sont moins sinueuses (K-M5,2-10,2).

D. Evolution de la diversité spatiale de la mosaïque biorhexistasique, entre 1956 et 2001

La diversité spatiale augmente de 26,3% entre 1956 et 2001 alors qu'elle enregistre une diminution de 13,6% sur la période précédente (Graphique 31). Sur l'ensemble du siècle, la mosaïque biorhexistasique en 2001 est la plus diversifiée. L'explication est identique à celle évoquée précédemment, l'évolution des grandes taches de piquetage herbacé, de forêt, de pelouse et de lande, a un effet plus structurant.



Graphique 31 : Evolution de la diversité spatiale globale, entre 1956 et 2001.

Finalement, cette étude diachronique révèle un processus de colonisation végétale généralisé sur l'ensemble du siècle dernier. La nature de l'évolution végétale est identique sur les deux périodes. L'évolution de la mosaïque biorhexistatique est marquée par une progression ligneuse et herbacée qui s'est conjointement opérée sur secteur rhexistatique, c'est-à-dire sur talus d'éboulis, et en périphérie. Cependant, les modalités d'évolution diffèrent en termes de types et de vitesse de colonisation.

Sur la période 1920-1956, la prolifération par nucléation de la strate arbustive au sein du secteur rhexistatique stabilisé mais surtout sur prairie a été très rapide contrairement à l'évolution des autres types physionomiques. Cette colonisation végétale est une conséquence directe de l'arrêt de l'exploitation pastorale de l'éco-complexe à partir de 1914. En l'absence de données cartographiques intermédiaires, nous pouvons considérer que la réponse de la végétation a été d'environ une trentaine d'années. L'évolution végétale est aussi marquée par l'apparition d'un piquetage herbacé sur éboulis qui annonce peut être un processus de stabilisation en cours du dépôt.

Sur la période 1956-2001, la tendance générale se confirme. En périphérie du talus d'éboulis, la lignification par fusion des îlots de la strate arbustive se poursuit. Ce processus provoque l'avancée du front forestier et une régression de la prairie (colonisation frontale). La colonisation herbacée s'opère essentiellement au sein du talus d'éboulis, elle est plus rapide et plus dense sur la période. Le piquetage herbacé progresse de manière latérale et privilégie les zones de contact avec les autres types physionomiques (prairie, pelouse) mais aussi par « capillarité » à partir de sources existantes (petites taches et/ou des îlots arbustifs). La pelouse fait son apparition au sein de la zone apico-proximale du talus et son extension s'effectue plutôt de manière longitudinale. Aux effets de la déprise pastorale, s'ajoutent certainement ici ceux du réchauffement climatique. En périphérie du talus d'éboulis, il pourrait avoir un effet amplificateur sur l'évolution des formations végétales (forêt, prairie). Au sein du secteur rhexistatique, nous pensons qu'il est certainement le principal facteur explicatif car seule une réduction de la fréquence et de l'intensité des processus d'érosion nivéo-périglaciaires pourrait expliquer l'ampleur de la colonisation végétale ligneuse mais surtout herbacée, observée à partir de 1956. De plus, même si nous ne disposons pas de données antérieures pour la mosaïque biorhexistatique de la Grande Sure, les modalités d'évolution sont quasiment identiques sur la période.

L'analyse de l'évolution végétale des éco-complexes des Pelloux, de l'Aulp du Seuil et de La Plagne devrait nous permettre de conforter cette hypothèse.

2.3. L'évolution de la structure de l'éco-complexe des Pelloux

Les trajectoires d'évolution de la mosaïque biorhexistasique des Pelloux sont étudiées sur deux périodes : 1956 et 1993. L'analyse quantitative et qualitative repose sur la carte 18 qui présente les états successifs de la mosaïque en 1956 et 1993 et sur la carte 19 qui illustre l'évolution diachronique sur 37 ans.

2.3.1. Etat de la mosaïque en 1956

Trois principaux types physiologiques structurent la mosaïque en 1956 : la forêt, le secteur rhexistasique et la pelouse (Carte 18, tableau 25).

Tableau 25 : Surface occupée par les types physiologiques en 1956

Type physiologique	Surface (ha)	Fréquence
Forêt	4,06	51,68
Secteur rhexistasique	1,693	21,55
Pelouse	1,4	18
Lande	0,398	5,06
Piquetage herbacé	0,17	2,16
Ilot arbustif sur formation végétale	0,125	1,59
Ilot arbustif sur éboulis	0,009	0,11
Total	7,855	

La configuration paysagère générale est assez simple. La répartition des types physiologiques révèle :

- la présence d'un front forestier dense qui s'étend sur une vaste surface à l'est de l'éco-complexe ;
- un talus d'éboulis très fragmenté, dont les portions colluviales sont séparées par de multiples lambeaux de pelouse;
- la présence d'une lande, au sud de l'éco-complexe, au contact de la forêt et de la zone distale du talus ;
- une colonisation très disparate des portions rhexistasiques par le piquetage herbacé ;
- une couverture relativement homogène de l'éco-complexe par les formations de transition arbustives (sur pelouse et lande) ;
- la quasi absence d'îlots arbustifs sur éboulis.

La mosaïque biorhexistasique des Pelloux présente les mêmes caractéristiques en termes de colonisation arbustive et herbacée que celles de la Grande Sure et du Grand Som en 1956.

Les formations périphériques de type lande et pelouse sont marquées par une colonisation arbustive « par nucléation » importante et le secteur rhexistasique est ponctuellement colonisé par des petites taches de piquetage herbacé.

2.3.2. Etat de la mosaïque en 1993

En 1993, les fréquences augmentent pour chaque type physiologique mais la configuration générale de la mosaïque est sensiblement identique à celle de 1956. L'hétérogénéité de la mosaïque se maintient.

Tableau 26 : Surface occupée par les types physiologiques en 1993

Type physiologique	Surface (ha)	Fréquence
Forêt	4,23	53,63
Secteur rhexistasique	1,44	18,26
Pelouse	1,39	17,62
Lande	0,323	4,09
Piquetage herbacé	0,29	3,67
Ilot arbustif sur formation végétale	0,149	1,88
Ilot arbustif sur éboulis	0,064	0,81
Total	7,886	

La répartition des types physiologiques montre (Carte 18, tableau 26) :

- une progression du front forestier au détriment de la lande et de la strate arbustive au sud de l'éco-complexe ;
- une lignification arbustive plus importante du secteur rhexistasique ;
- une intensification de la fragmentation des portions rhexistasiques sous l'effet d'une densification du piquetage herbacé ;
- l'extension du piquetage herbacé au niveau des zones de contact pelouse/secteur rhexistasique ;
- une amorce de fermeture, par la lande, des couloirs avalanches situés au débouché des portions rhexistasiques.

Comme en 1956, l'état de la mosaïque biorhexistasique des Pelloux en 1993 est sensiblement similaire à celle présentée pour les éco-complexes de la Grande Sure et du Grand Som. L'étude diachronique devrait nous permettre de préciser les trajectoires d'évolution de l'éco-complexe des Pelloux et de confirmer ou d'infirmer la tendance observée lors de l'analyse des deux éco-complexes précédents.

2.3.3. Evolution de la végétation entre 1956 et 1993

L'analyse des modalités de cette évolution végétale en termes de nature, de type et de vitesse de progression repose sur la carte 19.

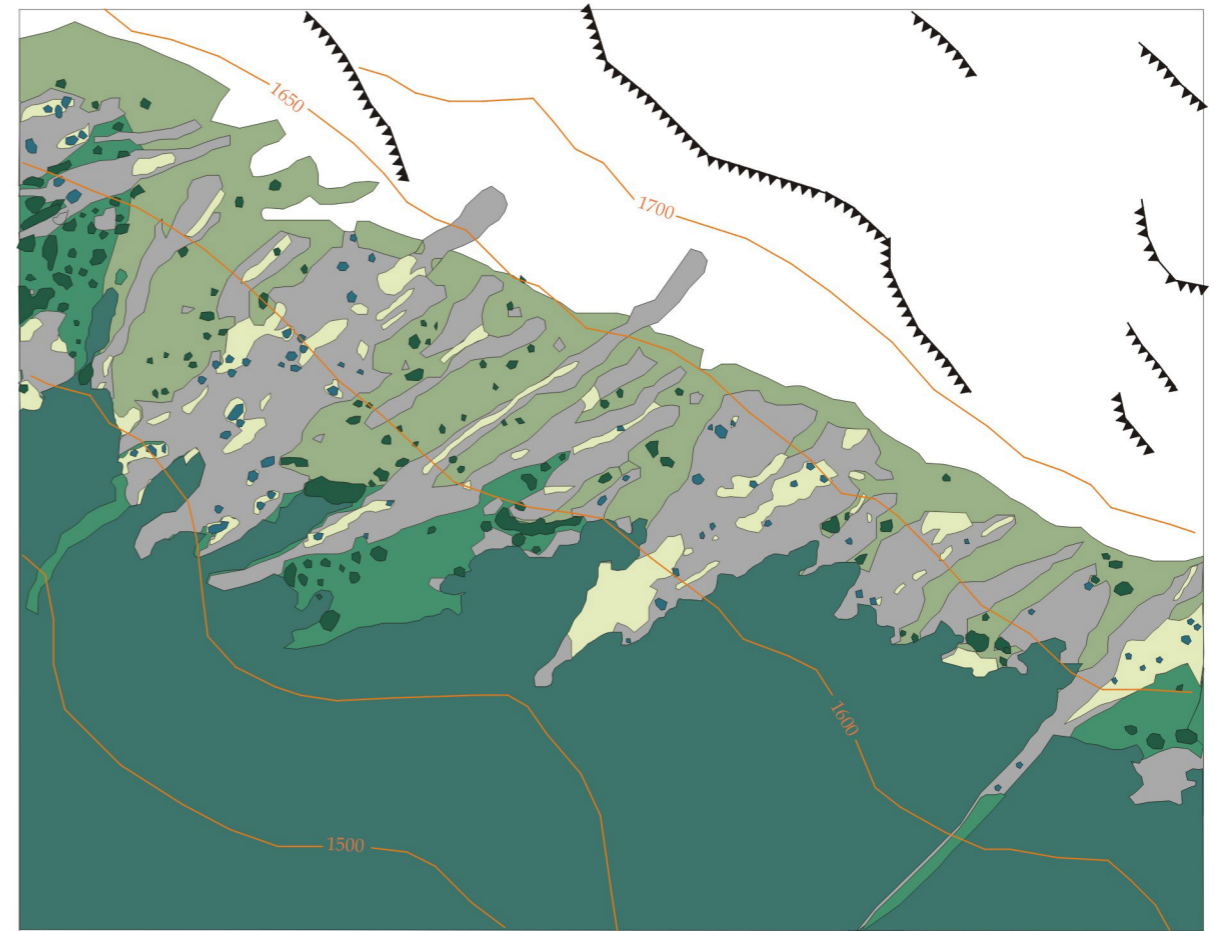
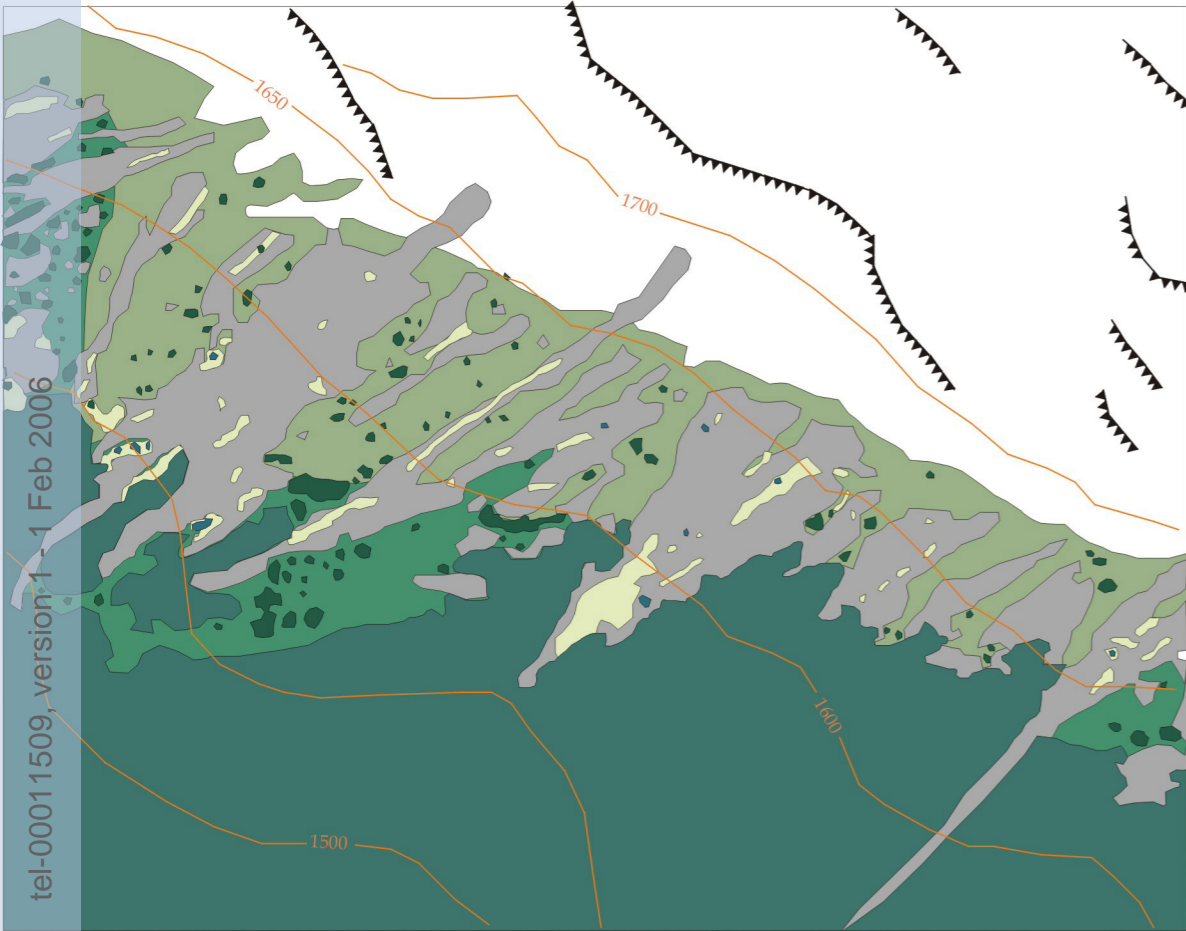
2.3.3.1. L'évolution des surfaces occupées par les types physiologiques, entre 1956 et 1993⁶³

Le tableau 27 et le graphique 32 résument l'évolution de la surface occupée par les types physiologiques, entre 1956 et 1993.

⁶³ Les types physiologiques ont été classés dans l'ordre décroissant du pourcentage de différence sur la période 1956-1993.

1956

1993



Sources : S. ARQUES, 2003
 -Photographie aérienne, IGN, mission 1956 (noir et blanc), n°193, 1/30 000°.
 -Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000°, Top 25, OT 3334.

Sources : S. ARQUES, 2003
 -Photographie aérienne, IFN, mission 1993 (IRC), n°1528, 1/17 000°.
 -Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000°, Top 25, OT 3334.

Légende :

▼▼▼▼ Corniche principale (calcaire urgonien)

Formation (s) ligneuse (s)

Forêt

Formation (s) de transition

- Lande
- Ilot arbustif sur formation végétale herbacée et sous-arbustive
- Ilot arbustif sur éboulis

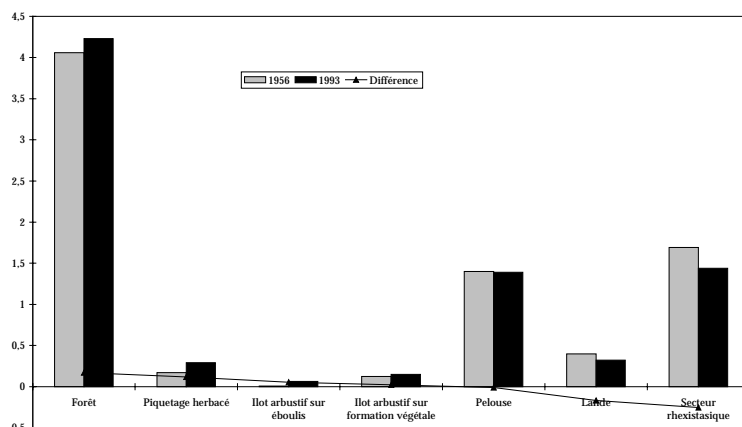
Formation (s) non boisée (s)

- Piquetage herbacé
- Pelouse
- Secteur rhexistatique

Non cartographié (secteurs à vires herbeuses)

Tableau 27 : Evolution de la surface occupée par les types physiologiques entre 1956 et 1993

Type physiologique	Surface (ha)		Différence (ha)	% de différence 1956-1993
	1956	1993		
Ilot arbustif sur éboulis	0,009	0,064	0,055	611
Piquetage herbacé	0,17	0,29	0,12	70,58
Ilot arbustif sur formation végétale	0,125	0,149	0,024	19,2
Forêt	4,06	4,23	0,17	4,18
Pelouse	1,4	1,39	-0,01	-0,71
Secteur rhexistasique	1,693	1,44	-0,253	-15
Lande	0,398	0,232	-0,166	-41,70



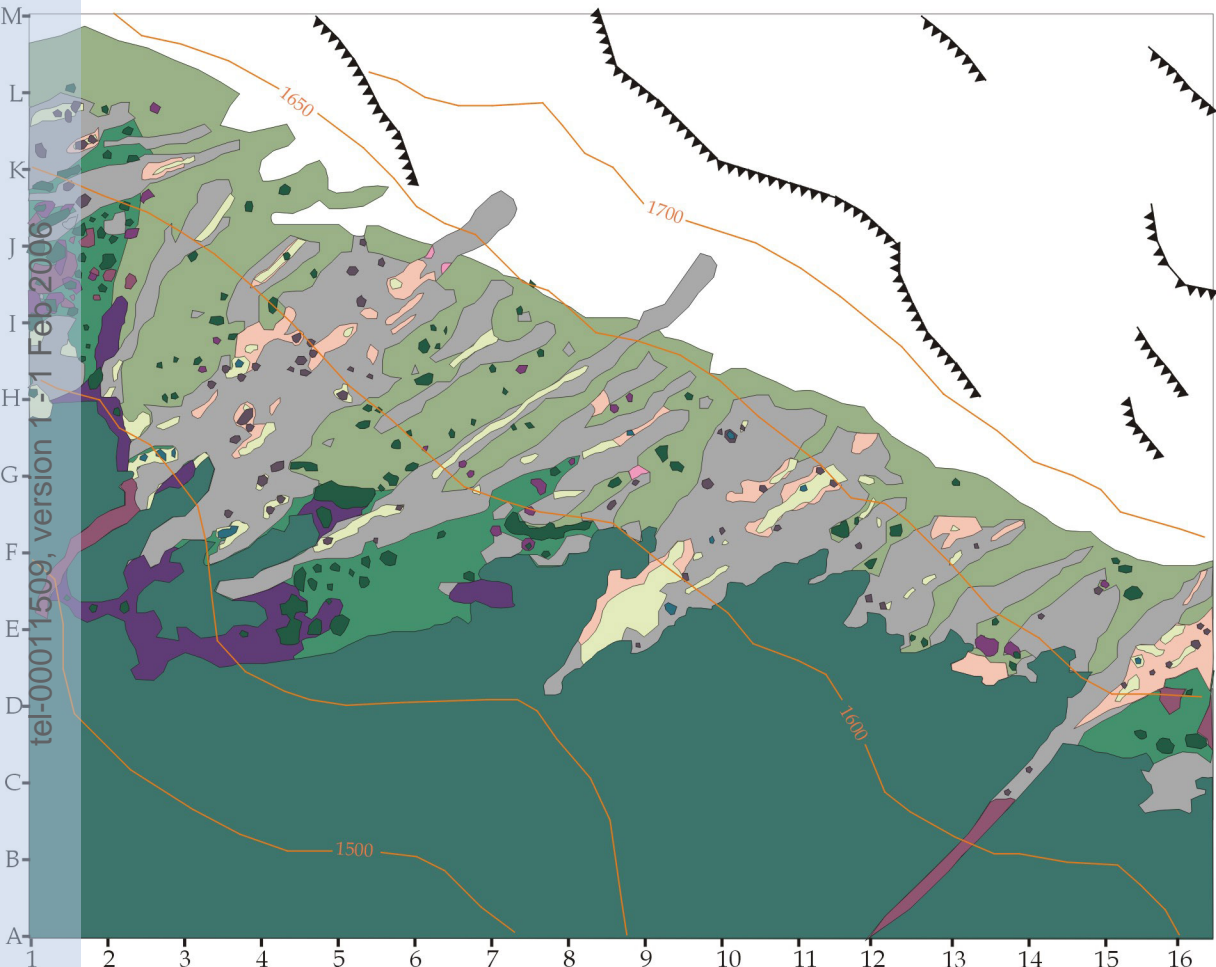
Graphique 32 : Evolution de la surface occupée par les types physiologiques, entre 1956 et 1993.

Quatre types physiologiques montrent une évolution sensible. La colonisation arbustive sur secteur rhexistasique a été la plus importante entre 1956 et 1993. Sa surface a été multipliée par 7 sur une trentaine d'années. Une valeur identique avait été enregistrée pour le Grand Som sur la période 1920-1956 et la Grande Sure entre 1956 et 2003, mais elle concernait la progression arbustive sur formation végétale. La tendance s'inverse ici. L'éco-complexe des Pelloux a connu une exploitation pastorale jusqu'en 1914 (Cartes 3 et 4 et détails en annexe A). Cependant, aucun habert n'est répertorié sur le cadastre parcellaire et en raison de la difficulté d'accès au site, nous pensons qu'il ne s'agissait pas d'un pâturage très exploité à l'image de ceux du Grand Som et de la Grande Sure.

Par conséquent, l'impact anthropique a été moins important et il est probable que la colonisation arbustive des formations périphériques de type lande et pelouse ait connu une rapide extension avant 1956. En ce qui concerne l'évolution de la strate arbustive sur éboulis entre 1956 et 1993, elle constituerait plutôt une réponse de la végétation à la diminution des processus d'érosion nivéo-péglaciaires. Cette hypothèse a également été formulée pour le Grand Som et la Grande Sure sur la même période. L'évolution de deux autres types physiologiques nous permet, encore une fois, d'appuyer cette hypothèse.

Le piquetage herbacé sur éboulis s'est légèrement développé, sa surface est passée de 0,17 ha à 0,29 ha, soit une évolution de 70% sur la période. Il privilégie les zones de contact avec les formations périphériques et progresse essentiellement par « capillarité », pour les taches les plus anciennes (J-K 1,5 ; G-H 3,7-5,2 ; D-E 8,2-9,8 ; F 11-D 14,5-16, 5) et de manière longitudinale pour les taches récentes (H-I 6 ; G 8,5-9,2 ; G 12 ; F 13). Certaines taches ont connu une extension moyenne de 21 mètres (D 9) sur la période. De plus, l'extension de la lande et de la forêt en zone distale du talus entraîne la fermeture progressive des couloirs avalancheux (E2 ; A13 ; D 1,2-5), ce qui tend à confirmer le ralentissement de la morphodynamique du dépôt. Il s'agit bien dans le cas de ces trois éco-complexes, d'éléments assez révélateurs de la dynamique en cours.

Carte n° 19 : Evolution de la physionomie végétale du talus d'éboulis des Pelloux entre 1956 et 1993.



Légende :

----- Corniche principale (calcaire urgonien)

Classes physionomiques et dynamiques

Formations présentes en 1956

- Formation (s) ligneuse (s)
Forêt
- Formation (s) de transition
Lande
- Ilot arbustif sur formation végétale herbacée et sous-arbustive
- Ilot arbustif sur éboulis
- Formation (s) non boisée (s)
Piquetage herbacé
Pelouse
- Secteur faiblement végétalisé
Secteur rhexistatique

Formations développées entre 1956 et 1993

- Formation (s) ligneuse (s)
Forêt
- Formation (s) de transition
Lande
- Ilot arbustif sur formation végétale herbacée et sous-arbustive
- Ilot arbustif sur éboulis
- Formation (s) non boisée (s)
Piquetage herbacé
Pelouse
- Non cartographié (secteur à vires herbeuses)



Sources : ARQUES, 2003.
 -Photographie aérienne, IGN, mission 1956 (noir et blanc), n°193, 1/30 000° (env.).
 -Photographie aérienne, IGN, mission 1993 (IRC), n°1528, 1/17 000°.
 -Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000 °, Top 25, OT 3334.

2.3.3.2. L'évolution de la structure de la mosaïque biorhexistasique, entre 1956 et 1993

A. L'évolution des périmètres des unités physionomiques

Le piquetage herbacé et la strate arbustive sur éboulis enregistrent une augmentation rapide de leur périmètre, grâce à leur extension sous la forme de multiples petites taches. Cette évolution a contribué à réduire la surface occupée par le secteur rhexistasique. Elle est conforme à celle observée pour les surfaces.

Tableau 28 : Evolution des périmètres des unités physionomiques, entre 1956 et 1993

Type physionomique	Périmètre (m)		Différence (m)
	1956	1993	
Piquetage herbacé	1098,75	1848,75	750
Ilot arbustif sur éboulis	1108,75	509,62	599,13
Forêt	1792,5	2057,5	265
Ilot arbustif sur formation végétale	1195,12	1395,12	200
Pelouse	2372,5	2362,5	-10
Lande	1135	1072,5	-62,5
Secteur rhexistasique	3201,25	2107,5	-1093,75

Le front forestier a progressé au sud de l'écomplexe, au détriment de la pelouse et de la lande et sous l'effet d'une fusion de quelques îlots arbustifs (F-H 1-2 ; D-E 1,2-7). L'extension de la strate arbustive par « nucléation » au sein des formations périphériques est faible sur la période, mais comme elle s'est réalisée sous forme de petites taches, cela contribue à faire augmenter la valeur de son périmètre.

Le rapport « périmètre/surface » nous permet d'appréhender l'éventuelle complexification ou la simplification de la mosaïque sur la période. Nous distinguons quatre cas :

- le périmètre et la surface augmentent mais le rapport « périmètre/surface » diminue : le périmètre augmente ici moins vite que la surface. Cela révèle une simplification des contours graphiques des taches. C'est le cas du piquetage herbacé, des îlots arbustifs sur éboulis et des îlots arbustifs sur formation végétale. Leur expansion se fait soit sous forme de petites taches aux contours très simples (formations arbustives), soit par « capillarité » mais sans complexification des contours (piquetage herbacé).

- le périmètre et la surface diminuent et le rapport augmente : le périmètre diminue moins vite que la surface. C'est le cas de la lande et cela traduit un processus de fragmentation (H-J 1-2,5 ; E2 ; B13, D 6).

- périmètre, surface et rapport diminuent : le périmètre diminue ici plus vite que la surface. Il y a simplification des contours par régression. C'est le cas du secteur rhexistasique dont la surface et le périmètre diminuent au profit d'une extension du piquetage herbacé et de la lande, par endroit (E2 ; A13).

Tableau 29 : Evolution du rapport « périmètre/surface » des unités physionomiques, entre 1956 et 1993

Type physionomique	P/S		Différence (m)
	1956	1993	
Lande	0,28	0,33	+
Forêt	0,04	0,04	=
Pelouse	0,16	0,16	=
Piquetage herbacé	0,64	0,63	-
Ilot arbustif sur éboulis	12,31	0,79	-
Ilot arbustif sur formation végétale	0,95	0,93	-
Secteur rhexistasique	0,18	0,14	-

La forêt et la pelouse ne montrent pas de variation significative. Dans les deux cas, les modalités d'extension (forêt) ou de régression (pelouse) n'ont pas été suffisantes pour influencer l'évolution structurale de la mosaïque.

B. Evolution du nombre de taches

L'analyse de l'évolution du nombre de taches confirme la tendance à une colonisation préférentielle sur talus d'éboulis, pour l'éco-complexe des Pelloux. La lignification du secteur rhexistatique est certainement le processus le plus significatif de la période.

Tableau 30 : Evolution du nombre de taches par unité physiologique, entre 1956 et 1993

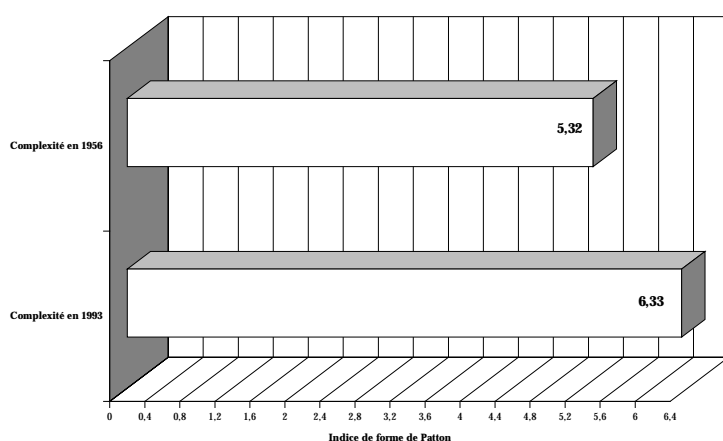
Type physiologique	Nombre de taches		Différence (m)
	1956	1993	
Ilot arbustif sur éboulis	11	74	63
Piquetage herbacé	47	56	9
Secteur rhexistatique	19	27	8
Ilot arbustif sur formation végétale	110	117	7
Lande	6	10	4
Pelouse	5	5	0
Forêt	4	2	-2

L'extension du piquetage herbacé et de la strate arbustive sur éboulis et sur pelouse est certainement à l'origine d'une augmentation de la complexité de la mosaïque biorhexistatique entre 1956 et 1993.

C. L'évolution de la complexité de la mosaïque biorhexistatique, entre 1956 et 1993

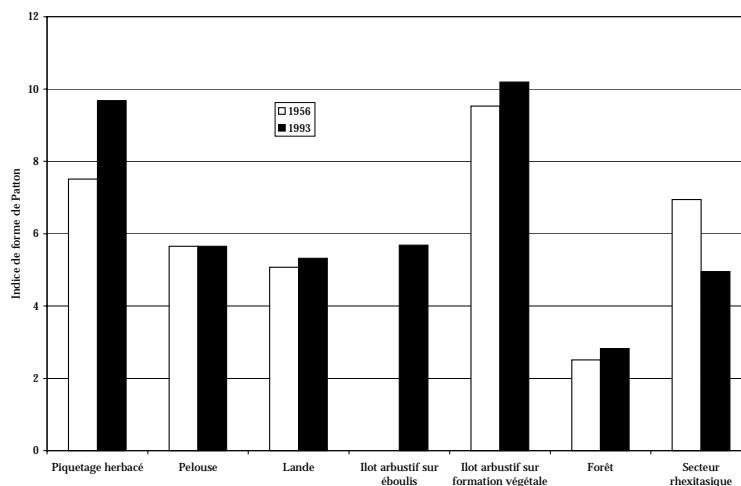
La complexité globale a augmenté de 19% entre 1956 et 1993 (Graphique 33).

Comme nous l'avons souligné précédemment, cette progression s'explique essentiellement par l'extension des formations arbustives et du piquetage herbacé dont les taches prennent des contours plus ou moins sinueux (Graphique 34). La valeur de l'indice des formations arbustives sur éboulis est passée de 0 à 5,68 entre 1956 et 1993. Cette évolution doit certainement contribuer pour une large part à l'évolution de la complexité globale observée.



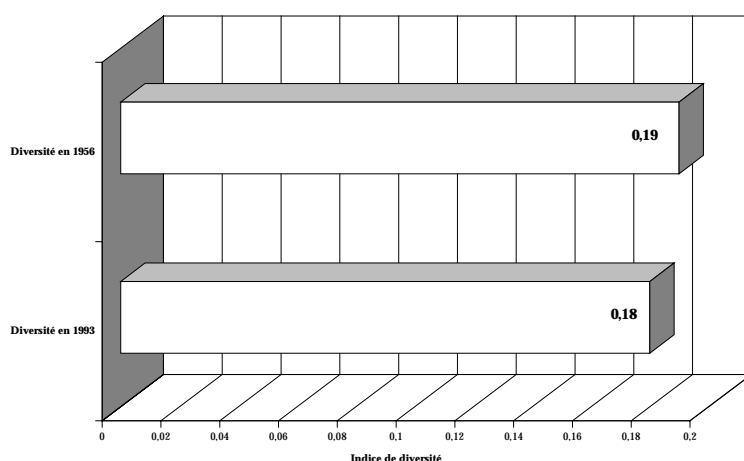
Graphique 33 : Evolution de la complexité globale de la mosaïque biorhexistatique des Pelloux, entre 1956 et 1993.

Graphique 34 : Evolution de la complexité des types physiologiques, entre 1956 et 1993



D. Evolution de la diversité spatiale de la mosaïque biorhexistasique, entre 1956 et 1993

L'éco-complexe des Pelloux est légèrement moins diversifié en 1993 (Graphique 35). Comme le calcul de l'indice est basé sur l'évolution de la surface des unités physiologiques, il semblerait que la régression du secteur rhexistasique, de la pelouse et de la lande ait été plus structurante que la progression par « nucléation » des formations arbustives.



Graphique 35 : Evolution de la diversité globale, entre 1956 et 1993.

L'évolution de l'éco-complexe des Pelloux est sensiblement similaire à celle de la Grande Sure et du Grand Som. Elle révèle : a) un processus de colonisation végétale généralisé qui s'étend sur une trentaine d'années, b) une colonisation à la fois ligneuse et herbacée, c) un processus diversifié en terme de vitesses de colonisation. L'extension arbustive sur éboulis est beaucoup plus rapide que celles des autres types physiologiques et d) un processus diversifié en terme de type de colonisation. Les îlots arbustifs privilégient une colonisation « par nucléation », le piquetage herbacé progresse par « capillarité » à partir de sources existantes mais aussi de manière longitudinale au contact de formations périphériques biostatiques (pelouse), principalement dans la zone apico-proximale du talus. Le front forestier avance grâce à la fusion de la strate arbustive et la lande privilégie une stratégie de « colmatage » des portions rhexistasiques isolées.

Ce qui distingue donc fondamentalement l'évolution de la mosaïque biorhexistasique des « Pelloux » de celles de la Grande Sure et du Grand Som est certainement la forte lignification du talus d'éboulis. Nous pensons que cette évolution constitue une réponse au réchauffement climatique récent. D'autre part, comme pour le Grand Som et la Grande Sure, la progression du

piquetage herbacé et la fermeture des couloirs avalancheux par la lande ou la forêt semblent aussi confirmer cette hypothèse.

2.4. L'évolution de la structure de l'écocomplexe de l'Aulp du Seuil

L'évolution de la mosaïque biorhexistasique de l'Aulp du Seuil est analysée sur 45 ans. L'approche qualitative et quantitative repose sur la carte 20 qui illustre les états successifs de la mosaïque en 1956 et 2001 et sur la carte 21 qui présente l'évolution diachronique sur le demi-siècle.

2.4.1. Etat de la mosaïque en 1956

Trois principaux types physiologiques structurent la mosaïque biorhexistasique en 1956 : la lande arborée, la forêt et le secteur rhexistasique (Carte 20, tableau 31). La physiologie végétale de l'écocomplexe se caractérise par une structure, en apparence très simple, où dominent les formations ligneuses. La répartition des types physiologiques montre :

- une forte hétérogénéité dans la répartition des classes entre les formations végétales périphériques et celles qui colonisent le talus d'éboulis ;
- la présence d'une lande arborée et d'un front forestier denses, en périphérie du cône d'éboulis;

Tableau 31 : Surface occupée par les unités physiologiques en 1956

Type physiologique	Surface (ha)	Fréquence (%)
Lande arborée	1,71	41,39
Forêt	1,14	27,59
Secteur rhexistasique	1,14	27,59
Ilot arbustif sur éboulis	0,086	2,08
Piquetage herbacé	0,055	1,33
Total	4,131	

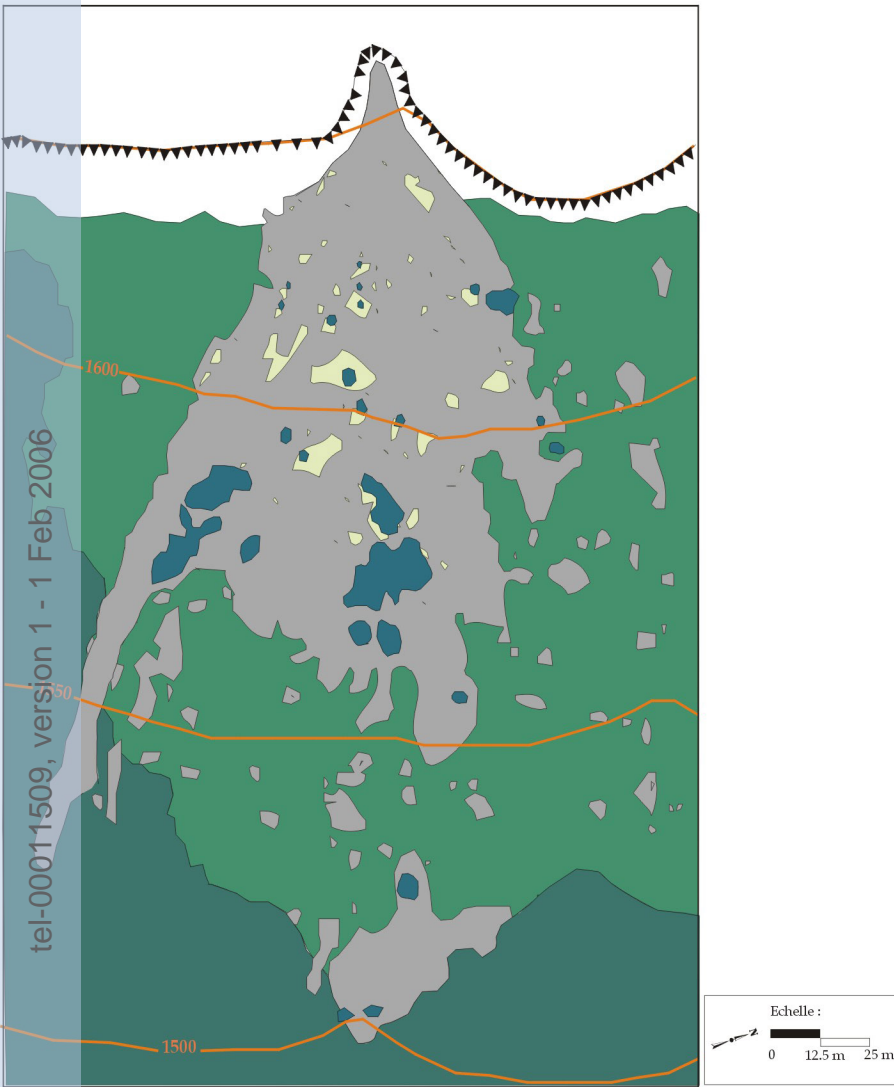
- un cône d'éboulis colonisé par une strate herbacée et arbustive essentiellement en zones médiale et distale. En zone distale, le couvert arbustif est dense. Les ligneux ont pu se développer entre les interstices des gros blocs, bien ancrés dans le substrat, participant au processus de stabilisation du dépôt;
- l'absence de formations périphériques biostatiques de type pelouse ou prairie.

2.4.2. Etat de la mosaïque en 2001

En 2001, l'hétérogénéité se maintient. Cependant, la fréquence du piquetage herbacé et des îlots arbustifs sur éboulis a légèrement augmenté. La répartition des types physiologiques révèle (Carte 20, tableau 32) :

- une extension importante du piquetage herbacé, par « capillarité », au sein de la zone médiale du cône d'éboulis ;
- une progression de la strate arbustive, par « nucléation », sur l'ensemble du cône d'éboulis ;
- une stagnation de la forêt et de la lande arborée.

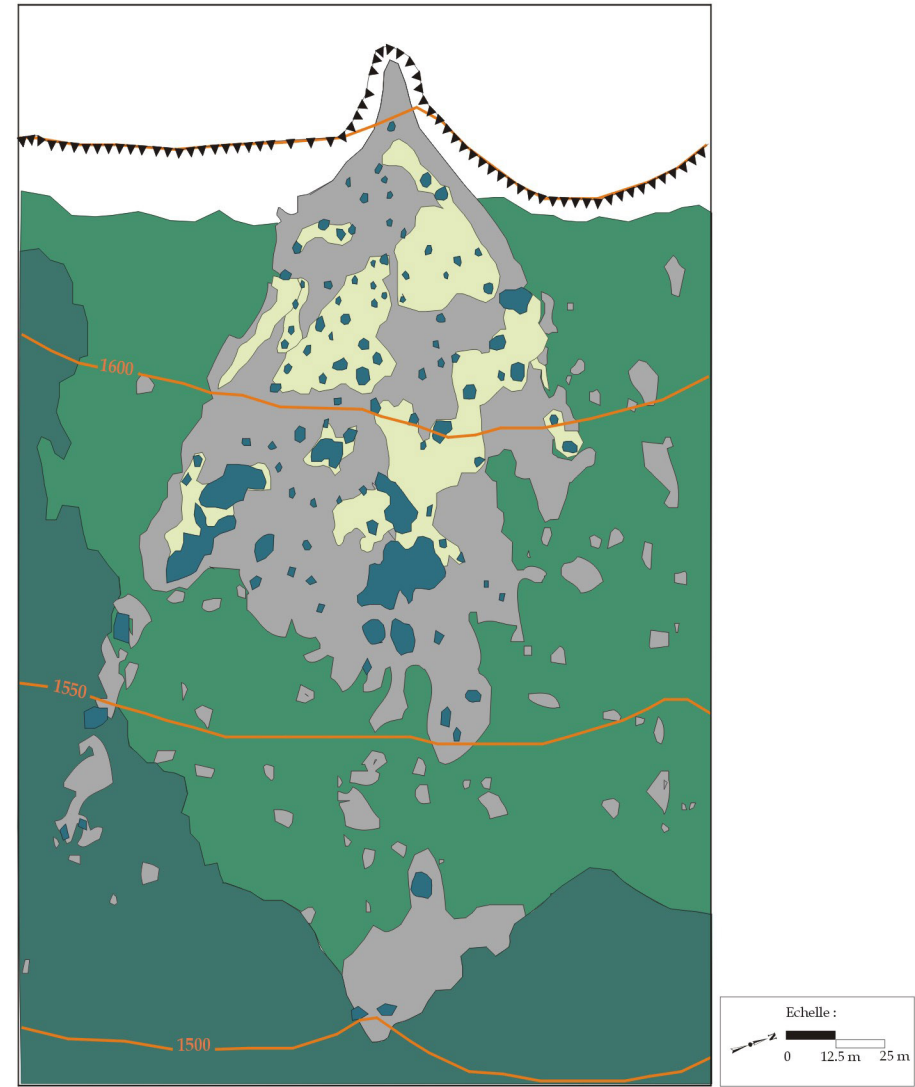
1956



Sources : S. ARQUES, 2003

-Photographie aérienne, IGN, mission 1956 (noir et blanc), n°144, 1/30 000.
 -Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000, Top 25, OT 3334.

2001



Sources : S. ARQUES, 2003

-Photographie aérienne, IFN, mission 1993 (IRC), n°1545, 1/17 000.
 -Photographie oblique, S. ARQUES (2001).
 -Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000, Top 25, OT 3334.

Légende :

▲▲▲▲▲ Corniche principale (calcaire urgonien)

Formation (s) ligneuse (s)

■ Forêt

Formation (s) de transition

■ Lande arborée

■ Ilot arbustif sur formation végétale

■ Ilot arbustif sur éboulis

Formation (s) non boisée (s)

■ Piquetage herbacé

■ Secteur rhexistasique

□ Non cartographié

Tableau 32 : Surface occupée par les types physiologiques en 2001

Type physiologique	Surface (ha)	Fréquence (%)
Lande arborée	1,71	42
Forêt	1,14	28
Secteur rhexistasique	0,845	20,6
Piquetage herbacé	0,253	6,19
Ilot arbustif sur éboulis	0,135	3,30
Total	4,083	

L'évolution du piquetage herbacé et des formations arbustives a provoqué une fragmentation importante du secteur rhexistasique en 2001.

Cette analyse des états successifs d'évolution de la mosaïque biorhexistasique de l'Aulp du Seuil est assez proche de celles présentées pour les éco-complexes précédents. Si les caractéristiques des différents états physiologiques des formations périphériques diffèrent, la végétalisation des secteurs rhexistasiques reste identique en terme de nature (ligneuse et herbacée). L'approche diachronique devrait nous permettre de préciser les modalités d'évolution de la mosaïque en termes de vitesses et de type de colonisation végétale.

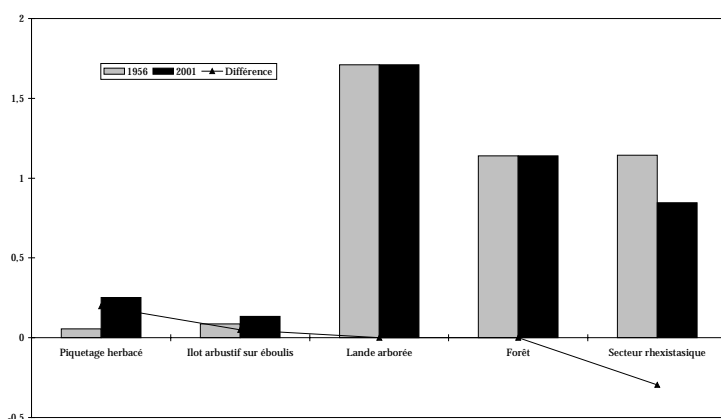
2.4.3. Evolution de la végétation entre 1956 et 2001

2.4.3.1. L'évolution des surfaces occupées par les types physiologiques entre 1956 et 2001

La carte 21, le tableau 33 et le graphique 36 résument l'évolution physiologique de la mosaïque entre 1956 et 2001.

Tableau 33 : Evolution de la surface des types physiologiques entre 1956 et 2001

Type physiologique	Surface (ha) 1956	Surface (ha) 2001	Différence (ha)	% de différence 1956-2001
Piquetage herbacé	0,055	0,253	0,198	360
Ilot arbustif sur éboulis	0,086	0,135	0,049	57
Lande arborée	1,71	1,71	0	0
Forêt	1,14	1,14	0	0
Secteur rhexistasique	1,14	0,845	-0,295	-26



Graphique 36 : Evolution de la surface occupée par les types physiologiques entre 1956 et 2001.

Finalement, deux types physiologiques ont connu une évolution significative. Le piquetage herbacé enregistre une progression par « capillarité » très rapide entre 1956 et 2001, dans la zone médiale du cône d'éboulis. Sa surface a été multipliée par quatre sur 45 ans. La strate arbustive montre une couverture plus homogène mais sa densité est très importante au sein de la zone médiale. Sa surface a progressé de 57 % sur la période. Comme nous l'avons souligné plus haut

(1.4, carte 9), cette zone est caractérisée par la présence d'un vaste bombement central visiblement plus stable que le petit cône apical (Carte 10). L'évolution de la colonisation végétale du cône d'éboulis et la densification végétale du bombement central semblent confirmer ici l'hypothèse d'un processus de stabilisation en cours du dépôt. L'écocomplexe de l'Aulp du Seuil n'a jamais fait l'objet d'une exploitation pastorale depuis 1820. La dynamique ligneuse, arbustive et arborée est très importante en périphérie du cône ce qui explique la configuration actuelle de l'écocomplexe où la lande arborée s'est étendue jusqu'au contact de la corniche et l'absence de formations périphériques de type pelouse ou prairie.

Ces considérations nous amènent à penser que la densification végétale du cône d'éboulis constitue une réponse au réchauffement climatique, dans la mesure où seul un ralentissement de la morphodynamique de surface aurait pu permettre, ici, une amorce de colonisation végétale sur éboulis. Actuellement, seule une petite portion du cône d'éboulis semble être réellement très active en zone apico-proximale et elle est par ailleurs la moins végétalisée (I-J 3,5-6,2). L'évolution du cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil est sensiblement similaire à celles des trois autres talus d'éboulis et notamment à celui des Pelloux, où l'impact anthropique a été moins important.

2.4.3.2. L'évolution de la structure de la mosaïque biorhexistasique, entre 1956 et 2001

A. L'évolution des périmètres des unités physionomiques

L'évolution des périmètres est sans surprise. Les types physionomiques dont les surfaces ont progressé entre 1956 et 2001, enregistrent une augmentation de leur périmètre. La répartition des classes est, ici, identique.

Tableau 34 : Evolution des périmètres des unités physionomiques, entre 1956 et 2001

Type physionomique	Périmètre (m)		Différence (m)
	1956	2001	
Piquetage herbacé	460	975	515
Ilot arbustif sur éboulis	487,5	955	467,5
Forêt	1005	1005	0
Lande arborée	2020	2020	0
Secteur rhexistasique	2685	2560	-35

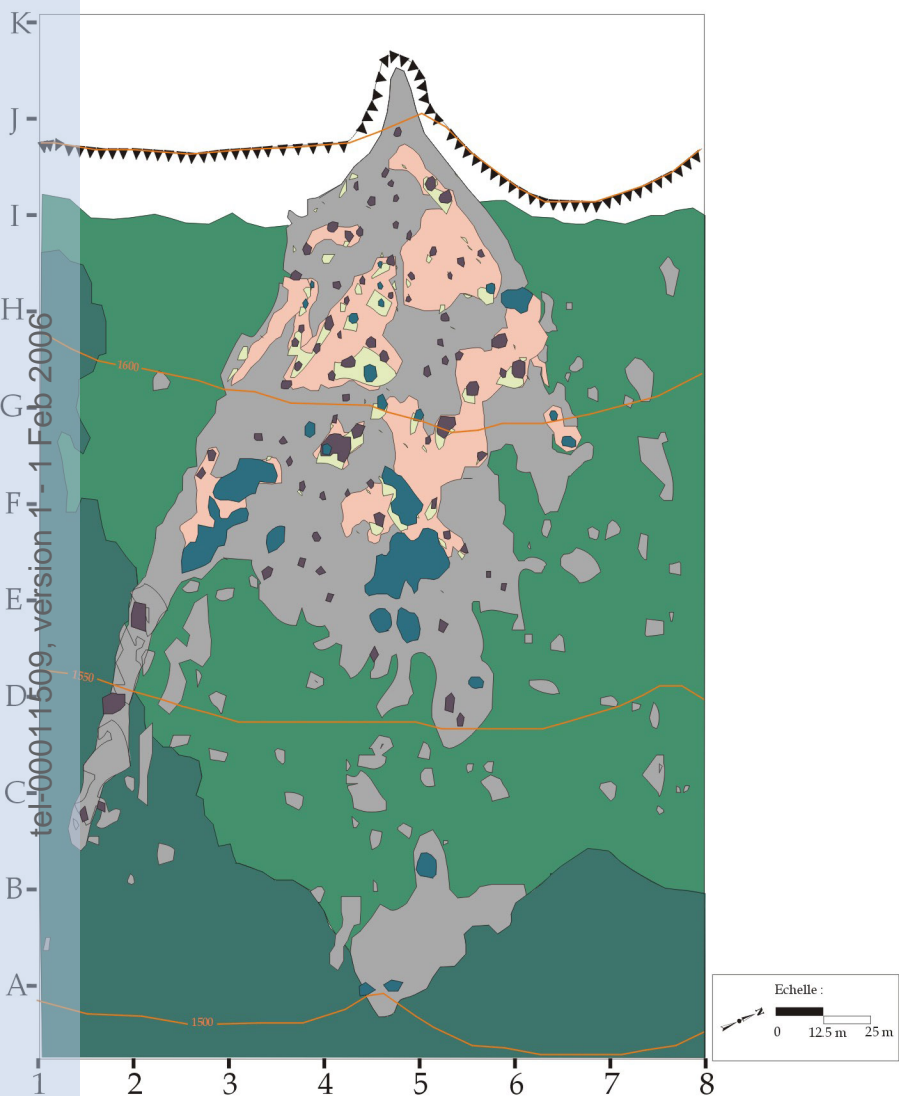
Le périmètre du piquetage herbacé a doublé sur la période. Les taches sont vastes et la sinuosité de leurs contours a augmenté. L'extension des îlots arbustifs sur éboulis, sous forme de multiples petites taches, a bien évidemment contribué à faire augmenter la valeur du périmètre du type physionomique. Le secteur rhexistasique a légèrement régressé au sud de l'écocomplexe, au profit de la lande arborée et du couvert forestier. Par conséquent, la diminution de sa surface a entraîné une diminution de son périmètre.

En termes de complexification et d'hétérogénéité de la mosaïque, les valeurs du rapport « périmètre/surface » permettent de distinguer trois cas (Tableau 35) :

- périmètre, surface et rapport « périmètre/surface » augmentent : le périmètre croît plus vite que la surface occupée par le type physionomique. C'est le cas des îlots arbustifs sur éboulis. La densité et l'hétérogénéité de la colonisation « par nucléation », sous forme de petites et grosses taches, expliquent l'évolution du rapport.

- périmètre et surface augmentent mais le rapport diminue : le périmètre augmente moins vite que la surface et cela entraîne une simplification des contours graphiques des taches. Théoriquement, selon la valeur du rapport, c'est le cas du piquetage herbacé. Mais visuellement (Cartes 20 et 21), il semblerait que la sinuosité des contours ait plutôt augmenté. Peut être n'est elle pas assez importante, ici, pour inverser l'évolution du rapport.

Carte n° 21 : Evolution de la physionomie végétale du cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil entre 1956 et 2001.



Légende :

▼▼▼▼▼ Corniche principale (calcaire urgonien)

Classes physionomiques et dynamiques

Formations présentes en 1956

Formation (s) ligneuse (s)

Forêt

Formation (s) de transition

Lande arborée

Ilot arbustif sur formation végétale herbacée

Ilot arbustif sur éboulis

Formation (s) non boisée (s)

Piquetage herbacé

Secteurs faiblement végétalisés

Secteur rhexistasique

Formations développées entre 1956 et 2001

Formation (s) de transition

Ilot arbustif sur formation végétale herbacée

Ilot arbustif sur éboulis

Formation (s) non boisée (s)

Piquetage herbacé

Non cartographié

Sources : ARQUES, 2003.

-Photographie aérienne, IGN, mission 1956 (noir et blanc), n°144, 1/30 000 (env.).

-Photographie aérienne, IGN, mission 1993 (IRC), n°1545, 1/17 000.

-Photographie oblique S. ARQUES (2001).

-Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000, Top 25, OT 3334.

Ou alors, c'est plutôt la réduction du nombre de taches qui est ici à l'origine d'une diminution de la valeur de l'indice et par conséquent d'une simplification de la structure du piquetage herbacé.

Tableau 35 : Evolution du rapport « périmètre/surface » des unités physiologiques, entre 1956 et 2001

Type physiologique	P/S		Différence (m)
	1956	2001	
Ilot arbustif sur éboulis	0,56	0,70	+
Secteur rhexistasique	0,23	0,30	+
Lande arborée	0,11	0,11	=
Forêt	0,08	0,08	=
Piquetage herbacé	0,83	0,38	-

- périmètre et surface diminuent mais le rapport augmente : le périmètre diminue moins vite que la surface. Il y a fragmentation du type physiologique et/ou complexification des contours par régression. C'est le cas du secteur rhexistasique qui a connu une fragmentation importante sur la période, en raison de la densification du couvert végétal ligneux et herbacé.

B. Evolution du nombre de taches

Comme pour l'écocomplexe des Pelloux, l'évolution du nombre de taches confirme un processus de colonisation préférentielle sur talus d'éboulis pour la période. La colonisation ligneuse et herbacée est cependant plus homogène à l'Aulp du Seuil.

Tableau 36 : Evolution du nombre de taches par unité physiologique, entre 1956 et 2001

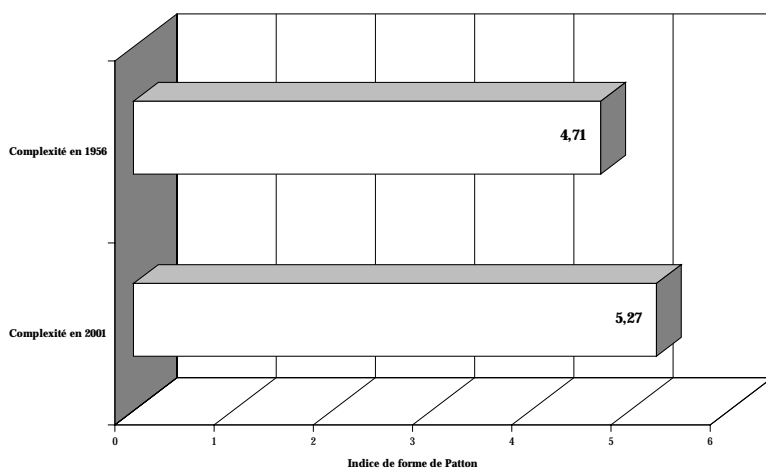
Type physiologique	Nombre de taches		Différence (m)
	1956	2001	
Ilot arbustif sur éboulis	26	104	78
Secteur rhexistasique	58	65	7
Piquetage herbacé	33	7	-26
Lande arborée	1	1	0
Forêt	1	1	0

La progression des îlots arbustifs est très importante. Leur nombre a été multiplié par quatre sur la période. Le secteur rhexistasique enregistre une légère augmentation, due à la fragmentation d'une portion de langue au sud de l'écocomplexe (B-E 1,2-2,2). Concrètement, la structure de la mosaïque biorhexistasique de l'Aulp du Seuil semble être plus fragmentée et plus complexe en 2001. L'analyse des indices de complexité devrait confirmer cet aspect.

C. L'évolution de la complexité de la mosaïque biorhexistasique, entre 1956 et 2001

La complexité globale de l'écocomplexe a augmenté de 12 % entre 1956 et 2001. Cette augmentation est proche de celle observée pour les autres écocomplexes (Graphique 37).

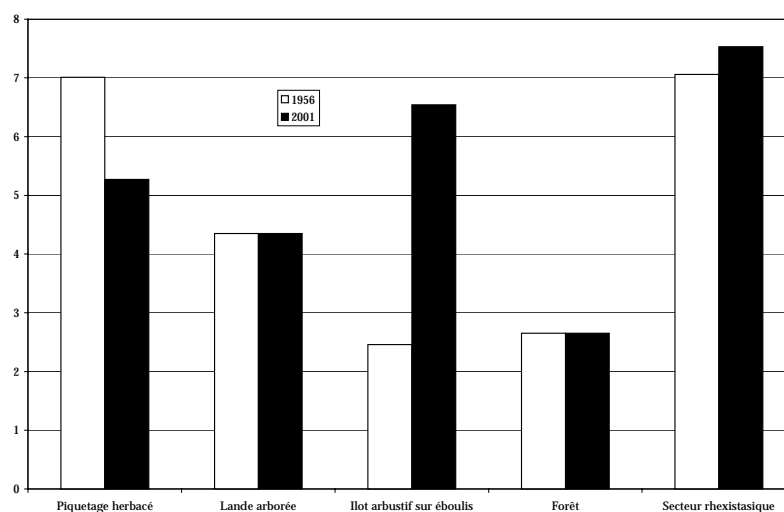
Cette augmentation s'explique essentiellement par l'extension des formations arbustives sur le cône d'éboulis. La colonisation par « nucléation » a eu un effet très structurant (Graphique 38 et carte 21).



Graphique 37 : Evolution de la complexité globale de la mosaïque biorhexistatique de l'Aulp du Seuil, entre 1956 et 2001.

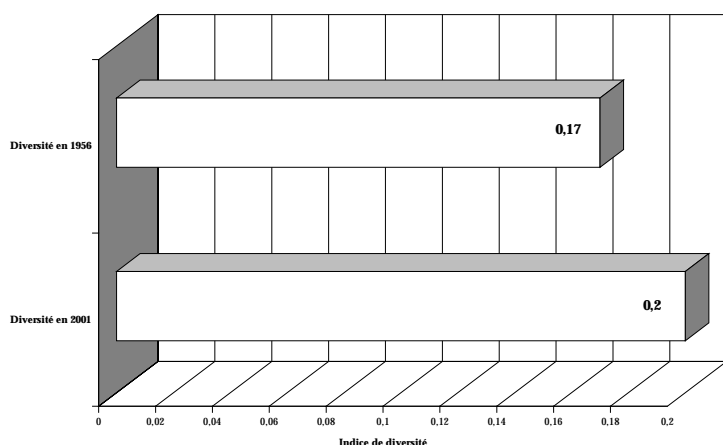
La complexité du piquetage herbacé a diminué en raison d'une fusion des taches initiales et d'une diminution de leur nombre. La fragmentation du secteur rhexistatique par le piquetage herbacé et les îlots arbustifs a contribué à augmenter sa complexité sur la période. Les autres types physiologiques ne montrent pas d'évolution significative.

Graphique 38 : Evolution de la complexité des types physiologiques, entre 1956 et 2001



D. Evolution de la diversité spatiale de la mosaïque biorhexistatique, entre 1956 et 2001

La diversité spatiale a augmenté de 17,6% sur la période (Graphique 39). L'indice est très sensible aux augmentations et/ou aux diminutions des surfaces occupées par les types physiologiques. Par conséquent, sa valeur en 2001 s'explique essentiellement par l'extension des strates herbacée et arbustive sur le cône d'éboulis.



Graphique 39 : Evolution de la diversité spatiale globale, entre 1956 et 2001.

Finalement, la nature de l'évolution végétale (ligneuse et herbacée) sur talus d'éboulis est identique pour les quatre écosystèmes. Les modalités d'évolution sur talus d'éboulis et en périphérie, en termes de vitesses et de type de colonisation végétale, diffèrent en raison, d'une part, de l'impact anthropique et, d'autre part, en fonction des conditions mésologiques des écosystèmes. Les différences dans les conditions mésologiques seront développées dans les chapitres 8 et 9. Pour le Grand Som et la Grande Sure, les formations périphériques ont été les premières à répondre rapidement à la déprise pastorale (pelouse, prairie, forêt, formations arbustives). D'une manière générale, après 1956, la colonisation végétale des talus d'éboulis s'est amplifiée. Elle a été très rapide à l'Aulp du Seuil et aux Pelloux. Dans la mesure où l'impact anthropique a été plus faible, nous considérons qu'il s'agit bien d'une réponse au réchauffement climatique. De plus, comme ce processus a aussi été observé pour la même période à la Grande Sure et au Grand Som où l'activité pastorale a certainement été moins importante sur talus d'éboulis, nous pensons qu'il s'agit d'une réponse identique. L'évolution végétale de la mosaïque biorhexistatique de l'Aulp du Seuil est donc conforme à celle observée pour les écosystèmes précédents, ce qui tend à fortement confirmer notre hypothèse de départ.

2.5. L'évolution de la structure de l'écosystème de La Plagne

Les trajectoires d'évolution de la mosaïque de La Plagne sont analysées sur trois périodes : 1911, 1978 et 2001. L'étude qualitative et quantitative de l'évolution de la structure de l'écosystème repose sur les cartes 22, 23 et 24 qui illustrent son évolution sur près d'un siècle.

2.5.1. Etat de la mosaïque en 1911

La mosaïque biorhexistatique en 1911 présente une structure assez complexe, hétérogène et déjà très fragmentée dans l'ensemble (Carte 22, tableau 37).

Tableau 37 : Surface occupée par les types physionomiques en 1911

Type physionomique	Surface (ha)	Fréquence (%)
Forêt	1,809	42,06
Secteur rhexistatique	1,786	41,53
Prairie	0,34	8
Lande	0,21	5
Piquetage herbacé	0,13	3
Ilot arbustif sur formation végétale	0,016	0,37
Ilot arbustif sur éboulis	0,009	0,20
Total	4,3	

Le secteur rhexistasique et la forêt occupent 83% de la surface totale de l'écocomplexe. Les formations ligneuses sont les plus représentées en périphérie du tablier d'éboulis où elles couvrent 47% de la surface totale contre 0,37 % pour les formations arbustives sur éboulis. En revanche, contrairement au talus d'éboulis du Grand Som par exemple, le tablier d'éboulis de La Plagne est assez bien végétalisé en zone apico-proximale où la prairie et le piquetage herbacé couvrent une surface totale de 0,47 ha, soit 11% de la superficie totale de l'écocomplexe. Dans le détail, la répartition des types physiologiques révèle :

- la présence d'un front forestier dense et très sinueux au contact de la zone distale du tablier;
- un secteur rhexistasique qui occupe presque le tiers supérieur de l'écocomplexe. Plutôt homogène dans l'ensemble, il est colonisé par des formations herbacées dans les zones apico-proximales et médiales, notamment au centre et à l'est de l'écocomplexe. Sa configuration à l'ouest et au sud/ouest est différente et sa structure est très fragmentée au contact de la lande et de la forêt. Cette fragmentation indique peut être un processus de fermeture de la mosaïque par colmatage régulier des petites portions rhexistasiques isolées.
- une colonisation de la zone apico-proximale, parfois de la zone médiale, du tablier d'éboulis par une prairie dense biostasique et un piquetage herbacé. La configuration particulière du piquetage herbacé au contact de la prairie, indique peut être un processus de succession végétale en cours ;
- une timide colonisation des formations arbustives sur lande et sur prairie ;
- l'absence d'une strate arbustive dense sur éboulis.

L'originalité de la mosaïque biorhexistasique de La Plagne en 1911 est due à la présence de formations herbacées au sein du tablier d'éboulis.

2.5.2. Etat de la mosaïque en 1978

En 1978, l'hétérogénéité dans la répartition des types physiologiques se confirme. Le front forestier connaît une progression importante et la forêt occupe presque la moitié de la surface de l'écocomplexe. La répartition des types physiologiques révèle (Carte 22, tableau 38) :

- le maintien des surfaces élevées pour les types « forêt, secteur rhexistasique et prairie »;
- une progression rapide du piquetage herbacé par « capillarité » au contact de la prairie, notamment dans la zone médiale du tablier d'éboulis. Son extension à l'ouest de l'écocomplexe est différente. Elle s'est effectuée sous la forme de multiples petites taches qui se sont installées dans la zone médiale du dépôt. Sa surface en 1978 est très proche de celle occupée par la prairie;
- une régression du secteur rhexistasique au profit d'une extension des formations herbacées, la fragmentation du tablier semble s'accroître;
- une fermeture concentrique par « colmatage » des portions rhexistasiques situées à l'ouest de l'écocomplexe, par la lande, la forêt et le piquetage herbacé;

Tableau 38 : Surface occupée par les types physiologiques en 1978

Type physiologique	Surface (ha)	Fréquence (%)
Forêt	2,087	49,6
Secteur rhexistasique	0,908	21,6
Prairie	0,433	10,3
Piquetage herbacé	0,43	10,2
Lande	0,3	7,14
Ilot arbustif sur formation végétale	0,042	1
Ilot arbustif sur éboulis	0,016	0,38
Total	4,2	

- une densification de la strate arbustive sur lande, à l'ouest de l'éco-complexe ;
- une légère progression de la strate arbustive sur éboulis.

L'état de la mosaïque en 1978 révèle l'amorce d'un processus de colonisation végétale rapide, notamment sur secteur rhexistasique. La densification herbacée est très importante.

2.5.3. Etat de la mosaïque en 2001

L'état de la mosaïque biorhexistasique en 2001 confirme la fermeture progressive du secteur rhexistasique, non seulement au sein des formations périphériques mais aussi sur le tablier d'éboulis. La colonisation végétale herbacée et ligneuse progresse sur l'ensemble de l'éco-complexe.

Tableau 39 : Surface occupée par les types physiologiques en 2001

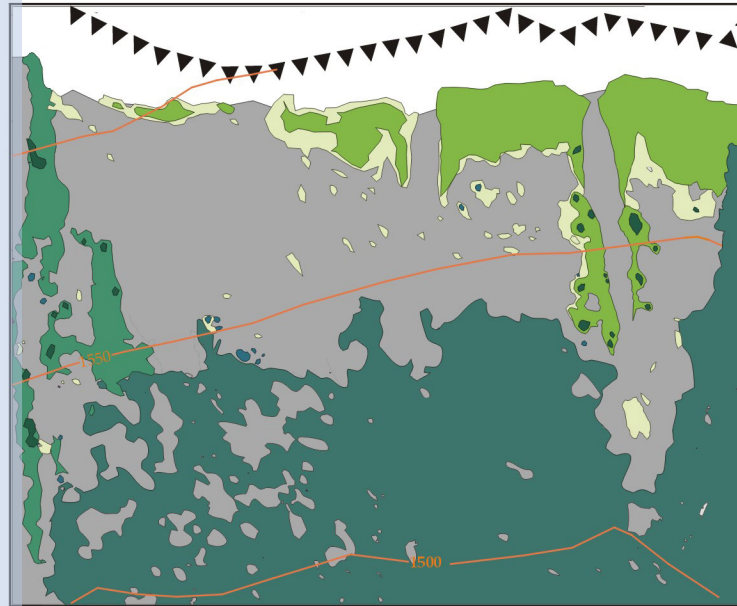
Type physiologique	Surface (ha)	Fréquence (%)
Forêt	2,161	48,23
Prairie	0,671	15
Secteur rhexistasique	0,621	14
Piquetage herbacé	0,504	11,25
Lande	0,365	8,14
Ilot arbustif sur formation végétale	0,12	2,67
Ilot arbustif sur éboulis	0,038	0,84
Total	4,48	

Un processus de succession végétale semble s'opérer, en zone apico-proximale du tablier d'éboulis, entre la prairie et le piquetage herbacé. L'état de la physiologie végétale révèle aussi une implantation arbustive importante sur éboulis et sur prairie.

L'analyse des états successifs d'évolution de la mosaïque biorhexistasique de La Plagne est conforme à celle présentée pour les autres éco-complexes. L'étude détaillée des modalités de cette évolution paysagère en termes de nature, de type et de vitesses de colonisation végétale devrait nous permettre de définir les principales trajectoires d'évolution de la mosaïque et de les comparer à celles des autres éco-complexes. Nous préciserons définitivement à terme, pour l'ensemble des mosaïques biorhexistasiques, les rôles respectifs de l'homme et du climat dans ce processus.

Carte n° 22 : Physionomie végétale du tablier d'éboulis de la Plagne en 1911, 1978 et 2001.

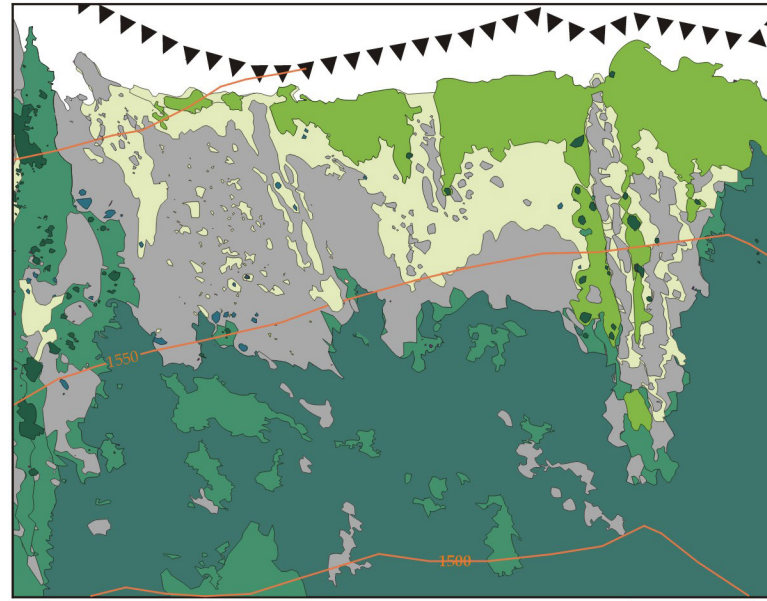
1911



Sources : S. ARQUES, 2003
 -Photographie oblique P. Helbronner (1911)
 -Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000, Top 25, OT 3334.



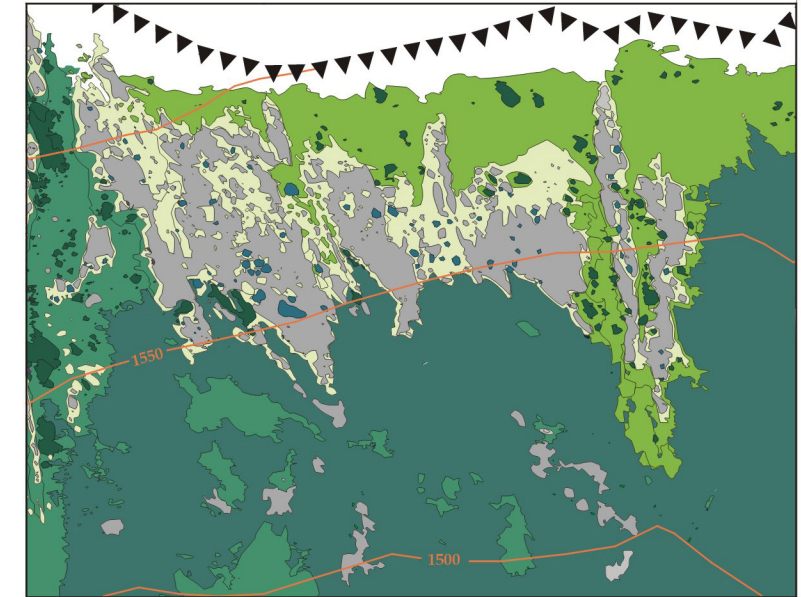
1978



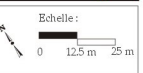
Sources : S. ARQUES, 2003
 -Photographie aérienne, IGN, mission 1956 (noir et blanc), n°137, 1/30 000 (env.)
 -Photographie oblique G. ROVERA (1978).
 -Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000, Top 25, OT 3334.



2001



Sources : S. ARQUES, 2003
 -Photographie aérienne, IGN, mission 2001 (couleurs naturelles), n°1129, 1/25 000.
 -Photographie oblique S. ARQUES (2003)
 -Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000, Top 25, OT 3334.



Légende :

----- Escarpement secondaire

Formation (s) ligneuse (s)

Forêt

Formation (s) de transition

Lande

Ilot arbustif sur formation végétale herbacée et sous-arbustive

Ilot arbustif sur éboulis

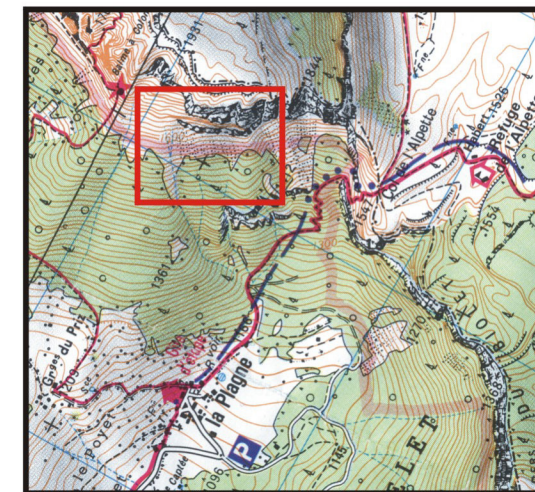
Formation (s) non boisée (s)

Piquetage herbacé

Prairie

Secteur rhexistasique

Non cartographié



Localisation du secteur étudié, 1/25 000°

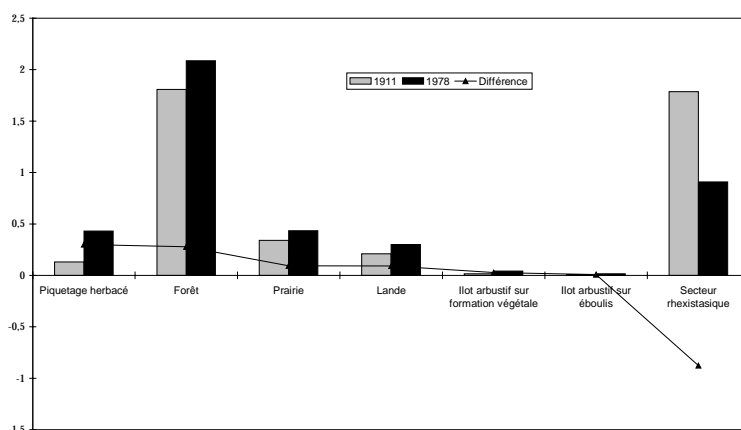
2.5.4. Evolution de la végétation entre 1911 et 1978

2.5.4.1. L'évolution des surfaces occupées par les types physiologiques, entre 1911 et 1978

La carte 23, le tableau 40 et le graphique 40 synthétisent l'évolution de la surface des types physiologiques sur 67 ans. Les types physiologiques sont classés dans l'ordre décroissant des pourcentages de différence entre 1911 et 1978.

Tableau 40 : Evolution de la surface occupée par les types physiologiques, entre 1911 et 1978

Type physiologique	Surface (ha)		Différence (ha)	% de différence 1911-1978
	1911	1978		
Piquetage herbacé	0,13	0,43	0,3	230
Ilot arbustif sur formation végétale	0,016	0,042	0,026	162
Ilot arbustif sur éboulis	0,009	0,016	0,007	77
Lande	0,21	0,3	0,09	43
Prairie	0,34	0,433	0,093	27
Forêt	1,809	2,087	0,278	15
Secteur rhexistasique	1,786	0,908	-0,878	-49



Graphique 40 : Evolution de la surface occupée par les types physiologiques entre 1911 et 1978.

Finalement, tous les types physiologiques ont progressé sur la période au détriment du secteur rhexistasique. Cela tend à confirmer une progressive fermeture paysagère de la mosaïque. La nature de la colonisation végétale est ici identique à celle observée pour les autres éco-complexes. Il s'agit conjointement d'une extension ligneuse et herbacée. Cependant, c'est au sein du tablier d'éboulis que les changements sont les plus importants.

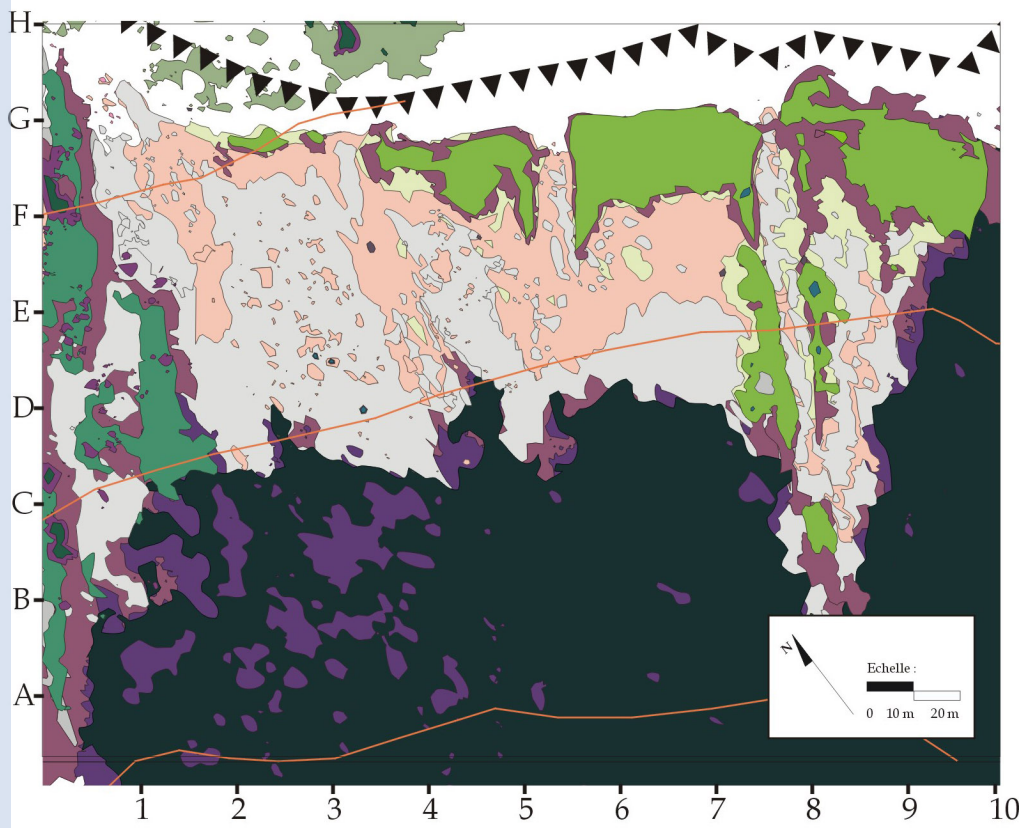
Le piquetage herbacé a presque quadruplé sa surface et enregistre la plus forte progression entre 1911 et 1978. Son extension longitudinale, par « capillarité » au contact de la prairie, est considérable et atteint en moyenne 39 m^{62} (58 cm/an) pour les secteurs à forte progression (D-F 5,5-8,2 ; D-F 4,1-5 ; E 2-2,9) contre $6,25 \text{ m}^{63}$ (3 cm/an) pour les extensions les plus faibles (F-G 2,5-4 ; F 4,4-5,2). Comme nous l'avons souligné précédemment (1.5, carte 11), la zone apico-proximale du tablier d'éboulis de La Plagne est constituée de bombements végétalisés à fines (prairie), situés sous un escarpement secondaire dont l'érosion par haloclastie permet une fourniture importante en matériaux très fins, pulvérulents. La crevaillon régulière des poches de fines a permis au piquetage herbacé de progresser par « capillarité » au contact de la prairie et de manière longitudinale conformément à l'inclinaison du tablier d'éboulis (Figure 35 A, B et C). Un processus identique a été observé au Grand Som.

⁶² Moyenne des cinq plus grandes longueurs.

⁶³ Moyenne des cinq plus petites longueurs.

Carte n° 23 : Evolution de la physionomie végétale du tablier d'éboulis de La Plagne (Savoie) entre 1911 et 1978.

tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2006



Sources : S. ARQUES, 2003

- Photographie oblique P. Helbronner (1911)
- Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000, Top 25, OT 3334.
- Photographie aérienne, IGN, mission 1956 (noir et blanc), n°137, 1/30 000 (env.).
- Photographie oblique G. ROVERA (1978).

Légende

<p> Escarpement secondaire </p> <p>Formations présentes en 1911</p> <ul style="list-style-type: none"> Piquetage herbacé Pelouse Prairie Lande Ilot arbustif sur éboulis Ilot arbustif sur formation végétale herbacée Forêt 	<p>Formations développées entre 1911 et 1978</p> <ul style="list-style-type: none"> Piquetage herbacé Pelouse Prairie Lande Ilot arbustif sur éboulis Ilot arbustif sur formation végétale herbacée et sous-arbustive Forêt <p>Autres</p> <ul style="list-style-type: none"> Eboulis Non cartographié
---	---

Ce modèle général doit être quelque peu nuancé. A l'ouest de l'éco-complexe, le piquetage herbacé est moins dense (C-G 2-4,2). Au contact d'un bombement apical réduit, son extension est relativement faible et atteint 7,5 m (11 cm/an) en moyenne sur la période (F-G 2,5-4). Plus à l'ouest, il prend la forme d'une langue dont la progression a été extrêmement rapide entre 1911 et 1978 (F 2-3).

Inexistante en 1911, elle enregistre une extension de 60 m sur la période, soit presque 1 m par an. Cette langue correspond à une petite lave hydro-gravitaire active, légèrement bombée, constituée de petites terrassettes végétalisées (1.5, carte 11). Elle est alimentée par un petit cône apical situé au contact de la terminaison occidentale de l'escarpement secondaire, dont la hauteur ne dépasse pas 2 m, et dans le prolongement de vires herbeuses qui fournissent, par redistribution au niveau du cône apical, la micro-lave en matériaux fins, selon un processus identique à celui évoqué pour le contact piquetage herbacé/prairie. Des matériaux plus grossiers, issus de l'éboulisation de l'escarpement principal, transitent aussi par le cône apical et viennent se déposer en bordure de la micro-lave ou en zone distale. L'extension du piquetage herbacé est canalisée au sein de la micro-lave et est rendue possible d'une part, grâce à l'alimentation régulière en fines et, d'autre part, grâce à la présence d'espèces stabilisatrices, assez fortement productrices de matière organique (*Thymus praecox*, *Globularia cordifolia* et *Centranthus angustifolius*, par exemple). Nous reviendrons sur cet aspect dans le chapitre 7.

Au sein de la zone médiale, le piquetage herbacé opte pour une stratégie de colonisation par « nucléation » sous forme de multiples petites taches. Cette différence de stratégie est liée à la nature granulométrique de la zone médiale où la proportion de petits blocs, de blocs moyens et de gros blocs augmente (Figure 35 A). En raison de la faible extension du bombement apical, les largages de fines ne sont pas suffisants pour colmater de manière efficace les interstices entre les matériaux et permettre une progression plus homogène du piquetage herbacé. L'évolution de la zone médiale est certes plus lente, mais si le processus s'intensifie il devrait conduire à terme à une densification herbacée. L'analyse de l'évolution végétale sur la période 1978-2001 devrait nous permettre d'en préciser les modalités.

Au centre du tablier d'éboulis, le mode d'extension du piquetage herbacé est conforme au modèle général évoqué plus haut (D-G 4,2-8,2). Les bombements apicaux sont plus étendus et l'alimentation en fines plus importante. L'extension longitudinale du piquetage herbacé a été très rapide, soit 39 m en moyenne sur la période. L'absence d'un piquetage herbacé dense sur certaines portions rhéostasiques, s'explique par la nature granulométrique plus grossière des matériaux en zone médiale et distale (Figure 35 B et C). Sa progression est, par conséquent, plus lente.

A l'est du tablier d'éboulis, contrairement à ce que l'on pourrait imaginer après lecture de la carte, la trajectoire est identique (B-G 9-11). L'extension longitudinale est privilégiée. Comme nous l'avons souligné précédemment (1.5), le bombement apical offre un plan de glissement plus long pour le transit des matériaux issus de l'éboulisation de l'escarpement secondaire qui s'entassent au sein des zones médiales et distales. Le piquetage herbacé progresse de manière longitudinale là où les largages de fines sont plus importants et la granulométrie plus fine. Ce processus contribue à isoler des plages colluviales à matériaux grossiers et explique la configuration actuelle, sinueuse, de certaines taches de piquetage herbacé. La cartographie géodynamique et physiologique réalisée en 2002, nous apporte quelques facteurs explicatifs supplémentaires (Carte 12). Elle indique que certaines plages colluviales sont plus actives que les autres en terme de géodynamique de surface et nous verrons que la configuration végétale de la période 1978-2001 n'est pas très différente. Elles reçoivent donc préférentiellement les matériaux issus de l'éboulisation de l'escarpement secondaire. Par conséquent, ce processus explique aussi la progression sélective du piquetage herbacé au sein de secteurs colluviaux plus stables.

Sur éboulis, à l'exception du piquetage herbacé, la prairie et les formations arbustives n'enregistrent qu'une faible extension entre 1911 et 1978.

Hors texte n°1

A ce stade du développement, nous aimerions développer une petite hypothèse à propos du processus d'haloclastie. Nous pensons qu'il participe activement à la constitution et à l'évolution des bombements apicaux. D'une manière générale, ce processus s'exerce essentiellement dans les milieux arides chauds mais PRICK (1999) souligne qu'il peut exister, de façon moins généralisée, dans les milieux périglaciaires. Des expériences de désagrégation des roches par les sels, menées en laboratoire par BIROT, HENIN, GOUDIE et EVANS (*in* BIROT, 1980), ont montré que l'immersion dans une solution saline, à la température ordinaire, avec des phases de dessiccation en étuve (entre 30° et 80°C) n'avaient que peu affecté les roches cristallines compactes et faiblement poreuses comme les granites, les dolérites ou les diorites. En revanche, certains grès, certains calcaires et des échantillons de craie ont été entièrement désagrégés en quelques cycles, tantôt en grains, tantôt en petits éclats. BIROT (1980) souligne que ces roches sensibles ont une grande porosité, et absorbent rapidement l'humidité (10 % en quelques minutes ce qui est un chiffre extraordinairement élevé).

En mars 2002, nous avons effectué quelques marquages à la peinture sur la paroi marno-calcaire de l'escarpement secondaire (Barrémien inférieur). Les marquages réalisés sur les facettes de l'interface rocheuse, soumises à l'haloclastie, enregistrent une désagrégation importante entre mars 2002 et juillet 2004 (Annexe J). Les facettes à calcaire plus sain montrent une désagrégation beaucoup moins rapide (Annexe J). Outre les particularités liées à la diversité de faciès qui caractérise l'escarpement secondaire et la sensibilité différentielle de l'interface rocheuse à la cryoclastie et à l'haloclastie, le tablier de La Plagne présente une configuration topographique particulière susceptible de favoriser la météorisation de l'escarpement par haloclastie. Il est situé au sein d'un massif humide, où les précipitations sont très abondantes et il est exposé plein sud, donc soumis à une forte insolation une bonne partie de l'année. Ces conditions peuvent favoriser l'alternance des phases d'humectation et de dessiccation, peut être plus nombreuses aujourd'hui. Ceci nous a conduit à envisager une hypothèse qui pourrait paraître un peu « fantaisiste » mais qui mériterait peut être d'être prise en compte à l'avenir, en tous cas en ce qui concerne l'évolution future du tablier de La Plagne.

Le réchauffement climatique est attesté en Chartreuse (Chapitre 1). La tendance indique une augmentation des températures, notamment estivales, à partir du début des années 80. Parallèlement, nous avons montré que les précipitations n'enregistraient pas de modification significative et la nébulosité est en générale assez importante. Par conséquent, il est possible que le réchauffement climatique ait contribué à amplifier le processus d'haloclastie. Comme ce processus permet l'alimentation en fines des bombements apicaux, et si celui-ci augmente, les largages à l'aval devraient être plus importants ce qui contribuerait à favoriser la colonisation herbacée mais aussi ligneuse. Bien évidemment, le processus est complexe et pourrait faire l'objet d'une étude ultérieure à l'aide de méthodes appropriées mais nous pensons qu'il est à envisager en tant que facteur explicatif de la progression herbacée observée à partir de 1978.

L'extension arbustive sur éboulis est limitée sur la période. Quelques petits îlots apparaissent mais leur progression est sans commune mesure avec celle observée pour la strate herbacée. Ils se développent préférentiellement au contact du piquetage herbacé, sans stratégie de colonisation spécifique, visible sur la période.

La prairie montre une progression moyenne de 12,5 m (18 cm/an) à l'est du tablier contre 3,5 m (5 cm/an) à l'ouest et au centre. Si l'on compare cette évolution à celle du piquetage herbacé, elle apparaît peu significative. En revanche, il s'agit de l'extension d'une formation biotasiqne dense et stable par succession végétale sur un milieu rhexistasiqne (Cartes 22 et 23). Sa progression résulte de la mise en place préalable de conditions édaphiques ponctuelles favorables, par le piquetage herbacé. Par conséquent, comme l'installation du piquetage herbacé sur éboulis est

principalement tributaire d'une diminution des processus d'érosion nivéo-périglaciaires qui entretiennent la rhexistasie sur éboulis, l'extension des deux types physiologiques pourrait constituer une réponse au réchauffement climatique récent.

Certes, la déprise pastorale, amorcée en 1914, a certainement favorisé la colonisation herbacée et notamment l'extension de la prairie. Cependant, comme pour l'éco-complexe des Pelloux nous pensons que l'exploitation pastorale a été peu importante ici. Le cadastre ne mentionne pas la présence d'haberts et le versant offre de vastes pelouses un peu plus au nord-ouest, en direction du Granier. De plus, les alpages de l'Alpette et de l'Alpe ne sont pas très loin. Nous pensons qu'il s'agissait éventuellement d'un pâturage d'appoint privé. Par conséquent, si l'arrêt de la pression pastorale, peut expliquer la progression de la prairie, nous pensons qu'elle n'intervient que pour une faible part dans l'extension considérable du piquetage herbacé au sein du secteur rhexistasique. Outre des explications liées aux conditions mésologiques, une réponse au réchauffement climatique nous paraît être la principale explication, à retenir à partir des années 80.

En périphérie du tablier d'éboulis, la surface des îlots arbustifs a doublé entre 1911 et 1978, soit une progression de 162%. Elle n'est pas très significative au regard de celles enregistrées pour les autres éco-complexes. Ceci est principalement dû à la concurrence exercée par les espèces de la lande, dont la progression atteint 43% sur la période. L'extension de ces deux types physiologiques a été favorisée par la déprise pastorale car dans les portions non colonisées par la lande, ce sont les espèces de la pelouse qui se développent. Au contact du secteur rhexistasique, la lande montre une dynamique particulière liée à la stratégie d'expansion d'*Arctostaphylos uva-ursi*. La lande à *Arctostaphylos uva-ursi* s'étend principalement de manière latérale (A-G 1-2,5) et par colmatage concentrique des portions rhexistasiques isolées (C-D 1,8). L'extension moyenne est de 6 m (8 cm/an) sur la période quelque soit le mode de colonisation. Si le processus se poursuit, il pourrait conduire à la fermeture rapide du secteur rhexistasique isolé, situé à l'ouest de l'éco-complexe (B-E 1-2).

Au sud et à l'est de l'éco-complexe, la forêt adopte une trajectoire de colonisation frontale (C5 ; C-E 9,5-10,5), au contact du secteur rhexistasique, et par colmatage des trous à l'intérieur de la formation (A-C 2-5). Nous n'observons pas, sur la période, de processus de fusion d'îlots arbustifs au profit du couvert forestier. Ce processus est plutôt caractéristique des éco-complexes qui ont connu une forte exploitation pastorale et où les prélèvements réguliers de petit bois ont entretenu l'ouverture des pelouses (Grande Sure, Grand Som). Ce qui n'est pas le cas pour l'éco-complexe de La Plagne.

Bien évidemment, la progression des différents types physiologiques a entraîné une régression du secteur rhexistasique qui selon nous, annonce un processus de fermeture paysagère de la mosaïque biorhexistasique.

2.5.4.2. L'évolution de la structure de la mosaïque biorhexistasique, entre 1911 et 1978

A. L'évolution des périmètres des unités physiologiques

Conformément à l'évolution constatée pour les autres éco-complexes, le périmètre des unités physiologiques évolue en même temps que leur surface (Tableau 41). La régression du périmètre du secteur rhexistasique s'explique essentiellement par l'extension du piquetage herbacé, de la forêt et de la lande. Visuellement, l'extension des périmètres des types physiologiques s'est accompagnée d'une complexification des contours des taches.

Tableau 41 : Evolution des périmètres des unités physiologiques, entre 1911 et 1978

Type physiologique	Périmètre (m)		Différence (m)
	1911	1978	
Piquetage herbacé	10125,	2090	1077,5
Ilot arbustif sur éboulis	130	190	60
Ilot arbustif sur formation végétale	207,5	352,5	145
Forêt	2170	2275	105
Prairie	705	1017,5	312,5
Lande	805	1272,5	467,5
Secteur rhexistasique	3615	2690	-925

L'analyse des valeurs du rapport « périmètre/surface » nous permet de distinguer trois cas (Tableau 42) :

- périmètre et surface augmentent mais le rapport « périmètre/surface » diminue : le périmètre augmente moins vite que la surface et cela entraîne une simplification des contours graphiques des taches. C'est le cas des formations arbustives périphériques et sur éboulis dont les contours graphiques sont peu sinueux et réduits à de simples formes géométriques. C'est aussi le cas de la forêt dont la sinuosité des contours a fortement régressé depuis 1911 (Cartes 22 et 23). Théoriquement, le piquetage herbacé est aussi dans ce cas alors que la cartographie indique le contraire.

Tableau 42 : Evolution du rapport « périmètre/surface » des unités physiologiques, entre 1911 et 1978

Type physiologique	P/S		Différence (m)
	1911	1978	
Piquetage herbacé	0,77	0,48	-
Ilot arbustif sur éboulis	1,44	1,18	-
Ilot arbustif sur formation végétale	1,29	0,83	-
Forêt	0,11	0,10	-
Prairie	0,20	0,23	+
Lande	0,38	0,42	+
Secteur rhexistasique	0,20	0,29	+

- périmètre, surface et rapport augmentent : le périmètre croît plus vite que la surface. C'est le cas de la prairie et de la lande dont l'extension se fait par expansion sinueuse des bordures par « capillarité ».

- périmètre et surface diminuent et le rapport augmente : le périmètre diminue moins vite que la surface. Cela traduit une fragmentation du type physiologique et/ou une complexification des contours des taches par régression. C'est le cas du secteur rhexistasique dont la fragmentation a augmenté sous l'effet de l'extension du piquetage herbacé et de la lande. D'autre part, au contact du piquetage herbacé la sinuosité de ses contours a augmenté.

Ainsi, les plus grosses taches se sont complexifiées soit par fragmentation, soit par une augmentation de la sinuosité de leurs contours. Ce changement de structure devrait être confirmé par l'évolution des indices paysagers.

B. Evolution du nombre de taches

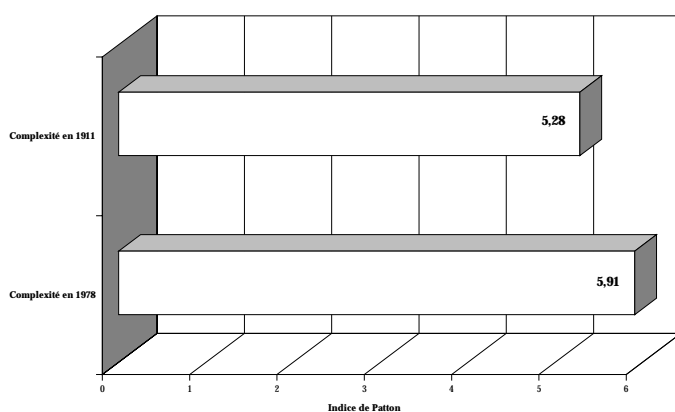
Le nombre total de taches a presque doublé sur la période. Cette évolution va de pair avec une augmentation de la complexité de la mosaïque biorhexistasique (Tableau 43).

Tableau 43 : Evolution du nombre de taches des unités physiologiques, entre 1911 et 1978

Type physiologique	Nombre de taches		Différence (m)
	1911	1978	
Secteur rhexistasique	50	88	38
Piquetage herbacé	44	76	32
Lande	6	30	24
Ilot arbustif sur formation végétale	25	44	19
Ilot arbustif sur éboulis	13	25	12
Prairie	7	9	2
Forêt	1	1	0
Total	146	273	127

Le secteur rhexistasique connaît la plus forte évolution, soit une progression de 76 % du nombre de taches sur la période. La fragmentation de sa structure, par la lande et surtout le piquetage herbacé a été très importante. La mosaïque biorhexistasique en 1978 présente une structure paysagère beaucoup plus complexe que celle observée en 1911, et notamment au sein du secteur rhexistasique.

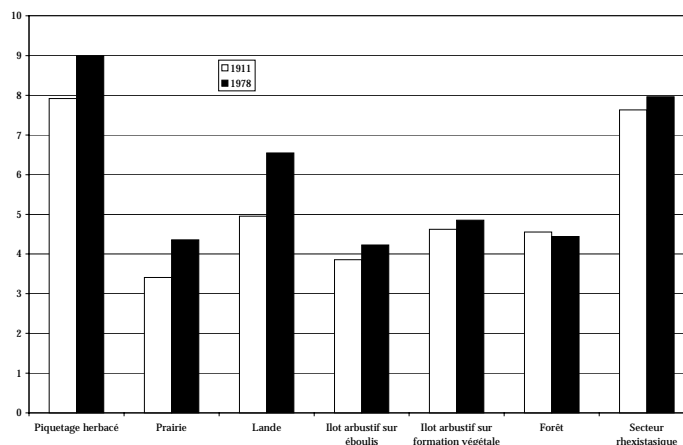
C. L'évolution de la complexité de la mosaïque biorhexistasique, entre 1911 et 1978



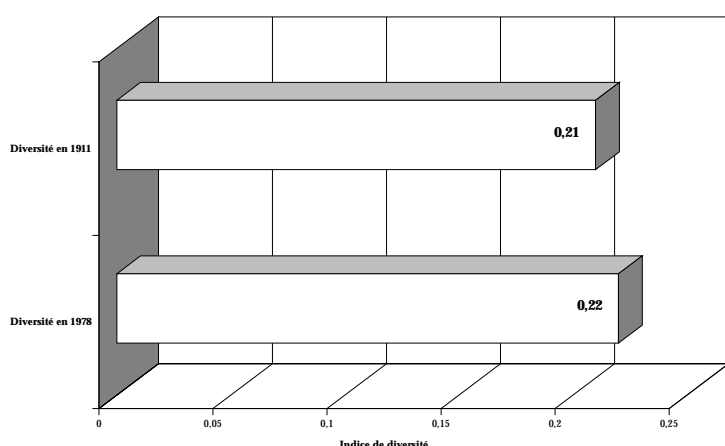
Graphique 41 : Evolution de la complexité globale de la mosaïque biorhexistasique de La Plagne, entre 1911 et 1978.

La mosaïque biorhexistasique de La Plagne est plus complexe en 1978 (Graphique 41). Elle a augmenté de 12% sur la période. L'évolution de la complexité globale est ici liée à l'augmentation de la complexité individuelle de tous les types physiologiques, à l'exception de la forêt (Graphique 42). Ce qui n'a jamais été le cas pour les autres écosystèmes. Deux facteurs expliquent cette évolution. Il s'agit d'une part, de l'extension rapide des types physiologiques sous forme de multiples petites taches et/ou de grosses taches aux contours plus sinueux et, d'autre part, d'une augmentation de la fragmentation des taches du secteur rhexistasique et du piquetage herbacé. La structure de la mosaïque en 1978 est donc plus complexe et plus fragmentée que celle de 1911.

Graphique 42 : Evolution de la complexité des types physiologiques, entre 1911 et 1978



D. Evolution de la diversité spatiale de la mosaïque biorhexistasique, entre 1911 et 1978



Graphique 43 : Evolution de la diversité spatiale globale, entre 1911 et 1978.

La mosaïque biorhexistasique de La Plagne est légèrement plus diversifiée en 1978. Cette augmentation est liée à la progression de la plupart des types physionomiques. D'une manière générale, cet indice ne montre pas de variation significative sur l'ensemble des écosystèmes. Il varie en fonction de la surface occupée par les types physionomiques et n'apporte en fin de compte pas d'information majeure.

Finalement, l'évolution végétale de la mosaïque biorhexistasique de La Plagne sur la période 1911-1978 montre : a) un processus de colonisation végétale généralisé en périphérie et sur secteur rhexistasique, b) un processus diversifié en terme de nature car il s'agit d'une colonisation à la fois ligneuse et herbacée, c) un processus diversifié en terme de vitesses de colonisation. L'extension des formations herbacées a été la plus rapide et d) un processus diversifié en terme de type de colonisation. A l'exception de la fusion d'îlots arbustifs, toutes les stratégies de colonisation sont présentes : colonisation frontale (forêt), par « nucléation » (îlots arbustifs), latérale (lande), longitudinale (prairie et piquetage herbacé), par colmatage (lande) et par « capillarité » (prairie et piquetage herbacé). Les formations herbacées et la lande privilégient, en général, plusieurs stratégies.

Contrairement à l'écosystème du Grand Som, l'extension rapide des formations herbacées sur éboulis constitue le fait marquant de la période. Au Grand Som, suite à la déprise pastorale, l'évolution sur la période 1920-1956 est marquée par une importante progression des formations de transition arbustives sur prairie et sur éboulis. Le piquetage herbacé n'apparaît qu'en 1956. Le temps de réponse des formations arbustives, en périphérie, a été plus court que celui des formations herbacées sur secteur rhexistasique. A La Plagne, il est peut être identique mais en raison de la concurrence des espèces de la lande, leur extension est moins importante. Dans le Chapitre 1, nous avons montré que la Chartreuse enregistrait un léger refroidissement entre 1961 et 1980 et que le réchauffement avait commencé à partir des années 80. La cartographie diachronique de La Plagne porte sur une période de 67 ans, soit 30 ans de plus que le Grand Som. L'année 1978 constitue peut être une date charnière pour l'ensemble des écosystèmes, dans la mesure où elle empiète d'une vingtaine d'années sur la période 1956-2001. Admettons que l'année 1956, date à laquelle nous observons pour tous les écosystèmes une présence herbacée et arbustive sur éboulis, corresponde à la limite supérieure du temps de latence de la végétation suite à la déprise pastorale, intervenue en 1914. Il est possible que l'extension des formations herbacées et arbustives sur éboulis ait débuté pour l'ensemble des écosystèmes à partir de 1956, et qu'elle ait commencé à s'amplifier à l'approche des années 80. Ou alors, doit on considérer que l'extension considérable du piquetage herbacé sur le tablier d'éboulis de La Plagne, traduit une éventuelle

précocité des effets du réchauffement climatique au sein de l'étage infra-périglaciaire ? L'étude de l'évolution de la physionomie végétale entre 1978 et 2001 ainsi que les approches micro-climatiques et dendrochronologiques présentées dans les chapitres suivants, devraient nous permettre de préciser cet aspect.

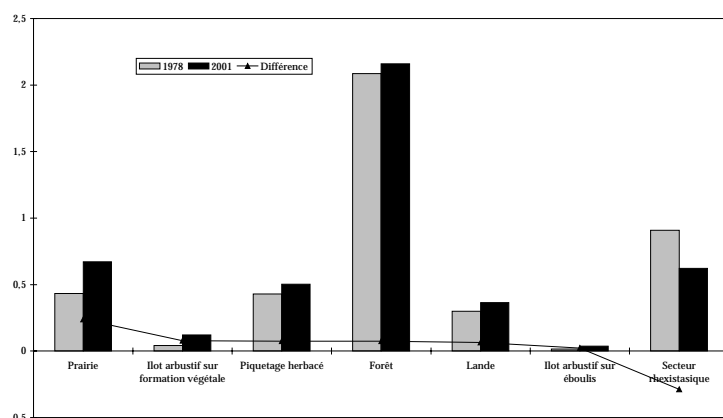
2.5.5. Evolution de la végétation entre 1978 et 2001

2.5.5.1. L'évolution des surfaces occupées par les types physionomiques, entre 1978 et 2001

La carte 24, le tableau 44 et le graphique 44 résument l'évolution de la surface occupée par les types physionomiques entre 1978 et 2001. Dans le tableau 44, les types physionomiques sont classés en fonction des pourcentages de différence décroissants sur la période 1978-2001.

Tableau 44 : Evolution de la surface occupée par les types physionomiques, entre 1978 et 2001

Type physionomique	Surface (ha)		Différence (ha)	% de différence 1911-1978	% de différence 1978-2001
	1978	2001			
Ilot arbustif sur formation végétale	0,042	0,12	0,078	162	185,7
Ilot arbustif sur éboulis	0,016	0,038	0,022	77	137,5
Prairie	0,433	0,671	0,238	27	55
Lande	0,3	0,365	0,065	43	21,6
Piquetage herbacé	0,43	0,504	0,074	230	17,20
Forêt	2,087	2,161	0,074	15	3,54
Secteur rhexistasique	0,908	0,621	-0,287	-49	-31,6



Graphique 44 : Evolution de la surface occupée par les types physionomiques, entre 1978 et 2001.

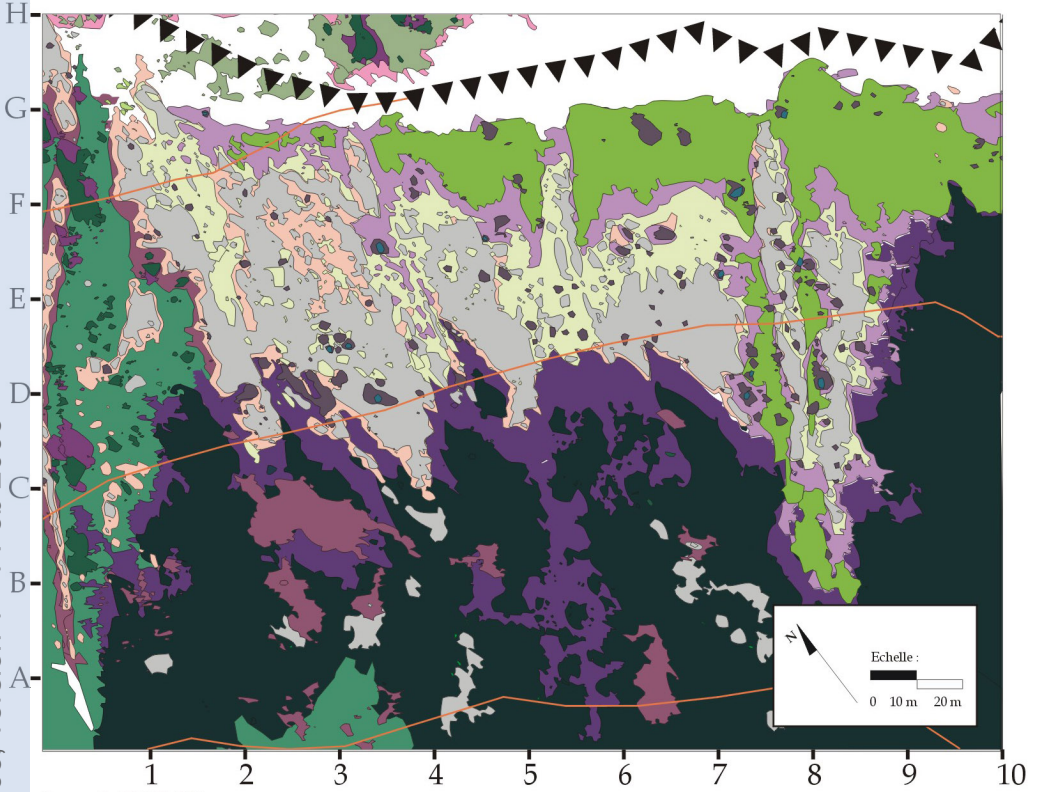
L'évolution constatée sur la période 1911-1978 se confirme. La colonisation végétale, ligneuse et herbacée, s'est amplifiée sur talus d'éboulis et en périphérie depuis 1978. Ce qui confirme un processus de stabilisation en cours du dépôt et une fermeture de la mosaïque biorhexistasique.

A partir de 1978, la dynamique ligneuse est la plus rapide. Les formations arbustives périphériques enregistrent une évolution de 0,078 ha, soit une progression de 185% sur la période contre 162 % entre 1911 et 1978. Leur surface a été multipliée par trois sur une vingtaine d'années. Leur extension s'est principalement opérée, par « nucléation », au sein de la lande et de la prairie, et notamment au centre (F-G 4-7,2) et à l'est de l'éco-complexe (B-G 7,2-10). La réponse est bien tardive pour les îlots nouvellement installés au sein de la prairie biostasique. Nous pensons que leur apparition en 1978 signifie qu'ils étaient certainement présents au début des années 70 mais à l'état de semis (< à 30 cm) et par conséquent non visibles à la photographie.

La strate arbustive sur éboulis s'est aussi extrêmement développée sur la période. Quasiment inexistante en 1978, sa progression atteint 137% entre 1978 et 2001. Sa surface a doublé et son expansion s'est principalement réalisée par « nucléation » au contact du piquetage herbacé.

Carte n° 24 : Evolution de la physionomie végétale du tablier d'éboulis de La Plagne (Savoie) entre 1978 et 2001.

tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2006



Sources : S. ARQUES, 2003

- Photographie aérienne, IGN, mission 1956 (noir et blanc), n°137, 1/30 000 (env.).
- Photographie oblique G. ROVERA (1978).
- Photographie aérienne, IGN, mission 2001 (couleurs naturelles), n°1129, 1/25 000.
- Photographie oblique S. ARQUES (2003)
- Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000, Top 25, OT 3334.

Légende



Escarpement secondaire

Formations présentes en 1978

- Piquetage herbacé
- Pelouse
- Prairie
- Lande
- Ilot arbustif sur éboulis
- Ilot arbustif sur formation végétale herbacée et sous-arbustive
- Forêt

Formations développées entre 1978 et 2001

- Piquetage herbacé
- Pelouse
- Prairie
- Lande
- Ilot arbustif sur éboulis
- Ilot arbustif sur formation végétale herbacée et sous-arbustive
- Forêt

Autres

- Eboulis
- Non cartographié

Elle colonise aussi progressivement les zones médiales et distales à gros blocs, rhexistasiques jusqu'en 1978 (D-F 1,9-3,5 ; E 4-4,5 ; D-E 5,9-7 ; C-E 8). Cet élément confirme le caractère pionnier des ligneux sur gros blocs et révèle un ralentissement de la morphodynamique de surface.

Comme pour les autres écocomplexes, cette extension est sans aucun doute une réponse au réchauffement climatique depuis les années 80. Peut être amorcée au cours de la période précédente grâce à la déprise pastorale, elle est désormais fortement favorisée, voire accélérée, par une réduction de l'activité des processus d'érosion nivéo-périglaciaires. L'activité cryoclastique diminue en fréquence et en intensité (l'haloclastie s'intensifie ?) et les processus post-dépositionnels sont moins actifs en raison notamment de la densité végétale du tablier.

La progression des formations herbacées ne fait que confirmer, une fois de plus, cette tendance. Le processus de succession végétale amorcé entre 1911 et 1978 se confirme ici. La prairie progresse de manière longitudinale et par « capillarité » et tend à recouvrir progressivement les secteurs à piquetage herbacé (E-G 1-9). Sa surface a doublé, soit une progression de 55% sur 20 ans contre 27% entre 1911 et 1978. Son extension longitudinale moyenne est de 14 mètres sur l'ensemble du tablier. Elle est plus homogène et plus rapide que sur la période précédente (60 cm/an).

La progression du piquetage herbacé a ralenti : 21,6% entre 1978 et 2001 contre 230% sur la période précédente. La principale explication est liée à la nature granulométrie grossière des matériaux des zones médiales et distales (Figure 35). Par conséquent, sa progression longitudinale s'est stabilisée (F 4 ; D-F 4,5-7). En revanche, il utilise d'autres modes de colonisation. A l'ouest de l'écocomplexe (C et D 0,5), il participe, avec la lande, au processus de fermeture du secteur rhexistasique par colmatage des portions isolées. Au contact de la lande (D-G 0,5-1,5) et de sources émettrices de piquetage herbacé (E-F 2 ; E4,5), il opte pour une colonisation latérale du secteur rhexistasique qui devrait là aussi déboucher sur une fermeture progressive. Enfin, dans les portions de la zone médiales où la granulométrie est moins contraignante, il progresse par fusion (E-F 2,5). L'extension de la strate arbustive dans les décennies à venir devrait permettre le développement des formations herbacées dans les secteurs à gros blocs. Le processus est plus lent mais il existe déjà sur quelques talus d'éboulis (Grand Som, Aulp du Seuil). La progression se fait à partir d'un îlot arbustif et de « proche en proche ».

La lande et la forêt ont activement participé à la fermeture de la portion rhexistasique isolée, située à l'ouest de l'écocomplexe (A-E 0-1). L'hypothèse formulée plus haut, pour la période précédente, est donc confirmée. La lande à *Arctostaphylos uva-ursi* progresse bien de manière concentrique. L'espèce est capable de recouvrir de vastes surfaces à partir d'un individu dont l'enracinement peut se situer à plusieurs mètres de la portion rhexistasique. Son extension est subaérienne. La dynamique forestière est moins rapide sur la période et notamment au contact du tablier d'éboulis. Comme pour le piquetage herbacé, l'explication réside dans la nature granulométrique des blocs et le front forestier progresse selon une trajectoire préférentielle, ce qui explique sa forte sinuosité.

La mosaïque biorhexistasique de la Plagne est en voie de fermeture paysagère. La biostasie et l'hétérostasie progressent, au détriment de la rhexistasie. Comme la nature granulométrique explique le ralentissement des formations ligneuses et herbacées dans certaines portions de la zone médiale et dans la zone distale, elle explique ici aussi la régression moins rapide du secteur rhexistasique sur la période.

2.5.5.2. L'évolution de la structure de la mosaïque biorhexistatique, entre 1978 et 2001

A. L'évolution des périmètres des unités physionomiques

L'évolution des périmètres reflète bien celle des surfaces (Tableau 45). Les périmètres ont augmenté soit, par multiplication du nombre de taches (îlots arbustifs) soit, par complexification (prairie) ou stagnation de la sinuosité des contours des taches (front forestier et piquetage herbacé), La régression du périmètre de la lande s'explique par une homogénéisation des taches à l'ouest de l'écocomplexe et une simplification des contours, plus sinueux sur la période précédente.

Tableau 45 : Evolution des périmètres des unités physionomiques, entre 1978 et 2001

Type physionomique	Périmètre (m)		Différence (m)
	1978	2001	
Prairie	1017,5	1985	967,5
Ilot arbustif sur formation végétale	352,5	937,5	585
Ilot arbustif sur éboulis	190	410	220
Forêt	2275	2335	60
Piquetage herbacé	2090	2120	30
Secteur rhexistatique	2690	2615	-75
Lande	1272,5	1192,5	-80

La régression du périmètre du secteur rhexistatique est essentiellement due d'une part, à l'extension du piquetage herbacé, de manière latérale, à l'ouest de l'écocomplexe, d'autre part, à la progressive fermeture par la prairie et la forêt des zones médiale (C-F 8-9) et distale à l'est de l'écocomplexe (B 8-9) et enfin, à la progression du front forestier en zone distale du tablier d'éboulis.

L'analyse des valeurs du rapport « périmètre/surface » nous permet de préciser les degrés de complexification et/ou de simplification de la structure de la mosaïque (Tableau 46) :

- périmètre, surface et rapport augmentent : le périmètre croît plus vite que la surface. Il y a complexification des contours des taches. C'est le cas de la prairie dont l'extension longitudinale se fait par expansion sinueuse des bordures par « capillarité ». La structure de la prairie est plus complexe sur la période.

- périmètre et surface augmentent mais le rapport diminue : dans ce cas, théoriquement, le périmètre augmente moins vite que la surface et cela entraîne une simplification des contours graphiques des taches. C'est le cas des îlots arbustifs dont les contours graphiques sont peu sinueux. C'est aussi le cas du piquetage herbacé. Cependant, il présente visuellement des contours graphiques complexes.

Tableau 46 : Evolution du rapport « périmètre/surface » des unités physionomiques, entre 1978 et 2001

Type physionomique	P/S		Différence (m)
	1978	2001	
Prairie	0,23	0,29	+
Secteur rhexistatique	0,29	0,42	+
Forêt	0,10	0,10	=
Piquetage herbacé	0,48	0,42	-
Ilot arbustif sur éboulis	1,18	1,07	-
Ilot arbustif sur formation végétale	0,83	0,78	-
Lande	0,42	0,32	-

- périmètre et surface diminuent mais le rapport augmente : le périmètre diminue ici moins vite que la surface. Cela traduit une fragmentation du type physionomique et/ou une complexification des contours graphiques des taches par régression.

Comme pour la période précédente, c'est le cas du secteur rhexistasique qui est de plus en plus fragmenté sous l'effet de la colonisation herbacée. D'autre part, la sinuosité de ses contours augmente au contact du front forestier et du piquetage herbacé.

- la surface augmente, le périmètre et le rapport diminuent : il s'agit ici d'un cas particulier lié à l'évolution intrinsèque de la lande, par fermeture concentrique progressive du secteur rhexistasique et par lissage de ses bordures au contact du tablier. Ce type de mode de colonisation a un effet très structurant sur la mosaïque biorhexistasique.

- la surface et le périmètre augmentent mais le rapport stagne : l'extension est équilibrée et homogène. C'est le cas de la forêt.

La fragmentation du secteur rhexistasique s'est amplifiée entre 1978 et 2001. Théoriquement, cette évolution devrait se poursuivre encore quelques décennies jusqu'à disparition complète du secteur rhexistasique si le piquetage herbacé parvient à s'étendre dans les portions à gros blocs.

B. Evolution du nombre de taches

L'évolution globale du nombre de taches est moins importante sur la période. Elle a été de 87% entre 1911 et 1978 contre 33% entre 1978 et 2001. Cette évolution traduit un processus d'homogénéisation intrinsèque des types physionomiques. La lande et le piquetage herbacé sont moins fragmentés grâce à la fusion de leurs taches, la colonisation est donc plus homogène et s'étend sur de plus grandes surfaces.

Tableau 47 : Evolution du nombre de taches des unités physionomiques, entre 1978 et 2001

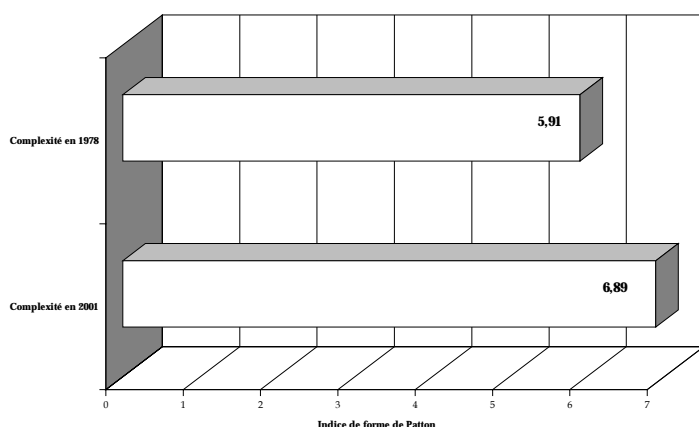
Type physionomique	Nombre de taches		Différence (m)
	1978	2001	
Ilot arbustif sur formation végétale	44	109	65
Ilot arbustif sur éboulis	25	70	45
Secteur rhexistasique	88	99	11
Prairie	9	12	3
Forêt	1	1	0
Lande	30	18	-12
Piquetage herbacé	76	55	-21
	273	364	91

La fragmentation du secteur rhexistasique a été moins rapide que sur la période précédente (76% entre 1911 et 1978 contre 12,5 % entre 1978 et 2001) en raison de la nature granulométrique des matériaux qui empêche l'établissement de formations végétales hétérostasiques ou biostasiques en zone distale.

Les formations arbustives enregistrent la plus forte évolution. Le nombre d'îlots arbustifs sur formation végétale herbacée et sous-arbustive a presque triplé, soit une évolution de 177 % sur la période contre 76 % entre 1911 et 1978. Sur éboulis, l'extension a été plus rapide qu'en périphérie. Le nombre d'îlots a aussi presque triplé alors que les formations arbustives étaient presque inexistantes jusqu'en 1978. La progression est de 180 % pour la période 1978-2001 contre 92% entre 1911 et 1978. Soit 0,17 taches par an entre 1911 et 1978 et 2 taches par an entre 1978 et 2001.

La complexification de la mosaïque biorhexistasique est confirmée par l'analyse de l'évolution des indices paysagers.

C. L'évolution de la complexité de la mosaïque biorhexistatique, entre 1978 et 2001



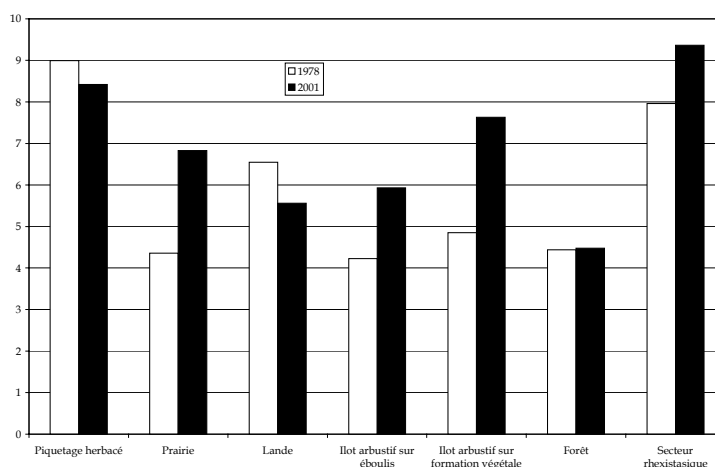
Graphique 45 : Evolution de la complexité globale de la mosaïque biorhexistatique de La Plagne, entre 1978 et 2001.

La complexité globale de la mosaïque de La Plagne a augmenté de 16,5% entre 1978 et 2001 (contre 12% entre 1911 et 1978) et de 30,5% sur le siècle.

Cette augmentation est liée à l'évolution individuelle de la complexité (Graphique 46) :

- de la prairie : par complexification des contours des taches. Les bordures sont plus sinueuses ;
- des formations arbustives : la multiplication des îlots arbustifs a eu un effet très structurant sur la période. Elle contribue à la fragmentation des formations réceptives (lande, prairie, piquetage herbacé et secteur rhexistasique) ;
- du secteur rhexistasique par fragmentation de sa surface ;
- la forêt : la sinuosité des contours du front forestier a augmenté au contact de la zone distale du tablier d'éboulis.

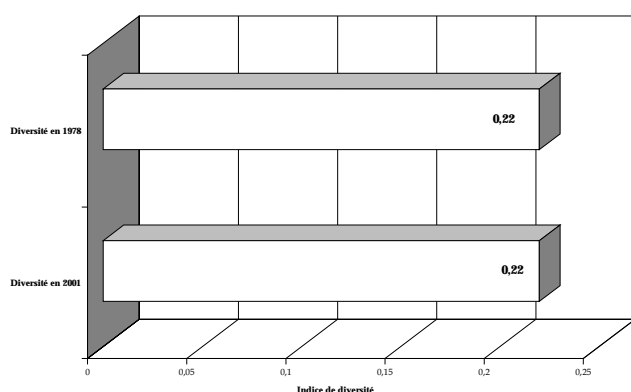
Graphique 46 : Evolution de la complexité des types physiologiques, entre 1978 et 2001



La diminution de la complexité du piquetage herbacé s'explique par une fusion des taches et un lissage des bordures au contact du secteur rhexistasique. La lande est beaucoup moins fragmentée et son extension homogène concentrique explique la diminution de la valeur de l'indice sur la période.

L'indice de complexité synthétise bien l'évolution de la structure de la mosaïque sur la période et ses valeurs confirment les tendances observées dans les paragraphes précédents.

D. Evolution de la diversité spatiale de la mosaïque biorhexistasique, entre 1978 et 2001



Graphique 47: Evolution de la diversité spatiale globale, entre 1978 et 2001.

La mosaïque biorhexistasique n'est pas plus diversifiée en 2001 qu'en 1978, la valeur de l'indice est identique. Les changements structurels des surfaces des types physiologiques ne sont pas assez significatifs en terme de diversité pour faire varier la valeur de l'indice.

L'étude diachronique de l'évolution végétale du tablier de La Plagne révèle un processus de colonisation végétale généralisé sur l'ensemble du siècle dernier. La tendance est à la fermeture paysagère de la mosaïque. La nature de l'évolution de la physiologie végétale est identique sur les deux périodes et conforme à celle du Grand Som. L'évolution de la mosaïque biorhexistasique est marquée par une progression ligneuse et herbacée qui s'est conjointement opérée au sein du tablier d'éboulis et en périphérie. Cependant, les modalités d'évolution diffèrent en termes de types et de vitesses de colonisation.

Sur la période 1911-1978, l'extension des formations herbacées, et notamment celle du piquetage herbacé, a été très rapide sur tablier d'éboulis. La périphérie est marquée par une légère progression des îlots arbustifs et une avancée du front forestier mais les changements sont sans commune mesure avec ceux qui se sont opérés sur secteur rhexistasique. La colonisation végétale herbacée entraîne la fermeture progressive du secteur rhexistasique et une stabilisation du dépôt. Processus de fermeture confirmé sur la période suivante. Comme pour les autres écosystèmes et notamment celui du Grand Som, cette colonisation végétale est une conséquence directe de l'arrêt de l'exploitation pastorale de l'écosystème à partir de 1914. L'extension s'est poursuivie jusqu'en 1956 et s'est amplifiée après. Mais le doute subsiste pour la période 1956-1978. L'amorce de colonisation végétale sur talus d'éboulis s'est-elle opérée en 1956 ? Ou à l'approche des années 80 ? Nous reviendrons sur cet aspect dans la conclusion.

Sur la période 1978-2001, la tendance générale se confirme et la fermeture du secteur rhexistasique s'accélère. La période est caractérisée par une importante lignification du secteur rhexistasique et de la périphérie. La progression du piquetage herbacé est fortement ralentie en raison de la nature granulométrique grossière des matériaux dans les zones médiale et distale. La strate arbustive prend le relais et confirme son caractère pionnier dans la colonisation des secteurs à gros blocs. L'explosion « démographique » des îlots arbustifs sur éboulis a lieu entre 1978 et 2001 comme pour les écosystèmes des Pelloux et de l'Aulp du Seuil. Coïncidence ? En périphérie du talus d'éboulis, la lignification se poursuit. La progression est considérable pour les strates arbustive (îlots arbustifs) et sous arbustive (lande). Ce processus provoque l'avancée du front forestier et de la lande et une fermeture presque totale des portions rhexistasiques isolées. Aux effets de la déprise pastorale, s'ajoutent pour la période ceux du réchauffement climatique à partir des années 80. En périphérie du tablier d'éboulis, il amplifie le processus de lignification. Au sein du secteur

rhexistasique, il constitue à partir des années 80 le principal facteur explicatif car seule une réduction de la fréquence et de l'intensité des processus d'érosion nivéo-périglaciaires peut expliquer l'ampleur de la colonisation végétale herbacée et la lignification du dépôt, observées à partir de 1978 et sur la période 1978-2001. De plus, les modalités d'évolution sont quasiment identiques sur la fin de siècle pour tous les écosystèmes.

2.6. Conclusion : une réponse différente de la végétation à la déprise pastorale et au réchauffement climatique

Cette étude diachronique nous a permis de cerner les trajectoires et les modalités de l'évolution végétale différentielle des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis de Chartreuse et de préciser les rôles respectifs de l'homme et du climat dans le processus de colonisation végétale observé, depuis le début du siècle dernier.

La nature de la colonisation végétale est identique pour les cinq écosystèmes. Il s'agit conjointement d'une colonisation ligneuse et herbacée qui s'est opérée en périphérie et sur talus d'éboulis.

Les vitesses de colonisation végétale diffèrent, en fonction des écosystèmes et de l'anthropisation. Nous opposons ici, les écosystèmes qui ont été fortement anthropisés comme le Grand Som et la Grande Sure à ceux qui ont connu une pression pastorale moindre, voire inexistante : les Pelloux, La Plagne et l'Aulp du Seuil.

Pour le Grand Som et la Grande Sure, la réponse des formations ligneuses périphériques a été très rapide suite à l'abandon des pâturages. Nous pouvons extrapoler à la Grande Sure, l'évolution des formations périphériques ligneuses mise en évidence pour le Grand Som entre 1920 et 1956. L'état de la strate arbustive en périphérie des talus d'éboulis est identique pour les deux écosystèmes en 1956. Son extension s'est opérée par « nucléation » au sein des formations herbacées biostatiques de type pelouse et prairie. Les îlots ont ensuite fusionné au profit du couvert forestier entre 1956 et 2001. L'extension herbacée et arbustive sur secteur rhexistasique a été beaucoup moins rapide, la réponse a donc été plus tardive et la colonisation s'est surtout amplifiée entre 1956 et 2001. Il existe toutefois une différence entre les deux écosystèmes. La colonisation herbacée a été plus étendue sur le talus d'éboulis du Grand Som. Les observations de terrain et la réalisation des relevés phytocologiques indiquent que la granulométrie du talus d'éboulis de la Grande Sure est assez grossière sur l'ensemble du dépôt, ce qui a certainement ralenti la progression du piquetage herbacé. Au Grand Som, il a progressé au sein d'un ancien cône d'éboulis actif où la granulométrie est plus fine dans l'ensemble.

Pour les écosystèmes des Pelloux, de La Plagne et de l'Aulp du Seuil, la tendance est inversée. L'extension herbacée et la lignification ont été plus rapides sur secteur rhexistasique. Nous ne disposons pas de données cartographiques antérieures pour les « Pelloux », mais les informations apportées par l'étude diachronique de La Plagne nous permettent d'avancer quelques explications. Sur l'ensemble du siècle, l'évolution des écosystèmes a été sensiblement similaire en périphérie. La pression pastorale a été moins importante et peut être plus ponctuelle. Un élément nous permet de confirmer cet aspect, il s'agit de la présence de la lande en 1956 qui limite la progression des formations arbustives en périphérie des talus d'éboulis, ce qui n'était pas le cas pour le Grand Som et la Grande Sure. Elle traduit une anthropisation moins active mais aussi de part son développement important avant 1956, une réponse rapide à la déprise pastorale.

Après 1956, mais surtout à partir du début des années 80, la colonisation ligneuse et herbacée s'est accélérée sur talus d'éboulis. Même si le tablier de La Plagne enregistre une très forte colonisation herbacée entre 1911 et 1978, nous pensons qu'elle s'est plutôt opérée à l'approche de l'année 78 et

que certaines conditions mésologiques expliquent qu'elle ait connue une extension aussi importante. Les facteurs mésologiques expliquent les disparités entre les écocomplexes et notamment la géodynamique de surface et la nature granulométrique des portions rhexistasiques non colonisées.

L'année 1978 constitue une année charnière et l'écocomplexe de La Plagne est un peu un « condensé » des évolutions observées. La fermeture de la mosaïque s'est accélérée, notamment au sein du tablier d'éboulis. L'extension herbacée et ligneuse a été très rapide pour les autres écocomplexes et s'est principalement opérée sur talus d'éboulis. Nous pensons que c'est à partir de 1978 (fin des années 70) et surtout au début des années 80 que ces modifications ont eu lieu. L'évolution de l'écocomplexe de La Plagne entre 1978 et 2001 est assez révélatrice. Ces modifications traduisent, sans aucun doute, une réduction de la fréquence et de l'intensité des processus d'érosion nivéo-pérglaciaires qui entretiennent la rhexistasie sur talus d'éboulis. Par conséquent, il s'agit d'une réponse directe de la végétation au réchauffement climatique qui s'est amorcé au début des années 80.

Le processus s'est déroulé en deux temps : 1914-1978 et 1978-2001. La végétation a répondu très rapidement à la déprise pastorale, notamment au sein des formations périphériques autrefois très pâturées. L'extension végétale a progressé, de façon plus ou moins rapide et régulière jusqu'au début des années 80, où des changements radicaux en termes de trajectoire et de vitesse de colonisation végétale se sont opérés sur talus d'éboulis, entraînant de profondes modifications dans la structure des mosaïques et une fermeture paysagère progressive.

Cinq écocomplexes, cinq évolutions similaires. Coïncidence ? Non, les mosaïques biorhexistasiques d'éboulis de l'étage infra-pérglaciaire ont répondu aux changements environnementaux. L'étude diachronique met en évidence un processus de colonisation végétale généralisé qui s'est opéré sur l'ensemble du siècle dernier et qui s'est amplifié sur talus d'éboulis, dans la deuxième moitié du siècle dernier. Ce processus révèle une stabilisation des talus d'éboulis et une progressive fermeture paysagère des mosaïques, déjà bien amorcée pour les écocomplexes de La Plagne, de l'Aulp du Seuil et des Pelloux.

Les mosaïques biorhexistasiques d'éboulis actuelles, de part la mixité des formations végétales présentes et la diversité phyto-morphologique, sont celles qui abritent le maximum de phytodiversité. Si l'évolution se poursuit elle pourrait avoir des conséquences considérables sur cette phytodiversité spécifique et écosystémique et entraîner la fermeture paysagère complète des mosaïques.

Le chapitre 7 va nous permettre de préciser les caractéristiques phyto-écologiques des écocomplexes et d'évaluer la phytodiversité actuelle. Le chapitre 8, nous permettra de préciser définitivement le rôle du réchauffement climatique et les conséquences à long terme. Les données utilisées sont issues de l'approche stationnelle.

CHAPITRE 7

Analyse phyto-écologique : vers une typologie fonctionnelle des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis

I. Caractérisation mésologique des mosaïques biorhexistasiques

La matrice des 411 relevés phyto-écologiques (73 transects) et des 141 variables, utilisées par grands groupes, a été exploitée selon trois principales analyses de données :

- l'analyse univariée, qui permet d'étudier les variables une à une ;
- l'analyse bivariée qui étudie les relations entre deux variables ;
- l'analyse multivariée qui permet de déterminer les facteurs synthétiques structurant le nuage de points constitué par l'ensemble des relevés et de déboucher sur une typologie.

Les données phyto-écologiques ont été mesurées à l'échelle stationnelle mais l'agglomération des résultats permet de remonter à celle des écosystèmes.

1.1. Les caractéristiques abiotiques

L'étude des caractéristiques abiotiques s'appuie sur 10 variables (Figure 36). Le détail des distributions de fréquences pour chaque écosystème est présenté dans l'annexe K. Pour rappel, l'annexe H permet de localiser les différents transects pour chaque écosystème.

1.1.1. Premiers enseignements : l'analyse des distributions simples

Nous ne développerons pas ici les variables altitude, exposition et topographie, largement abordées dans les chapitres précédents.

Les transects ont été réalisés au contact de quatre principaux types physiologiques périphériques des talus d'éboulis: la pelouse, la prairie, la lande et la forêt (Chapitre 6). Nous avons ajouté un cinquième type, constitué par les îlots arbustifs et/ou herbacés présents au sein des talus d'éboulis. 34,2% des transects ont été réalisés au contact de la lande. Il s'agit essentiellement de ceux effectués à La Plagne, l'Aulp du Seuil et aux Pelloux (Annexe K). Comme nous l'avons souligné dans le chapitre précédent, les formations périphériques des talus d'éboulis de la Grande Sure et du Grand Som sont essentiellement herbacées (Annexe K). 24,7% des transects ont été réalisés au contact d'un îlot arbustif ou herbacé. Ceci, afin de prendre en compte la colonisation par « nucléation » des talus d'éboulis et la mise en place progressive de formations correspondant à des stades biostatiques sur secteur rhexistasique. Les contacts éboulis/forêt concernent 20,5 % des transects, principalement réalisés en zone distale des dépôts, au contact du front forestier. Les formations herbacées totalisent 20,6 % des transects soit 15, 1% pour la pelouse et 5,5 pour la prairie. Elles restent minoritaires.

La longueur des transects diffère en fonction de la largeur des écotones. Cette dernière est en général importante au contact des formations herbacées où les transitions sont plus graduelles.

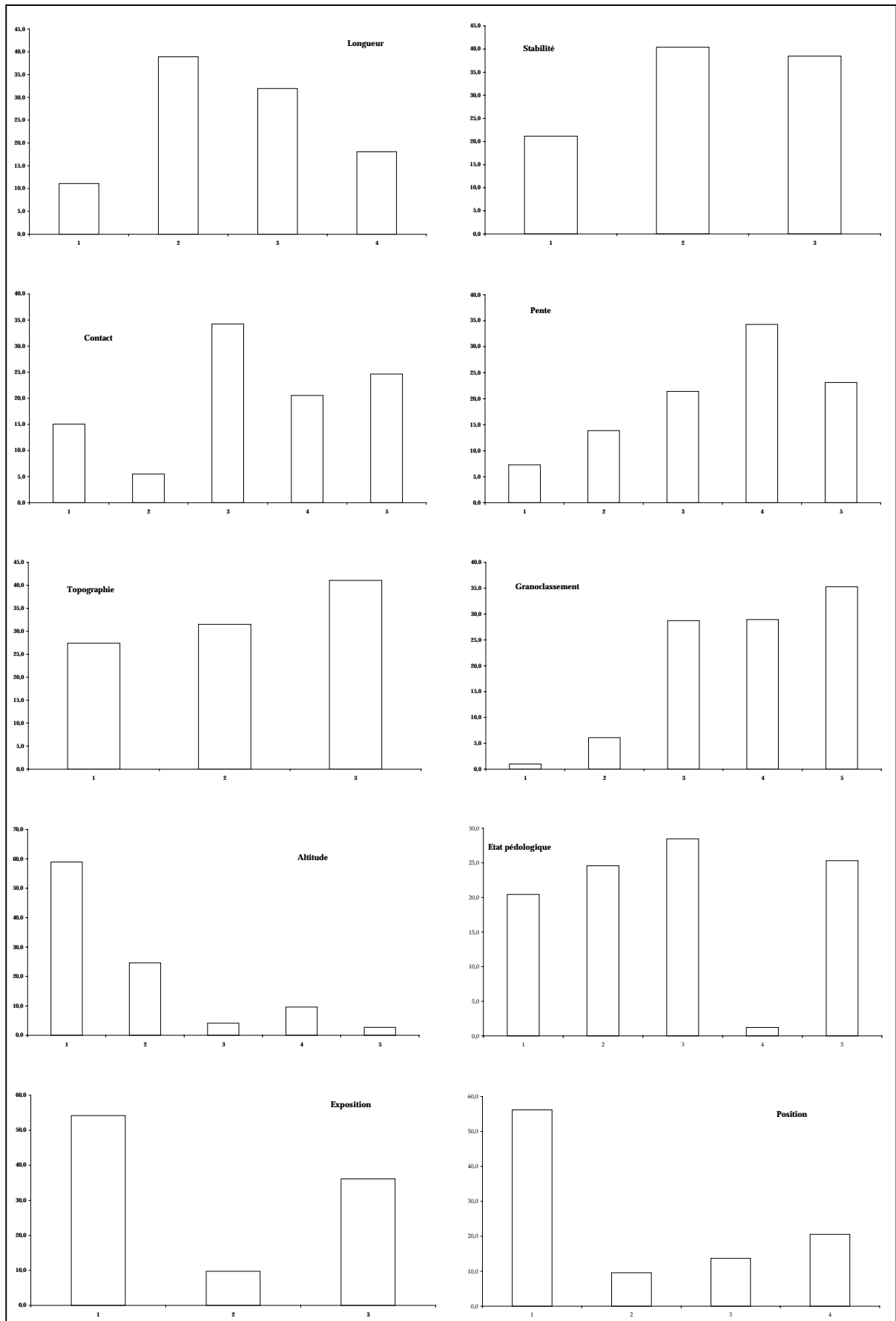


Figure 36 : Distributions de fréquence des modalités des 10 variables abiotiques descriptives des mosaïques biorhexistatiques. Rappel de la signification des modalités (ci-contre)

Variable	Modalités	
Longueur (ramenée en classes à partir de la fiche de terrain)	1	< 3 mètres
	2	[3 ; 5[
	3	[5 ; 7]
	4	> 7 mètres
Type de contact	1	Eboulis/pelouse
	2	Eboulis/prairie
	3	Eboulis/lande
	4	Eboulis/forêt
	5	Eboulis/îlot
Topographie	1	Zone apico-proximale
	2	Zone médiale
	3	Zone distale
Position	1	Latérale
	2	Longitudinale
	3	Front aval
	4	Ilot
Altitude	1	< 1600 m
	2	1600 à 1650 m
	3	1650 à 1700 m
	4	1700 à 1750
	5	> 1750 m
Exposition	1	Exposition à composantes est
	2	Exposition à composantes ouest
	3	Exposition à composantes sud
Stabilité	1	Instable
	2	Pénéstable
	3	Stable
Pente	1	< 20°
	2	[20° ; 25°[
	3	[25° ; 30°[
	4	[30° ; 35°[
	5	> 35°
Granoclassement	1	Gros blocs > 50 cm
	2	Blocs moyens] 25 à 50 cm]
	3	Petits blocs] 10 à 25 cm]
	4	Gros cailloux] 5 à 10 cm]
	5	Terre fine et cailloux < 2 mm à 5 cm
Pédologie	1	Lithosol
	2	Litière seule discontinue
	3	Litière+humus discontinus
	4	Litière seule continue
	5	Litière+humus continus

Au contraire, les contacts avec la forêt sont souvent francs en raison de la granulométrie grossière des matériaux. La longueur des transects oscille entre 3 et 7 mètres (85%).

Dans le cas des transects inférieurs à 3 mètres, les contacts sont en général francs et les écotones très réduits ou inexistantes quelque soit la formation périphérique concernée (certains transects de la Grande Sure, des Pelloux et de l'Aulp du Seuil). Seuls certains transects réalisés au Grand Som et à La Plagne présentent des longueurs supérieures à 7 mètres. Ce sont les seuls écotones où les zones de transitions entre l'éboulis et les formations périphériques sont visibles à la cartographie au 1/2500^{ème}. Il s'agit essentiellement des écotones à piquetage herbacé situés au contact de l'éboulis et de la pelouse ou de la prairie (Annexe H). D'une manière générale, les

contacts graduels soulignent l'existence d'un gradient biorhexistasique complet où l'écotone caractérise la portion hétérostasique. Dans le cas d'un contact franc, le transect passe directement de la rhexistasie à la biostasie.

La variable stabilité permet de souligner l'existence du gradient biorhexistasique à l'échelle des transects et des relevés. Pour rappel, la stabilité est associée à la biostasie, la pénestabilité à l'hétérostasie et l'instabilité à la rhexistasie. Cette variable est assez « subjective⁶² », elle prend tout son sens lorsqu'elle est couplée à d'autres facteurs (1.1.2. et 1.3.). Les relevés définis comme stables (stabilité du substrat à la pression) ne sont pas tous forcément biostasiés, notamment au contact du front forestier. Et inversement.

L'allure de la distribution de la variable « stabilité » est assez proche de celle de la variable « Etat pédologique », dont les modalités s'organisent aussi en fonction du gradient biorhexistasique. Les modalités « lithosol » et « litière seule discontinue » concernent les relevés plutôt rhexistasiques (45%), les modalités « litière + humus continu et litière seule continue » caractérisent un état hétérostasique (29,7) et la modalité « litière + humus continu » des relevés réalisés en biostasie (25,3). Ce gradient nous permet de mettre en évidence les spécificités des successions de l'évolution pédologique sur éboulis. Comme nous l'avons souligné dans la deuxième partie, le transect se termine en biostasie au sein d'une formation périphérique dense. En général, seulement deux à trois relevés phyto-écologiques ont été réalisés en biostasie. Notre objectif n'étant pas de réaliser une étude des formations périphériques, la fréquence des relevés est donc moins importante.

Dans 56,2% des cas les transects ont été réalisés de manière latérale, au contact des formations périphériques biostasiées. Rappelons que dans l'étage infra-péglaciaire cartusien, les talus d'éboulis sont des milieux bordés de toutes parts par des formations végétales denses (Chapitre 6), ce qui confirme le caractère « d'isolement » de ces habitats particuliers.

La pente et le granoclassement présentent des distributions asymétriques à droite. A l'exception de la dernière modalité, plus la pente est élevée, plus la fréquence augmente. 7,3% des relevés présentent des pentes < à 20°, 35,3% une pente comprise entre 20° et 30°, 34,3% entre 30° et 35° et 23,1% une pente > à 35°. La majorité des relevés a donc été réalisée sur des pentes oscillant entre 20° et 35°, à l'échelle métrique. La diversité de situations est plus importante que celle observée lors de l'analyse des profils longitudinaux et transversaux de La Plagne et de l'Aulp du Seuil, réalisés selon un pas de 10 m. La diversité de positions des relevés doit être prise en compte. Ces valeurs de pente concernent aussi bien des transects réalisés de manière latérale, longitudinale, frontale et/ou au sein d'îlot. Ce qui accentue la diversité de situations. L'analyse du granoclassement permet de traduire le gradient biorhexistasique. La majorité des relevés se situe, dans des zones où la granulométrie est moyenne (terre fine à 25 cm). Les zones à granulométrie fine (terre fine < 2 cm et petits cailloux 2 à 5 cm) correspondent surtout à des relevés situés en biostasie au sein des formations périphériques (35,3%). A l'exception des gros blocs qui pointent de manière ponctuelle, sans zonation distincte, sur les différents talus d'éboulis, les matériaux très grossiers (blocs moyens et gros blocs > à 50 cm) caractérisent surtout les zones distales des dépôts. En rhexistasie, à l'exception des zones distales, les matériaux présentent plutôt un granoclassement situé entre les modalités] 5 ; 10] et] 10 ; 25 cm].

L'analyse bivariée va nous permettre de préciser les caractéristiques du gradient biorhexistasique et les facteurs du milieu qui contribuent le plus à sa mise en valeur.

⁶² Evaluée à la pression du pied.

1.1.2. L'analyse bivariée. La stabilité du substrat : un facteur déterminant pour l'évolution de la couverture pédologique sur talus d'éboulis

Nos analyses bivariées reposent sur le calcul du coefficient de corrélation de rang de Spearman (ρ) (II, chapitre 5).

Tableau 48 : Coefficients de corrélation de Spearman (variables abiotiques)

Coefficient de Spearman	longueur	Topographie	Stabilité	Pente	Granoclassement	Etat pédologique
Longueur	1,000	-0,217	-0,066	0,188	0,013	-0,028
Topographie	-0,217	1,000	0,107	-0,222	-0,310	-0,022
Stabilité	-0,066	0,107	1,000	-0,235	0,070	0,778
Pente	0,188	-0,222	-0,235	1,000	0,008	-0,187
Granoclassement	0,013	-0,310	0,070	0,008	1,000	0,176
Etat pédologique	-0,028	-0,022	0,778	-0,187	0,176	1,000

Significativité au seuil de 1% ($\alpha = 0,01$). N = 411.

Comme supposée plus haut, la corrélation entre l'état pédologique du sol et la stabilité est très significative (0,778). L'évolution pédologique des sols est fortement dépendante de la stabilité du substrat sur talus d'éboulis. Sans toutefois généraliser, ce résultat traduit l'existence d'un gradient biorhexistasique dynamique. Dans une moindre mesure, la stabilité montre aussi une légère corrélation avec la pente (-0,235) et la zonation topographique (0,107). D'autre part, la pente et le granoclassement sont aussi corrélés à la zonation topographique (-0,222 et -0,310). L'interprétation générale peut être la suivante :

- la zone apico-proximale, formée de matériaux fins est pentue et instable, sauf lorsqu'elle est colonisée par des formations biostasiques denses (La Plagne, les « Pelloux », le Grand Som) ;
- la zone médiale est plus complexe (Chapitre 6). Elle présente des pentes variées mais globalement plus faibles et le granoclassement est plutôt hétérométrique. Les relevés réalisés en zone médiale perturbent le modèle classique de fonctionnement des éboulis. C'est pour cette raison qu'il n'y a pas de corrélation entre la pente et le granoclassement. Cependant, elle est globalement plus stable sur les différents écosystèmes ;
- la zone distale est peu pentue et généralement très stable, en raison de la nature granulométrique grossière du substrat.

Ce petit modèle se rapproche un peu de ceux développés dans le Chapitre 6. Finalement, cette analyse bivariée confirme la corrélation positive ou négative entre certains descripteurs abiotiques, corrélation que l'analyse univariée avait déjà permis d'esquisser. Cependant, elle n'apporte pas d'information majeure et nouvelle. Elle a simplement le mérite de mesurer quantitativement des relations souvent supposées.

L'analyse des caractéristiques biotiques va nous permettre de dégager les préférences écologiques des espèces.

1.2. Les descripteurs de la végétation

1.2.1. Les apports de l'analyse des distributions simples

1.2.1.1. Quelques considérations générales

Dans 65,8% des cas, les transects présentent un taux de recouvrement de la végétation (global) situé entre 50 et 75% (Figure 37 et annexe K). En réalité, les taux sont plutôt proches de 50% et varient fortement en fonction de la largeur des écotones et du nombre de relevés réalisés dans les formations biostasiques.

La répartition des espèces est une variable sensible au gradient biorhexistasique. Pour rappel, la densité végétale et la répartition des individus s'organisent le long des transects de manière croissante, de l'éboulis (rhexistasie) à la formation biostasiq ue périphérique. 33,8% des relevés présentent une répartition de la végétation continue et rares sont ceux qui n'accueillent aucune espèce (3%). Globalement, cette distribution peut être expliquée de la manière suivante : les relevés réalisés en zone rhexistasique sont caractérisés par la présence d'un piquetage herbacé où les espèces se développent sous forme de touffes isolées (24,6%), ceux effectués en hétérostasie comportent des plantes regroupées en taches (39,4%) et en biostasie, la végétation est continue.

La stratification est une autre manière d'appréhender le gradient biorhexistasique. La présence de plusieurs strates révèle des conditions écologiques stationnelles favorables aux espèces herbacées et ligneuses, elle traduit une évolution progressive vers la biostasie. D'autre part, elle nous informe sur le degré de lignification des talus d'éboulis et par extension sur la stabilité du substrat. Dans l'optique d'éviter un parasitage dû à la présence d'arbres en périphérie des talus d'éboulis, seuls les ligneux présents sur les dépôts ou au contact direct ont été retenus. Dans la moitié des relevés (52,8%), la présence herbacée est très importante notamment pour les écocomplexes de la Grande Sure et du Grand Som (Annexe K). Nous les opposons par ailleurs aux écocomplexes de l'Aulp du Seuil, des Pelloux et de La Plagne où les distributions sont sensiblement différentes en raison de l'importante lignification des dépôts et de la présence du front forestier au contact direct des zones distales. L'installation des ligneux traduit un changement général dans les conditions mésologiques des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis (Chapitre 6) et provoque, dans un deuxième temps, des modifications dans les conditions écologiques stationnelles et la géodynamique de surface.

1.2.1.2. L'analyse de la fréquence des espèces : le diagramme rangs-fréquences (DRF)

Selon GOSSELIN et LAROUSSINIE (2004), pour quantifier la biodiversité d'un relevé, il n'est pas toujours nécessaire de calculer sa richesse spécifique. D'autres outils tiennent compte de la répartition de l'abondance relative (ou absolue) entre les espèces et permettent de cerner la diversité avec l'idée sous-jacente que « *Si, parmi les S espèces dénombrées, l'une d'entre elles (ou un très petit nombre) représente la plus grande partie des individus recensés, les autres étant beaucoup plus rares, on tend à dire que la communauté est « peu diversifiée ».* Si au contraire on rencontre un grand nombre d'espèces moyennement abondantes, on tend à qualifier la communauté de « très diversifiée » » (FRONTIER et PICHOD-VIALE, 1998).

FRONTIER et PICHOD-VIALE (1998), FAURIE *et al.* (2003) soulignent que le calcul d'un indice de diversité spécifique s'avère être une approche trop synthétique, voire réductionniste, de l'estimation de la structure d'un peuplement. D'après ces auteurs, une description plus détaillée est donnée par la forme de la distribution des individus en espèces. C'est pourquoi, divers auteurs ont proposé des représentations graphiques de la diversité d'une communauté appelées diagrammes rangs-fréquences.

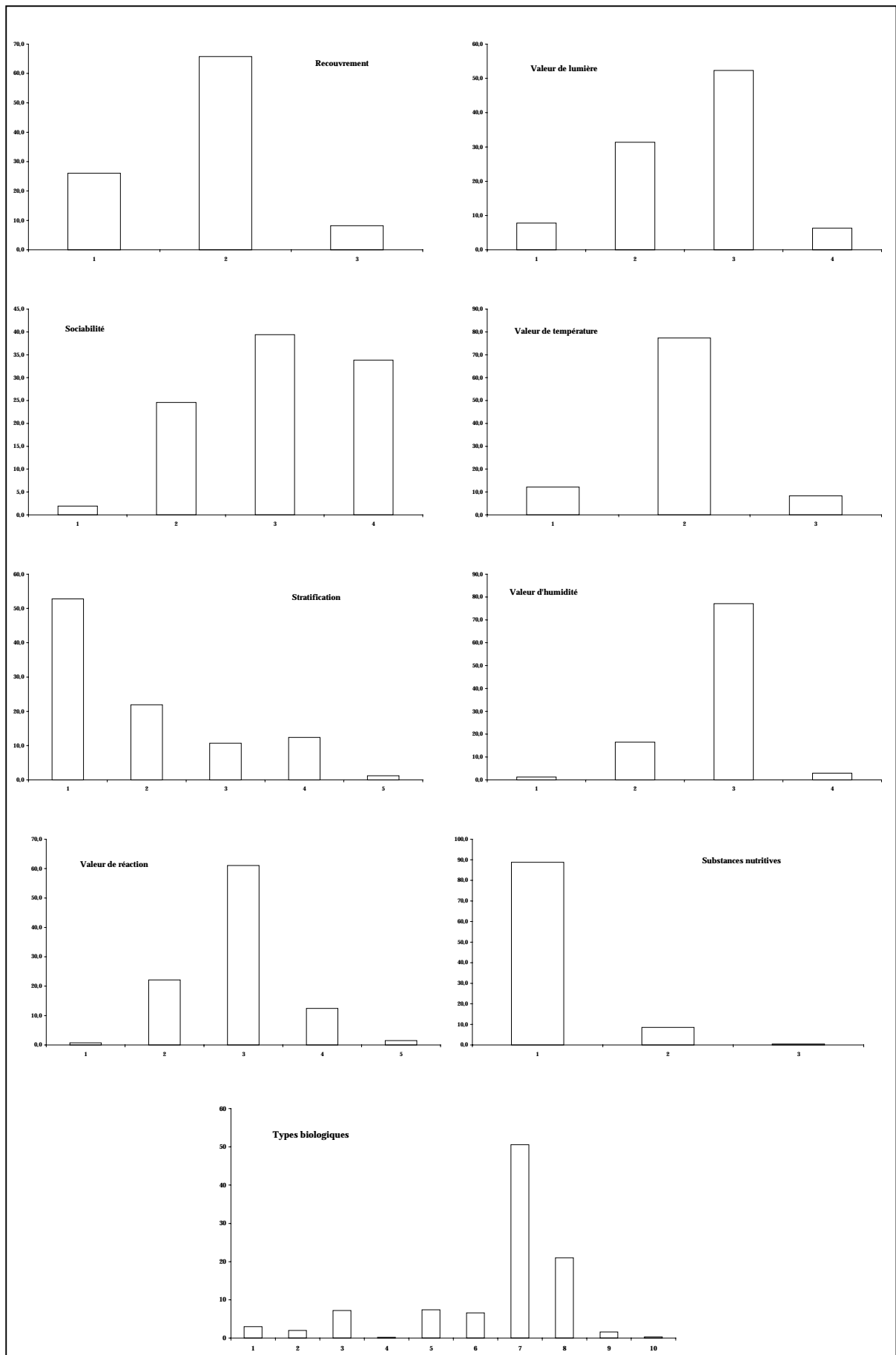


Figure 37 : Distributions de fréquences des modalités des 9 variables biotiques descriptives des mosaïques biorhexistasiques. Rappel de la signification des modalités ci-contre.

Variable	Modalités	
Recouvrement total	1	< 50%
	2	[50 ; 75[
	3	> 75%
Sociabilité-répartition	1	Pas de plante
	2	Plantes dispersées
	3	Plantes en taches
	4	Végétation continue
Stratification	1	Strate herbacée
	2	Strate sous-arbustive
	3	Strate arbustive
	4	Strate arborescente
Valeur d'humidité	1	≤ 1
	2] 1 ; 2]
	3] 2 ; 3]
	4	> 3
Valeur de réaction	1	≤ 2.5
	2] 2.5 ; 3.5]
	3] 3.5 ; 4]
	4] 4 ; 4.5]
	5	> 4.5
Valeur de substances nutritives	1	[2 ; 2.5[
	2] 2.5 ; 3]
	3	> 3
Valeur de lumière	1	≤ 3
	2] 3 ; 3.5]
	3] 3.5 ; 4]
	4	> 4
Valeur de température	1	≤ 2
	2] 2 ; 3]
	3	> 3
Types biologiques	1	Phanérophyte vert estival
	2	Phanérophyte sempervirens
	3	Nanophanérophyte vert estival
	4	Nanophanérophyte sempervirens
	5	Chaméphyte ligneux
	6	Chaméphyte herbacé
	7	Hémicryptophyte
	8	Géophyte
	9	Thérophyte
	10	Thérophyte-hémicryptophyte

D'après GOSSELIN et LAROUSSINIE (2004), ce type de diagramme permet de représenter la répartition des abondances (relatives ou absolues) des espèces en gardant l'information détaillée pour chaque espèce.

S'il est aujourd'hui admis que c'est le système logarithmique proposé par FRONTIER (1974 *in* DAGET, 1976 et FAURIE *et al.*, 2003) qui fournit les courbes les plus aisément interprétables, la construction de ces diagrammes relève tous du même principe. Les taxons recensés dans un échantillon sont classés à partir de leurs effectifs ou de leurs biomasses spécifiques dans un ordre décroissant de leur fréquences. Ces fréquences (abondances relatives ou absolues), exprimées en %, sont ensuite portées en ordonnées sur un graphique bidimensionnel, et le rang de ces espèces depuis les plus nombreuses jusqu'aux plus rares en abscisses.

D'après FRONTIER et PICHOD-VIALE (1998), si l'on porte les rangs et les abondances ou fréquences en échelle ordinaire, les diagrammes sont généralement difficiles à lire et à comparer entre eux : ils montrent tous une allure hyperbolique, très concave en raison de la très grande disparité d'abondances entre les espèces les plus fréquentes et les espèces les plus rares. On porte donc les abondances en logarithmes⁶³, et parfois les rangs également. La discrimination des graphiques devient meilleure (Figure 38). L'allure du diagramme varie essentiellement en fonction de la diversité spécifique. En général, plus le diagramme est plat et plus la communauté est équitable (régulière). La distribution des espèces ainsi mise en évidence correspond à une structure quantitative de la communauté. Ce type de diagramme permet de visualiser directement la répartition des espèces d'un échantillon selon leur abondance ou leur rareté.

« *Les deux composantes fondamentales de la diversité (qui sont, rappelons-le, le nombre d'espèces et la régularité du partage des individus entre ces espèces), sont directement lisibles sur le graphique : le nombre d'espèces se voit à l'extension de la courbe vers la droite; la régularité, à son allure plus ou moins convexe ou concave* » (FRONTIER et PICHOD-VIALE, 1998).

Ainsi, selon FRONTIER et PICHOD-VIALE (1998) et FAURIE *et al.* (2003), les courbes obtenues peuvent être rattachées à trois grands types (Figure 38):

- **diversité et régularité faibles**: le diagramme montre, dans sa partie gauche, une concavité dirigée vers le haut (courbe A). Cela traduit la dominance d'une ou de quelques espèces qui sont abondantes, accompagnées de quelques espèces rares. La diversité et la régularité sont faibles, situation caractéristique d'une *phase de colonisation* ou de perturbation de l'écosystème.

- **diversité et régularité élevées**: la courbe est convexe. Cela traduit l'existence de fréquences très voisines pour les espèces de premiers rangs c'est-à-dire les plus nombreuses. Cette situation (courbe B), qui correspond à une valeur très élevée de la diversité et de la régularité, traduit l'existence d'une *communauté mature*.

- **situation intermédiaire**: le diagramme est parfois rectiligne, avec le plus souvent une légère convexité vers le haut (courbe C). Ce cas de figure s'observe lors de la phase de maturation de la communauté, c'est alors un *stade de transition* entre les deux phases précédentes (stade de colonisation et stade mature). On l'observe également en fin d'évolution de la biocénose. Le maintien d'une diversité spécifique élevée (courbe B) est en effet beaucoup plus coûteux en énergie pour le seul maintien d'une structure complexe.

Certains diagrammes présentent des paliers (courbe D). D'après FRONTIER et PICHOD-VIALE (1998), ils sont dus à la superposition de plusieurs communautés ou sous-communautés lors de l'échantillonnage (biais). En effet, d'une sous-communauté à l'autre des espèces d'un même ordre de grandeur d'abondance peuvent permuter, en particulier au niveau des premiers rangs. Lorsqu'on cumule les inventaires, les espèces de mêmes rangs ou de rangs voisins des diverses sous-communautés peuvent se retrouver presque également représentées dans la collection totale, ce qui explique les paliers.

Dans tous les cas, les courbes montrent une rupture dans les parties droites, matérialisées par une petite flèche. Cette rupture de pente permet de séparer les espèces dont la fréquence est suffisante pour que leur échantillonnage puisse être supposé satisfaisant, de ce qui est dénommé la « queue » des espèces rares (toujours plus verticale que la partie de courbe qui la précède). Contrairement à ce qui peut se produire lors du calcul de l'indice de Shannon-Weaver (Chapitre 5, II, 2.1.3), ces espèces, trop rares pour être correctement échantillonnées, n'ont donc aucune influence sur l'allure générale du diagramme, donc sur son interprétation écologique.

⁶³ Ou les fréquences (fi) ou encore les effectifs (ni) (FRONTIER et PICHOD-VIALE, 1998).

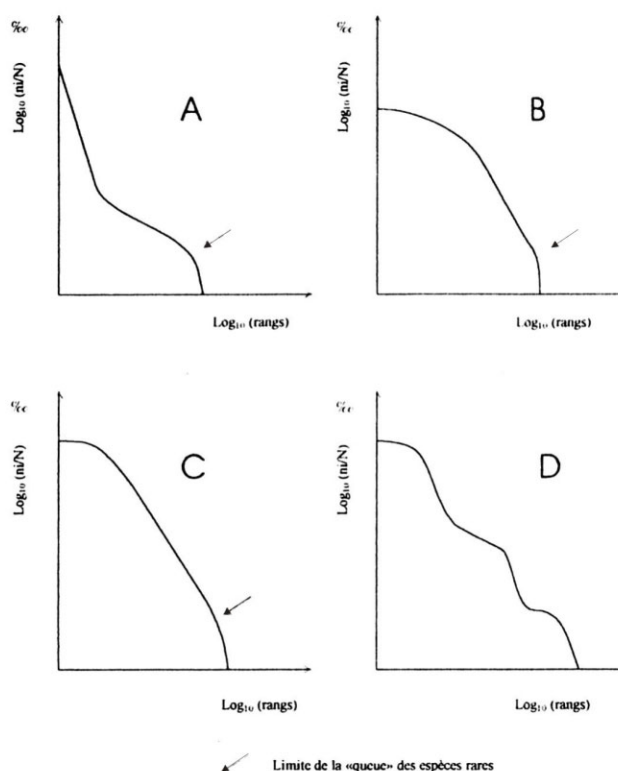


Figure 38 : Quatre allures typiques de diagrammes rangs-fréquences (FRONTIER et PICHOD-VIALE, 1998; FAURIE *et al.*, 2003)

Nos diagrammes rangs-fréquences (Figures 39, 40, 41, 42, 43 et 44) correspondent plutôt au type B, caractérisé par la présence d'un nombre important d'espèces de moyenne abondance accompagnées d'un petit contingent d'espèces rares. Les diversités et les régularités sont élevées. Cet aspect est confirmé par les valeurs des indices de Shannon-Weaver (H) et des indices de régularité (R)⁶⁴. Cependant, ils présentent aussi quelques paliers plus ou moins prononcés (notamment la Grande Sure, figure 44), ce qui reflète la mixité des communautés échantillonnées. Cela ne signifie pas dans notre cas que l'échantillonnage soit inadapté car, conformément à notre approche phyto-écologique, les relevés ont été volontairement réalisés au sein de zones hétérogènes. Le long de transects, réalisés au contact de l'éboulis *ss* et des formations périphériques, la zone hétérostasique est certainement celle qui illustre le mieux le mélange des communautés sur talus d'éboulis.

Le diagramme rangs-fréquences des abondances des espèces recensées sur l'ensemble des écosystèmes, révèle l'existence de trois milieux distincts⁶⁵ (Figure 39) :

- *l'éboulis, sensu stricto*, en situation rhexistasique où dominant des espèces telles que *Valeriana montana*, *Sideritis hyssopifolia*, *Centranthus angustifolius*, *Rumex scutatus* et *Leucanthemum adustum*. Les ligneux pionniers sont représentés par *Rhamnus alpina* ;

- *l'écotone* hétérostasique, situé au contact des formations périphériques herbacées (pelouse, prairie) ou de la lande. Il est caractérisé par la cohabitation d'espèces à large amplitude telles que *Valeriana montana*, *Galium anisophyllum*, *Silene vulgaris*, *Lotus corniculatus* et *Thymus praecox* pour la strate sous-arbustive. Comme les espèces d'éboulis *ss*, elles sont indicatrices de certaines conditions de stabilité du milieu de part l'organisation morphologique et anatomique de leurs systèmes végétatifs souterrains. Nous reviendrons sur cet aspect dans le paragraphe II.

⁶⁴ Nous renvoyons au paragraphe 1.4 pour l'étude détaillée de la diversité spécifique.

⁶⁵ Cette classification est aussi précisée par les analyses multivariées et notamment la CAH que nous présenterons dans le paragraphe 1.3.

- les formations périphériques telles que la pelouse à *Carex sempervirens*, la prairie à *Calamagrostis varia* et les landes à *Arctostaphylos uva-ursi* ou *Laserpitium siler*. *Scabiosa columbaria*, *Laserpitium latifolium* et *Globularia nudicaulis* sont des espèces compagnes. L'annexe L présente la distribution des effectifs pour chaque espèce et par éco-complexe.

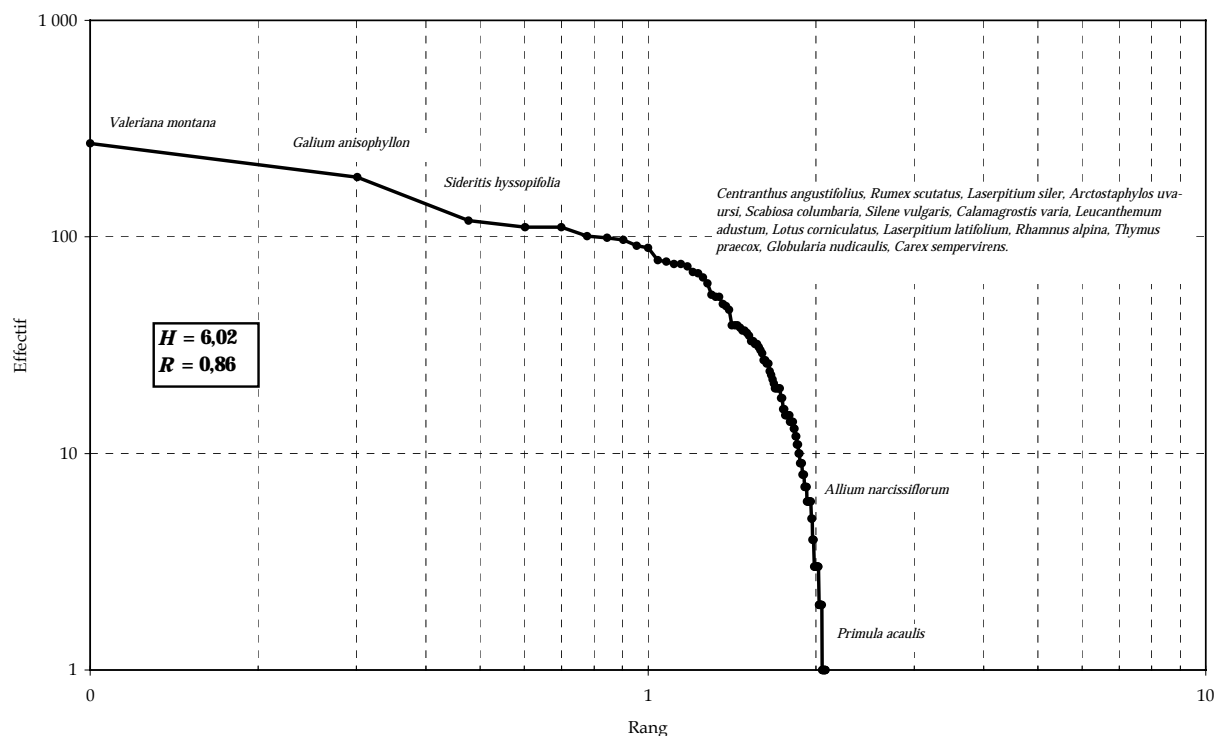


Figure 39 : Diagramme rangs-fréquences de la distribution des espèces sur l'ensemble des éco-complexes
($N = 3526$, $S = 126$)

L'analyse des diagrammes rangs-fréquences par éco-complexe permet de dresser une première typologie des milieux structurants. Typologie qui sera affinée dans le paragraphe II.

A. L'éco-complexe de La Plagne

L'éboulis *ss* est caractérisé par la présence d'espèces lithophiles comme *Centranthus angustifolius*, *Leucanthemum adustum*, *Sideritis hyssopifolia*, et *Rumex scutatus*. La strate arbustive pionnière est représentée par *Rhamnus alpina* (Figure 40). L'écotone hétérostasique est révélé par la présence de *Valeriana montana* et de certaines de ses espèces compagnes telles que *Galium anisophyllum* et *Silene vulgaris*. La strate sous-arbustive est représentée par *Thymus praecox*. Ces espèces constituent l'essentiel des formations à piquetage herbacé sur éboulis, elles privilégient les secteurs à matériaux fins (petits cailloux, graviers et terre fine) comme les terrassettes. Elles stabilisent le substrat ce qui favorise l'installation d'espèces provenant des formations périphériques. La prairie à *Calamagrostis varia* constitue la principale formation périphérique dominante, située en zone apico-proximale du talus d'éboulis (bombements herbeux). Les espèces dominantes de deux autres types d'écotones se distinguent dans la distribution. *Viburnum lantana* est un arbuste caractéristique de la lisière forestière au contact de la zone distale du talus d'éboulis. *Helleborus foetidus* colonise uniquement les plages colluviales situées au contact des bombements apicaux et les anciens cônes stabilisés avec quelques espèces compagnes appartenant à la prairie à *Calamagrostis varia* (Carte 13, chapitre 6). Espèce pré-vernale commune (floraison de février à avril) à caractère mésoxérophile et héliophile, sa présence pourrait révéler, ici, un déneigement précoce ou un enneigement assez faible ces dernières décennies.

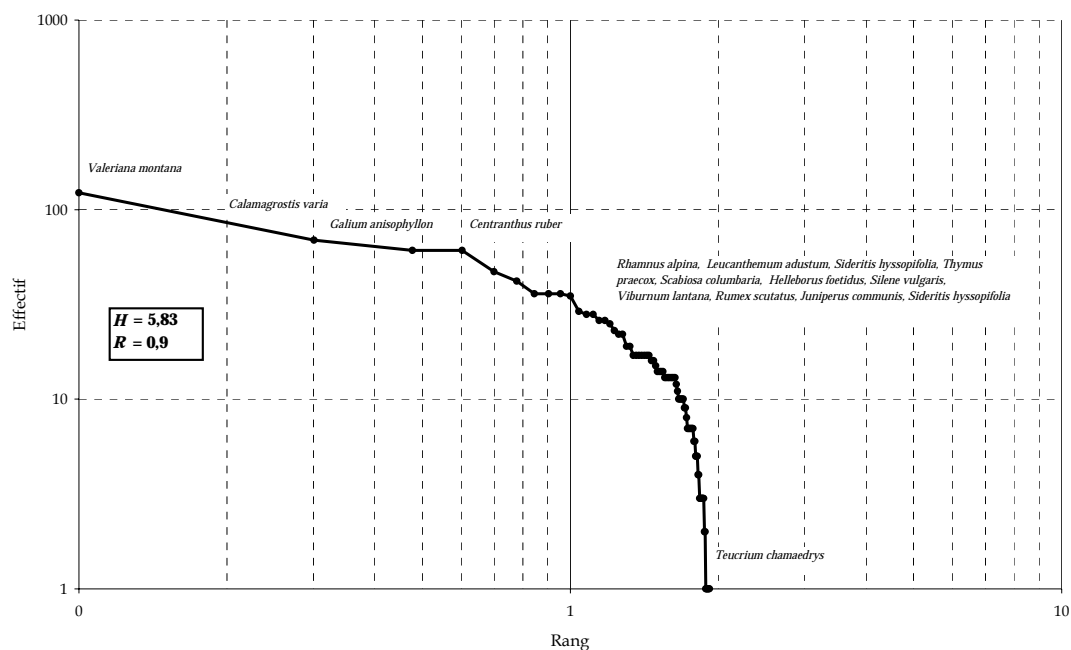


Figure 40 : Diagramme rangs-fréquences de la distribution des espèces
(Ecocomplexe de La Plagne, $N = 1398$, $S = 90$)

B. L'écocomplexe de l'Aulp du Seuil

La configuration est ici différente, les écotones graduels sont moins nombreux car les contacts sont en général francs (Figure 41). La présence d'une lande dense en bordure du cône d'éboulis (*Arctostaphylos uva-ursi* et *Laserpitium siler*) et de chenaux actifs limitent la progression latérale et longitudinale des espèces qui ont trouvé refuge au sein du bombement central (*Valeriana montana*, *Galium anisophyllum*). *Laserpitium latifolium* et *Globularia nudicaulis* sont des espèces compagnes de la lande. L'éboulis ss est caractérisé par la présence de *Sideritis hyssopifolia*, *Leucanthemum adustum* et *Rumex scutatus*. La strate arbustive pionnière est représentée par *Rhamnus alpina* et la lisière forestière par *Amelanchier ovalis*. Les petits paliers illustrent le mélange des communautés.

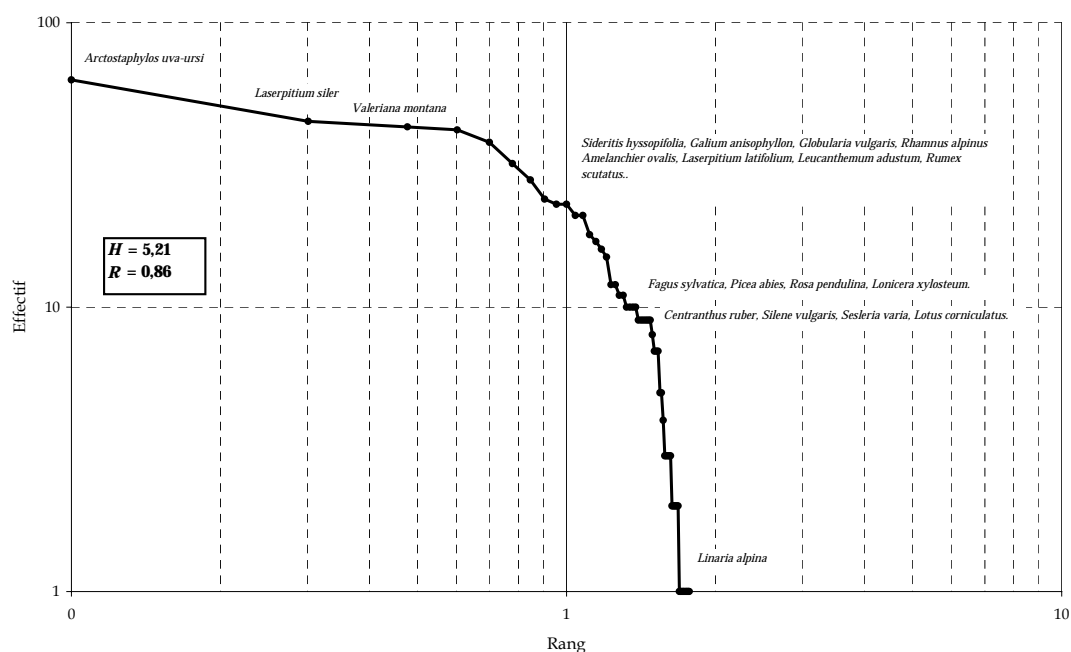


Figure 41 : Diagramme rangs-fréquences de la distribution des espèces
(Ecocomplexe de l'Aulp du Seuil, $N = 701$, $S = 65$)

C. L'écocomplexe des « Pelloux »

La configuration est assez proche de celle de l'Aulp du Seuil. Les zones transitielles sont moins nombreuses et plus petites. *Galium anisophyllum* et *Valeriana montana* caractérisent à la fois la plupart des taches de piquetage herbacé et les petits écotones situés au contact de la lande à *Laserpitium siler*. La pelouse est représentée par *Carex sempervirens*. *Scabiosa columbaria*, *Lotus corniculatus*, *Laserpitium latifolium* et *Euphorbia cyparissias* sont des espèces compagnes que l'on trouve à la fois au sein de la lande et de la pelouse et parfois, dans le piquetage herbacé. L'éboulis *ss* est colonisé par *Rumex scutatus*, *Sideritis hyssopifolia* et *Centranthus angustifolius* (Figure 42).

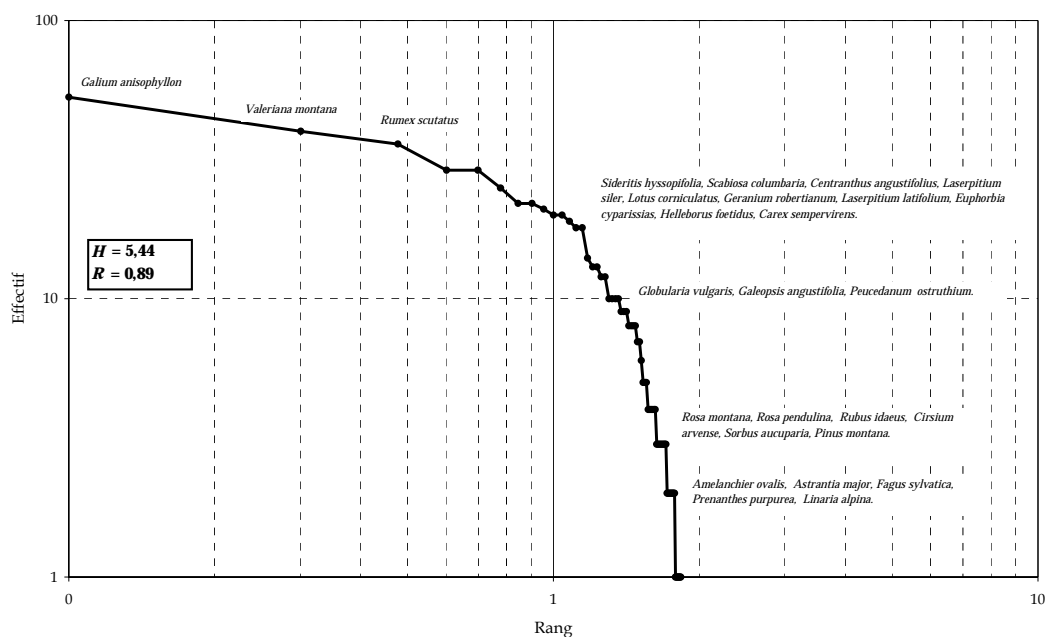
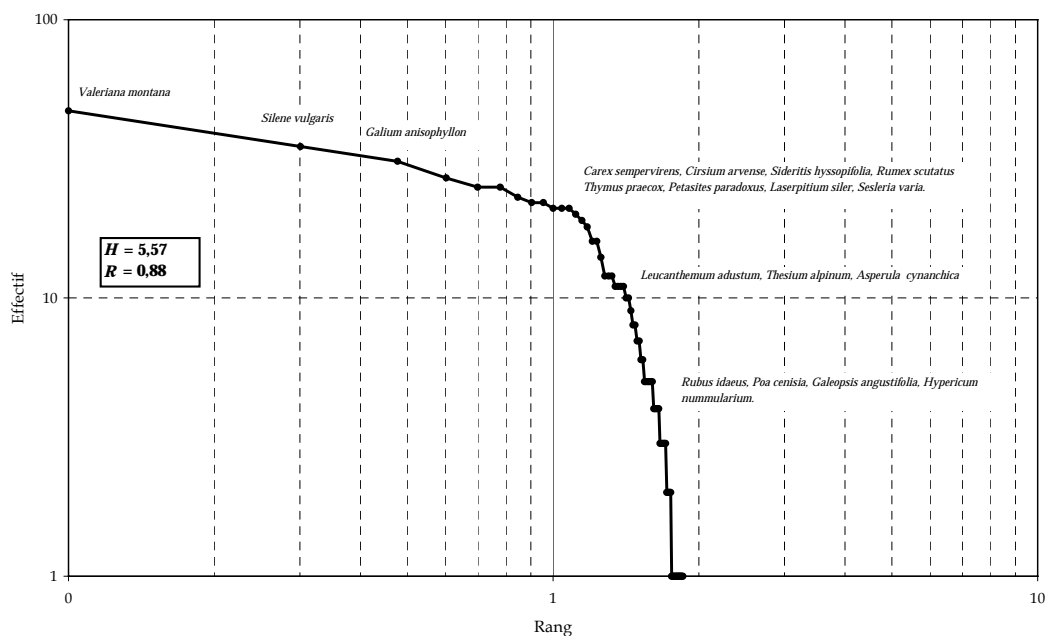


Figure 42 : Diagramme rangs-fréquences de la distribution des espèces (Ecocomplexe des « Pelloux », $N = 659$, $S = 70$)

D. L'écocomplexe du Grand Som

Comme pour les précédents écosystèmes, *Sideritis hyssopifolia*, *Rumex scutatus* et *Thymus praecox* caractérisent l'éboulis *ss* (Figure 43).

Figure 43 : Diagramme rangs-fréquences de la distribution des espèces (Ecocomplexe du Grand Som, $N = 683$, $S = 78$)



Les milieux transitiels et les secteurs à piquetage herbacé sont représentés par *Valeriana montana*, *Silene vulgaris*, *Galium anisophyllum* et *Senecio doronicum*. La pelouse, principale formation périphérique est caractérisée par la présence de *Carex sempervirens*, *Cirsium arvense*, *Sesleria varia* et *Laserpitium siler*. *Petasites paradoxus* est une espèce pionnière sur matériaux humides, riches en matériaux fins. Elle est surtout présente au contact de la pelouse en zone apico-proximale du talus d'éboulis.

E. L'écocomplexe de la Grande Sure

La distribution floristique de l'écocomplexe est légèrement différente pour deux raisons, d'une part, à la différence des quatre autres, il est en situation de petit ubac (exposition ouest) et, d'autre part, car la granulométrie du dépôt est assez grossière dans l'ensemble. Ainsi, une espèce est dominante au sein de l'éboulis ss, il s'agit d'*Allium narcicifolium*⁶⁶ (Figure 44). Les petits écotones, situés au contact de la pelouse sont caractérisés par *Valeriana montana*, *Senecio doronicum* et *Galium anisophyllum*. La principale formation périphérique est une pelouse à *Carex sempervirens* et *Sesleria varia*. *Scabiosa columbaria*, *Hypericum maculatum* et *Geranium sylvaticum* sont des espèces compagnes.

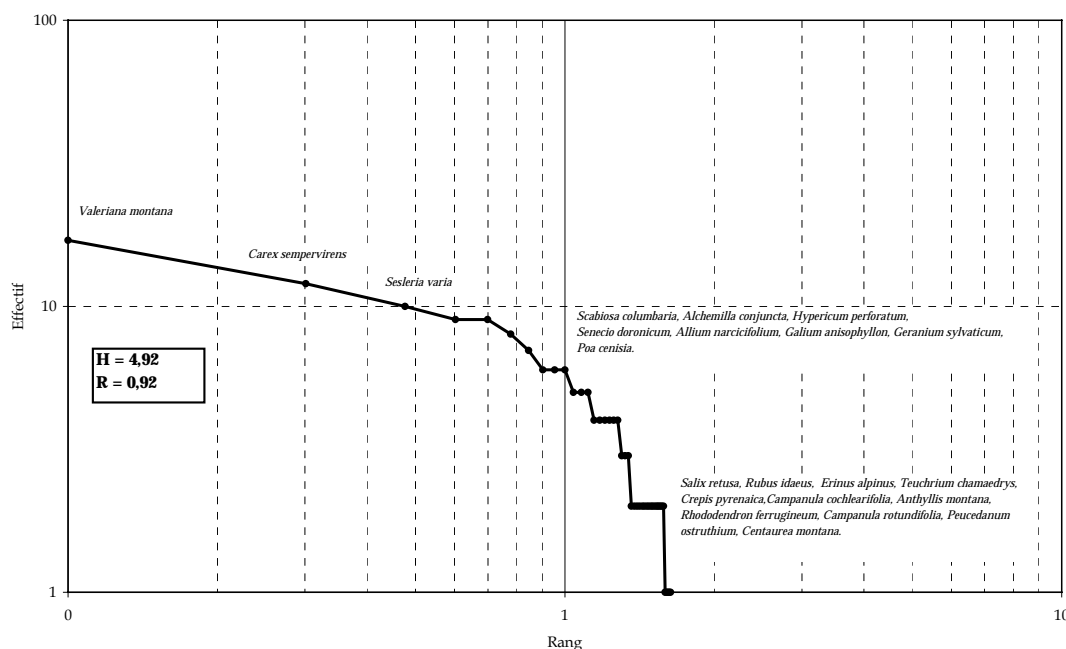


Figure 44 : Diagramme rangs-fréquences de la distribution des espèces (Ecocomplexe de la Grande Sure, $N = 165$, $S = 40$)

Finalement, les espèces caractérisant les milieux transitiels, les secteurs à piquetage herbacé et les secteurs rhexistasiques sont sensiblement similaires. Quelques particularités subsistent en fonction du type de formation périphérique dominant et de certaines conditions mésologiques. Nous reviendrons sur ces aspects dans le paragraphe II.

Voyons maintenant comment les différentes espèces répertoriées se répartissent en fonction de différentes classifications fonctionnelles.

1.2.1.3. Répartition des espèces selon les types biologiques de Raunkier

La répartition des espèces selon les types biologiques de Raunkier (Figure 45 et annexe I) montre la part prépondérante des hémicryptophytes (50%). La plupart des hémicryptophytes colonisent les formations périphériques herbacées denses mais beaucoup d'espèces lithophiles appartiennent à

⁶⁶ Cet éboulis est d'ailleurs connu des botanistes grâce à la présence de cette espèce.

cette catégorie. Certaines se développent dans les milieux transitiels et les secteurs à piquetage herbacé comme, *Galium anisophyllum* et *Senecio doronicum*, d'autres là où la granulométrie est plus grossière et les mouvements du substrat importants (*Centranthus angustifolius*). Les secteurs mobiles sont préférentiellement colonisés par des géophytes (21%) rhizomateuses (*Valeriana montana*, *Silene vulgaris*, *Rumex scutatus*), bulbeuses (*Allium narcicifolium*) ou stolonifères (*Poa cenisia*) dont l'appareil végétatif aérien n'est pas développé lors des périodes de mouvement intense, ce qui limite les contraintes aux seuls organes souterrains, leur permettant ainsi de se soustraire partiellement aux effets de traction et aux remaniements de surface.

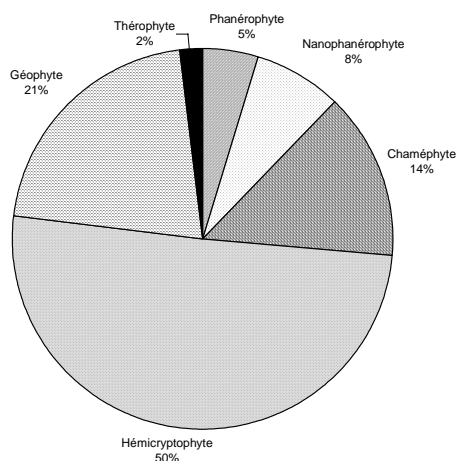


Figure 45 : Spectre biologique de l'ensemble des espèces répertoriées.

Les chaméphytes (14%) sont moins nombreux. Quelques espèces reviennent régulièrement comme par exemple : *Thymus praecox* et *Globularia cordifolia* pour les chaméphytes ligneux et *Helleborus foetidus* pour les chaméphytes herbacés. Les autres types sont moins représentés mais ils nous apportent des informations intéressantes, déjà préalablement entrevues dans le chapitre précédent. La présence d'une strate arbustive et arborescente indique des changements dans les conditions stationnelles des éboulis. Ces changements favorisent l'installation des nanophanérophytes pionniers comme *Rhamnus alpina* puis de certains phanérophytes (*Acer pseudoplatanus*, *Salix caprea*) lorsque les conditions sont encore plus favorables et notamment en zone distale des dépôts, au contact de la lisière forestière. Comme nous l'avons souligné dans le chapitre 6, pour certains écocomplexes, la lignification a été très importante depuis le début des années 80 (La Plagne, les Pelloux et l'Aulp du Seuil, annexe I). Enfin, les thérophytes (2%) sont des espèces qui s'affranchissent du mouvement par leur cycle biologique. Les annuelles qui vivent dans les éboulis, accomplissent leur cycle végétatif au cours de la période estivale lorsque les mouvements du substrat sont accidentels ou d'ampleur limitée : *Galeopsis angustifolia*, *Sedum album* et *Gentiana angustifolia*, par exemple. Ces espèces se développent principalement sur matériaux fins (< 5 cm).

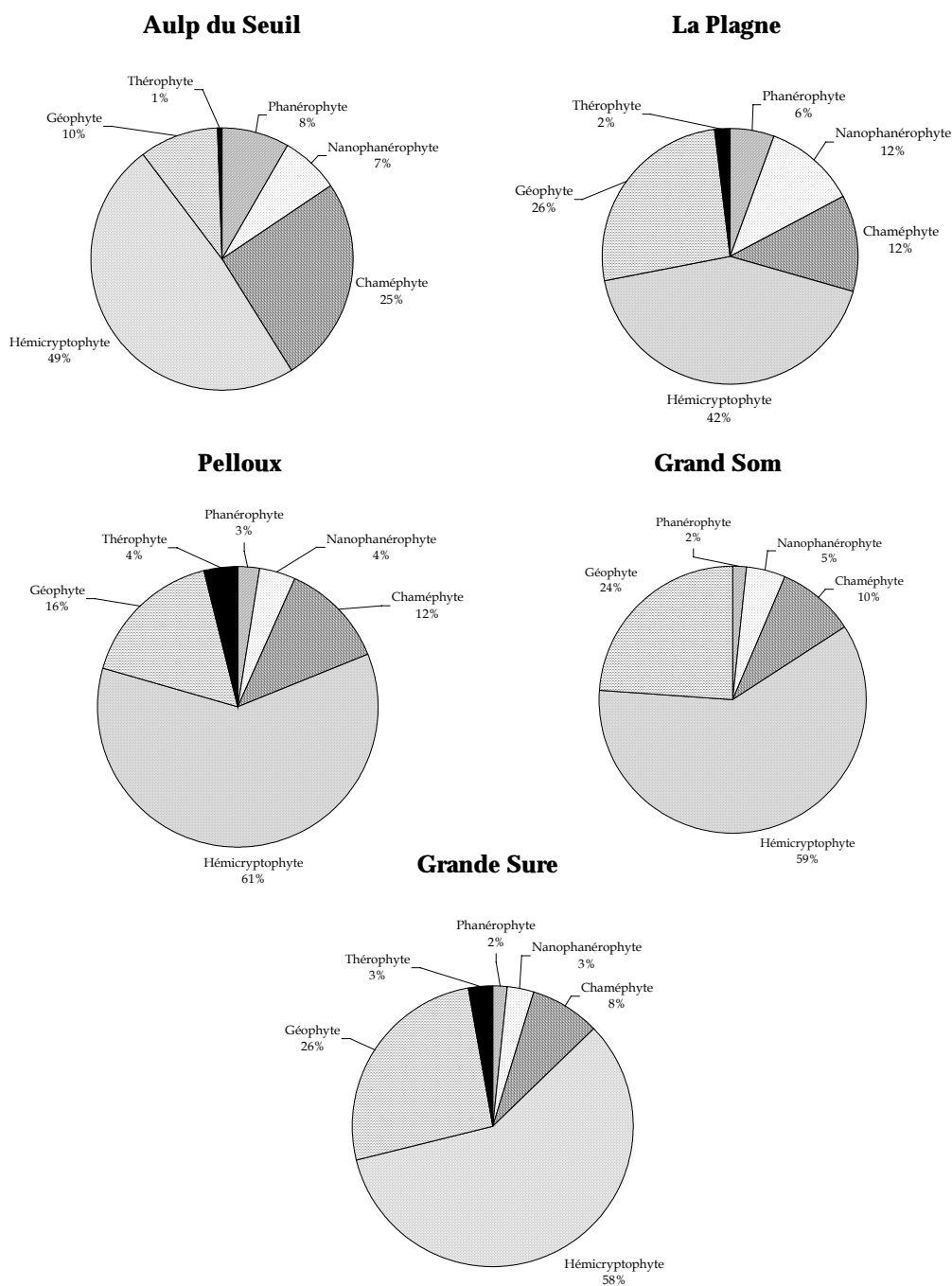
L'analyse des spectres biologiques par éco-complexe révèle des distributions assez hétérogènes (Figure 46 et annexe I).

Les hémicryptophytes représentent presque la moitié des espèces répertoriées par éco-complexe. Les éco-complexes encadrés par des formations herbacées denses et/ou des landes à *Laserpitium siler* présentent des pourcentages plus élevés (Les Pelloux, le Grand Som et la Grande Sure).

La répartition des géophytes et des chaméphytes oppose les éco-complexes du Grand Som et de la Grande Sure à ceux de l'Aulp du Seuil et des Pelloux. Les chaméphytes herbacés mais surtout ligneux sont plus nombreux dans les deux derniers. L'explication est en partie due à la présence des landes à *Arctostaphylos uva-ursi* et à la forte représentation des chaméphytes ligneux (*Thymus praecox*, *Globularia cordifolia*) au sein de ce que nous avons généralisé sous le terme de « piquetage herbacé ».

Cette opposition est aussi confirmée par la répartition des nanophanérophytes et des phanérophytes notamment pour l'Aulp du seuil.

Figure 46 : Spectres biologiques de l'ensemble des espèces répertoriées par éco-complexe



Cette analyse confirme l'opposition évoquée dans le chapitre 6 entre des éco-complexes à dominante « herbacée » et des éco-complexes à dominante « ligneuse ». L'éco-complexe de La Plagne constitue un cas intermédiaire où la répartition des types biologiques est plus homogène.

1.2.1.4. Les valeurs indicatrices de Landolt

Nous allons utiliser le caractère indicateur des espèces pour évaluer les conditions écologiques des mosaïques biorhexistasiques. Pour chaque relevé (placette), la liste des espèces permet de calculer pour chaque valeur de Landolt, un indice moyen par relevé.

A. L'écocomplexe de La Plagne

L'écocomplexe de La Plagne est caractérisé par une humidité moyenne (Tableau 49). Toutefois, la borne inférieure révèle la présence d'espèces à caractère mésoxérophile ce qui traduit un état hydrique du milieu parfois plus sec notamment en période estivale. Les sols sont maigres (faible teneur en azote) et peu acides (pH 5,5-7,5). Les espèces sont en moyenne photophiles voire franchement semi-héliophiles. Ces indices sont assez révélateurs des conditions d'ouverture des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis. Les relevés effectués en lisière forestière sont nombreux à La Plagne (Annexe H), par conséquent le caractère photophile est légèrement favorisé.

Tableau 49 : Indices moyens de Landolt pour l'écocomplexe de La Plagne

Valeur de landolt	mF	mR	mN	mL	mT
Valeur moyenne	2,42	3,73	2,24	3,32	2,57
Borne inférieure	2	2,8	2	2,3	1,9
Borne supérieure	3,4	4,7	2,9	4	4
Amplitude	1,4	1,9	0,9	1,7	2,1

La température moyenne à laquelle les espèces sont soumises en période végétative est plutôt froide (Chapitre 8). Cependant, l'échauffement est important sur les talus d'éboulis d'adret ce qui facilite l'installation d'espèces semi-thermophiles. Les espèces présentent de fortes amplitudes notamment vis-à-vis de l'acidité du sol, de la lumière et de la température.

B. L'écocomplexe de l'Aulp du Seuil

Comme l'écocomplexe de La Plagne, celui de l'Aulp du Seuil présente une humidité moyenne, des sols peu acides à moyennement riches en bases et pauvres en éléments nutritifs (Tableau 50). Les sols sont légèrement moins humides que ceux de La Plagne, cela est en partie dû à la situation privilégiée de l'Aulp du Seuil en bordure orientale du massif (carte 5, chapitre 5).

Tableau 50 : Indices moyens de Landolt pour l'écocomplexe de L'Aulp du Seuil.

Valeur de landolt	mF	mR	mN	mL	mT
Valeur moyenne	2,37	3,54	2,11	3,65	2,32
Borne inférieure	1,8	3	2	3	1,7
Borne supérieure	3	4,5	2,5	4,3	3
Amplitude	1,2	1,5	0,5	1,3	1,3

Les espèces indicatrices de lumière traduisent un caractère semi-héliophile plus prononcé et des températures légèrement plus fraîches (adret en exposition est). L'amplitude écologique des espèces est plus faible sur l'ensemble des valeurs.

C. L'écocomplexe des Pelloux

L'écocomplexe des Pelloux est le plus sec (Tableau 51). Tout comme l'écocomplexe de l'Aulp du Seuil, il est situé sur le rebord oriental du massif où les précipitations sont moins abondantes. En situation d'adret, il s'agit d'un écosystème très ouvert où la présence forestière est limitée en zone distale du talus d'éboulis ce qui contribue à renforcer son caractère xérique. Les sols sont franchement maigres, peu acides à moyennement riches en base. L'amplitude de la valeur de réaction est assez élevée, ce qui peut étonner car les substrats sont tous basiques. Soit la sécheresse ralentie la minéralisation, soit la matière organique, issue des humus bruts des tangelles subalpines, descend ou est descendue avec les avalanches, les couloirs et les corniches étant bien colonisés par le pin à crochet.

Tableau 51 : Indices moyens de Landolt pour l'écocomplexe des « Pelloux »

Valeur de landolt	mF	mR	mN	mL	mT
Valeur moyenne	2,09	3,53	2,10	3,54	2,46
Borne inférieure	1	3,1	2	3,3	1,7
Borne supérieure	2,7	5	3	5	4
Amplitude	1,7	1,9	1	1,7	2,3

La luminosité en période végétative est favorable aux espèces photophiles mais aussi à quelques héliophytes. Ce qui confirme l'existence de conditions d'ensoleillement très favorables et le degré d'ouverture de l'écocomplexe. Comme pour l'écocomplexe de La Plagne, la température est plutôt froide mais l'amplitude des espèces est assez large. L'écocomplexe des Pelloux présente les valeurs moyennes d'humidité, de réaction et de niveau trophique les plus faibles.

D. L'écocomplexe du Grand Som

L'écocomplexe du Grand Som est le plus humide (Tableau 52). Il présente aussi les valeurs moyennes de réaction et de luminosité les plus élevées et la valeur de température la plus basse. Il bénéficie d'une exposition plein sud mais sa situation au centre du massif en fait un écosystème relativement bien arrosé. Les sols sont assez maigres parfois mésotrophes et moyennement riches en bases (large amplitude).

Tableau 52 : Indices moyens de Landolt pour l'écocomplexe du Grand Som

Valeur de landolt	mF	mR	mN	mL	mT
Valeur moyenne	2,53	3,87	2,23	3,72	2,27
Borne inférieure	2	2,7	2	3	1,5
Borne supérieure	3,4	4,8	3,1	4,5	3
Amplitude	1,4	2,1	1,1	1,5	1,5

La luminosité est élevée en période végétative ce qui favorise le développement des semi-héliophytes. En revanche, les espèces révèlent des conditions thermiques assez froides.

E. L'écocomplexe de la Grande Sure

Les conditions d'humidité sont moyennes (espèces mésoxérophiles à mésophiles) mais l'amplitude importante (espèces xérophiles à mésohygroclines). Les sols sont en moyenne peu acides et plutôt maigres. La luminosité favorise surtout les photophytes mais, là encore, l'amplitude est grande (semi-héliophile à héliophile). Les conditions thermiques sont sensiblement similaires à celles des autres écosystèmes mais les espèces montrent de larges amplitudes (froides à moyennement chaudes).

Tableau 53 : Indices moyens de Landolt pour l'écoComplexe de la Grande Sure

Valeur de landolt	mF	mR	mN	mL	mT
Valeur moyenne	2,48	3,62	2,29	3,64	2,52
Borne inférieure	1	1,5	2	2,5	2
Borne supérieure	3,4	5	3	5	4,4
Amplitude	2,4	3,5	1	2,5	2,4

L'écoComplexe de la Grande Sure abrite des espèces à très large amplitude en termes d'humidité, de réaction, de lumière et de température. Sa position d'ubac (semi-ubac) est peut être un facteur explicatif.

Finalement, les écoComplexes présentent des conditions écologiques et bioclimatiques légèrement différentes. D'une manière générale, les amplitudes autécologiques des espèces sont assez larges et notamment pour l'écoComplexe de la Grande Sure. Mais les écarts ne sont pas suffisamment prononcés pour permettre la réalisation d'une typologie fonctionnelle pertinente. Seule l'humidité permet de les différencier. Elle oppose l'écoComplexe des Pelloux, le plus sec à celui du Grand Som, le plus humide. Ces écoComplexes bénéficient d'une position d'adret et celui du Grand Som est exposé plein sud. Les écoComplexes de La Plagne, de l'Aulp du Seuil et de la Grande Sure sont caractérisés par une humidité moyenne. La situation au sein du massif, les particularités topographiques des écoComplexes et l'influence de la corniche pourraient expliquer ces disparités et contribuer au maintien de conditions hydriques plus ou moins humides ou sèches.

Ainsi, la situation des écoComplexes au sein du massif permet d'opposer clairement le Grand Som (Chartreuse centrale, arrosée) aux Pelloux (rebord oriental plus sec). Mais pourquoi dans ce cas, l'Aulp du Seuil ne présente-t-il pas les mêmes conditions hydriques que les Pelloux ? Ici intervient peut être le rôle de la corniche et les conditions micro-climatiques qu'elle est susceptible d'engendrer. La corniche de l'Aulp du Seuil est située au contact du cône d'éboulis et son commandement est très imposant (cheminée à microclimat froid). Au contraire, dans le cas des Pelloux elle est située en recul par rapport à l'actuel talus d'éboulis vif et l'écoComplexe bénéficie d'un degré d'ouverture plus important. Le phénomène est identique pour la Grande Sure qui reçoit directement les perturbations venant de l'ouest. L'écoComplexe devrait être un peu plus humide d'autant que les pâturages sont riches et verdoyants. Sa corniche est aussi située légèrement en retrait et le commandement n'est pas très élevé. Par conséquent, les perturbations ne s'arrêtent pas. Le tablier de La Plagne est exposé plein sud mais se situe au sein d'un cirque surmonté par une imposante corniche qui modifie certainement les conditions hydriques locales.

L'analyse bivariée devrait peut être nous permettre de déceler certains facteurs explicatifs et de quantifier les relations entre les espèces et les facteurs du milieu.

1.2.2. L'analyse bivariée

L'analyse bivariée révèle quelques relations significatives, préalablement supposées lors de l'étude des distributions simples (Tableau 54 et annexe M).

La sociabilité-répartition est fortement corrélée à l'état pédologique et la stabilité du substrat. Cette relation illustre parfaitement l'existence d'un gradient biorhexistasique, très structurant sur talus d'éboulis. Il détermine la répartition et la densité végétales, en fonction de l'évolution de la couverture pédologique et de la plus ou moins grande stabilité du substrat.

Tableau 54 : Coefficients de corrélation de Spearman (variables biotiques/abiotiques)

Spearman's rho	Sociabilité	Stratification
Longueur	-0,033	-0,168
Topographie	0,048	0,288
Stabilité	0,806	0,401
Pente	-0,186	-0,220
Granoclassement	0,087	-0,198
Etat pédologique	0,833	0,367
Sociabilité	1,000	0,408
Stratification	0,408	1,000

Significativité au seuil de 1% ($\alpha = 0,01$). N = 411

L'analyse des relations entre les espèces et les variables écologiques illustre parfaitement le modèle et oppose la biostasie à la rhexistasie (Annexe M). Ainsi, les espèces appartenant aux formations végétales denses biostasiques, de type pelouse (*Carex sempervirens*, *Globularia vulgaris*, *Scabiosa columbaria*, *Helianthemum nummularium*) et lande (*Laserpitium siler*, *Laserpitium latifolium*) sont fortement corrélées aux trois variables. A l'inverse, *Centranthus angustifolius* caractérise le milieu rhexistasique instable, constitué d'un lithosol où les espèces se développent sous la forme de touffes dispersées. L'hétérostasie est plus complexe, elle sera étudiée dans l'analyse multivariée.

D'autre part, une relation significative existe entre la stratification, la stabilité, la sociabilité et l'état pédologique. Plus la densité végétale est importante, plus la stabilité est grande et plus la stratification est développée. Et inversement. Cette relation met en évidence le rôle éventuel des ligneux, des formations sous-arbustives et herbacées denses dans la stabilisation du substrat.

Les corrélations entre espèces correspondent bien à l'analyse des diagrammes rang-fréquences et des regroupements préférentiels que nous avons proposés dans le paragraphe 1.2.1.2.

Ces considérations ne sont pas nouvelles mais les relations sont quantifiées.

Les cartographies phyto-morphologiques et physiologiques diachroniques nous ont permis de dresser une typologie structurelle et d'évolution différentielle des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis. Les traitements univariés et bivariés des données phyto-écologiques stationnelles ont partiellement enrichie cette typologie d'une composante fonctionnelle, notamment par le biais des types biologiques et de la valeur indicatrice d'humidité de Landolt. Cependant, un caractère homogène domine entre les différents écomplexes. Cette homogénéité est structurée par le gradient biorhexistasique et ne nous permet pas réellement d'effectuer des regroupements en fonction de trajectoires phyto-écologiques particulières. L'analyse multivariée devrait nous permettre de préciser ces considérations.

1.3. Un traitement de synthèse : L'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) et la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

Nous avons procédé à une analyse de données multivariée afin de synthétiser les informations récoltées et de tenter de dresser une typologie phyto-écologique des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis. Nous rappelons que nous avons procédé à une analyse factorielle des correspondances⁶⁷, dont les coordonnées factorielles ont servi à établir une classification ascendante hiérarchique.

⁶⁷ Quatre AFC exploratoires ont été réalisées (voir 1.3.2.).

Ces traitements ont porté sur une matrice composée de 411 relevés et de 109 variables (10 facteurs mésologiques et 99 espèces, annexe N)⁶⁸. En premier lieu nous présenterons les résultats de la CAH car le classement obtenu facilite l'interprétation des relevés sur les plans factoriels de l'AFC.

1.3.1. Les résultats de la CAH

La hiérarchie fait apparaître une succession de dichotomies correspondant aux nœuds. Le nombre important de relevés ne permet pas de présenter l'arbre complet. La figure 47 résume les principales informations. Les dichotomies séparent les relevés en groupes selon leur ressemblance. Les nœuds qui différencient les groupes à chaque dichotomie (pour les quatre dernières), ainsi que le contenu des groupes, sont repérés et décrits ci-après.

1.3.1.1. Les quatre dernières dichotomies

Première dichotomie, le nœud 415 sépare les relevés en deux sous-ensembles très dissymétriques du point de vue des effectifs représentés.

Groupe 1 : ce sont des relevés issus de transects réalisés au contact de la lande, de la forêt, de la pelouse et de quelques îlots. Ils ont été réalisés sur éboulis en milieu rhexistasique non végétalisé. Il s'agit de 13 relevés appartenant aux écocomplexes de La Plagne, des Pelloux, de la Grande Sure et de l'Aulp du Seuil.

Groupe 2 : 347 relevés appartenant à l'ensemble des écocomplexes étudiés. Ils sont regroupés en fonction des différentes variables biotiques et abiotiques.

Deuxième dichotomie, le nœud 414 sépare le groupe 2 en deux sous-ensembles :

Groupe I : ce sont des relevés appartenant à des transects réalisés au contact de la forêt et de quelques îlots arbustifs. Ils s'identifient par les forts taux de recouvrement des espèces forestières et de lisière forestière. Cet ensemble regroupe 51 relevés appartenant principalement à l'écocomplexe de La Plagne.

Groupe II : ces relevés regroupent la plupart des variables abiotiques et biotiques ainsi que les taux de recouvrement élevés des strates herbacée, sous-arbustive et arbustive. Il s'agit de 347 relevés dont la provenance est très hétéroclite.

La troisième dichotomie, le nœud 413 divise le groupe II en deux sous-ensembles :

Groupe Iia : ces relevés caractérisent le secteur rhexistasique colonisé par la strate herbacée et sous-arbustive. Cet ensemble totalise 201 relevés appartenant essentiellement aux écocomplexes de La Plagne, des Pelloux et du Grand Som et secondairement à l'Aulp du Seuil et la Grande Sure.

Groupe IIB : 146 relevés dont la provenance est ici encore très hétéroclite. Ils caractérisent les formations biostasiques herbacées et sous-arbustives et hétérostasiques herbacées (dont écotones herbacées).

⁶⁸ Sur les 141 initiales (12 variables environnementales et 126 espèces).

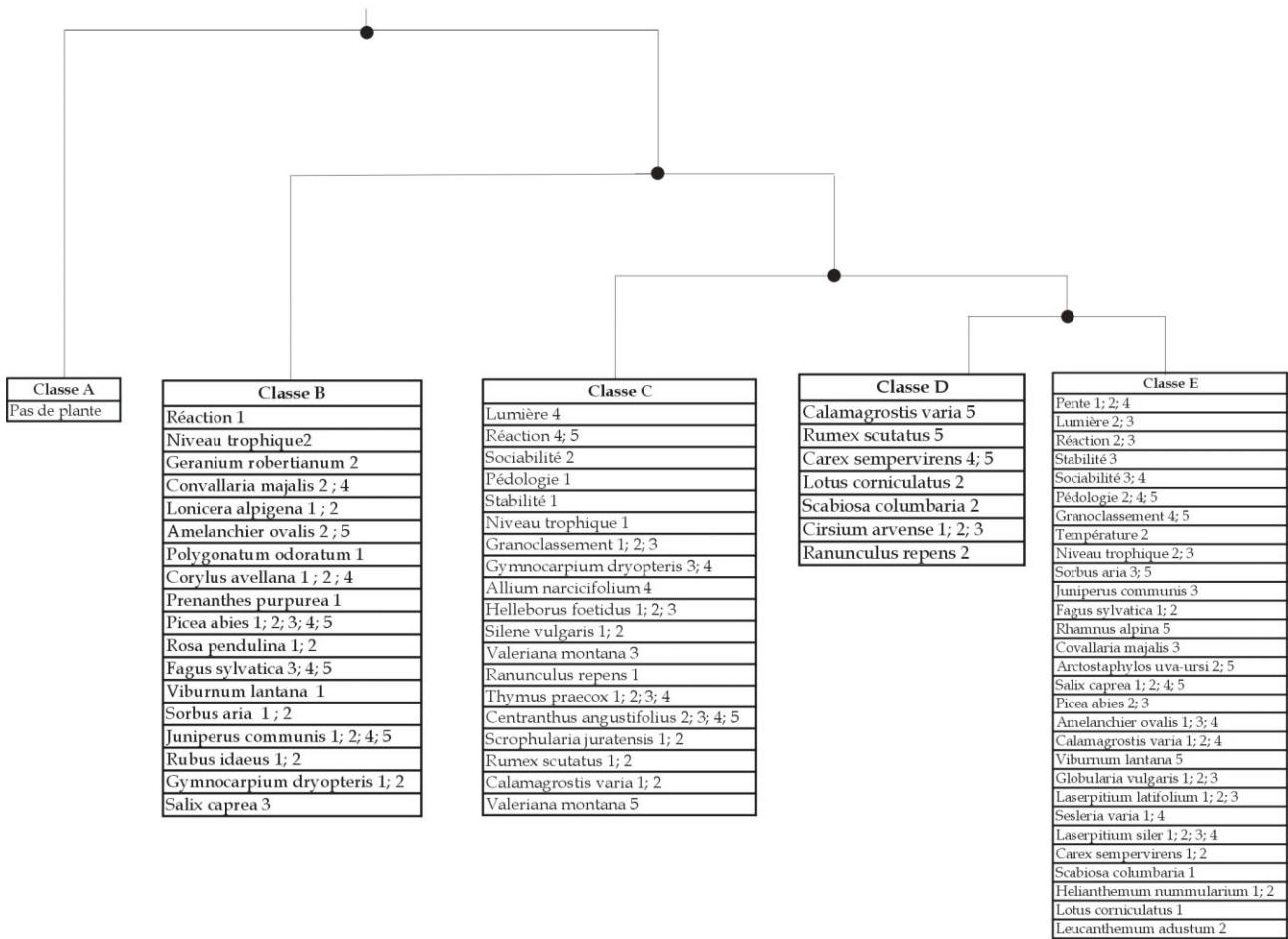
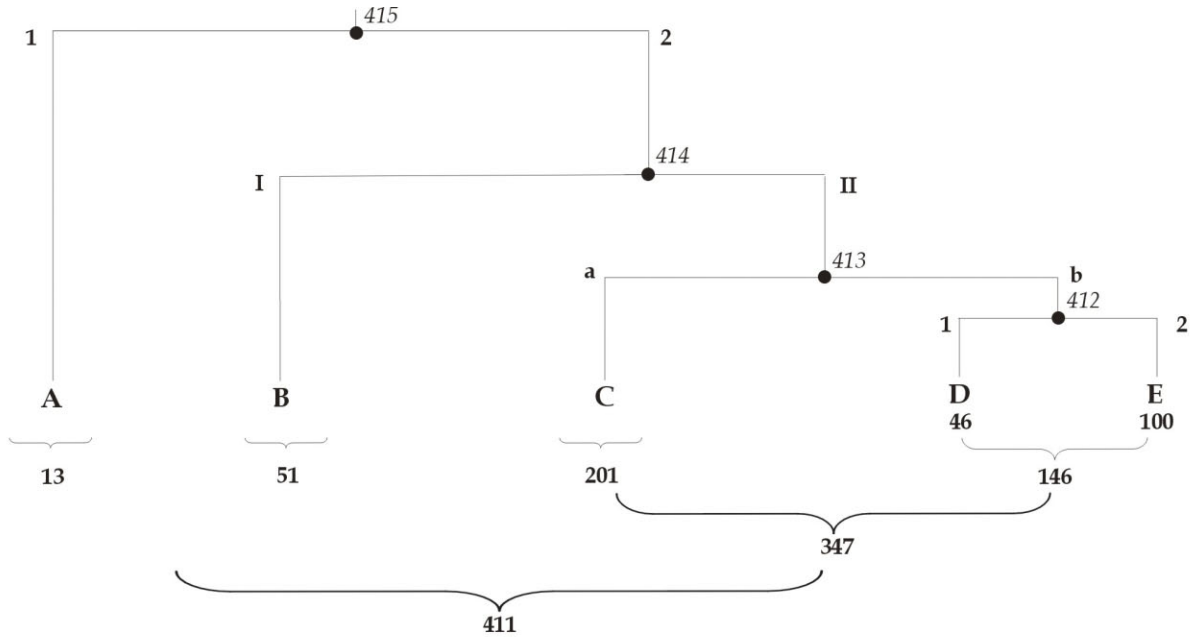


Figure 47 : Arbre hiérarchique et interprétation des classes de la Classification Ascendante Hiérarchique

La dernière dichotomie sépare le groupe IIb en deux sous-ensembles :

Groupe IIb1 : 46 relevés appartenant majoritairement à La Plagne et au Grand Som. Leur point commun porte sur la présence des formations biostasiques herbacées (pelouse, prairie).

Groupe IIb2 : 100 relevés principalement originaires de l'Aulp du Seuil (formations hétérostasiques et biostasiques sous-arbustives) et secondairement des autres écocomplexes (formations hétérostasiques herbacées).

1.3.1.2. L'interprétation des classes proposées par la CAH

Les classes proposées par la CAH reposent sur la similitude entre relevés et sur la co-occurrence des variables biotiques (dont espèces) et abiotiques. Le principe de la phyto-écologie veut qu'un lot de facteurs biotiques et/ou abiotiques communs à plusieurs relevés indique des conditions écologiques semblables. Les classes de relevés correspondent donc à des ensembles de placettes où les conditions de croissance se ressemblent. En ce qui concerne les espèces, leur co-occurrence indique qu'elles ont les mêmes exigences (ou les mêmes tolérances) face aux facteurs du milieu.

La CAH permet de distinguer cinq classes principales de relevés (Figure 47)

- Classe A : Eboulis rhexistasiques non végétalisés

La classe A regroupe des relevés caractérisés par une absence d'espèce. Ils matérialisent l'éboulis rhexistasiq pur, exempt de végétation.

- Classe B : Contacts éboulis/forêt biostasiq

La classe B correspond aux écotones de lisière forestière et aux relevés réalisés au contact du front forestier ou d'îlots arbustifs biostasiq sur éboulis. Les sols mésotrophes, sont moyennement riches en éléments nutritifs, modérément acides et permettent une activité biologique moyenne. La CAH associe cette classe à plusieurs espèces caractéristiques, à forts taux de recouvrement :

- de la hêtraie-sapinière-pessièrè mésophile : *Fagus sylvatica* et *Picea abies* pour la strate arborescente puis *Prenanthes purpurea* et *Polygonatum odoratum* pour la strate herbacée ;

- de la lisière forestière mésophile à mésoxérophile : *Corylus avellana*, *Viburnum lantana*, *Lonicera alpigena*, *Rosa pendulina*, *Sorbus aria* et *Rubus idaeus* qui matérialisent souvent la transition entre la lisière forestière et l'éboulis rhexistasiq. Les espèces herbacées sont représentées par *Convallaria majalis*, *Geranium robertianum* et *Gymnocarpium dryopteris*.

Salix caprea, *Juniperus communis* et *Amelanchier ovalis* caractérisent les îlots sous-arbustifs ou arbustifs situés sur éboulis mais ils accompagnent assez régulièrement les espèces de la lisière forestière.

- Classe C : Eboulis rhexistasiques végétalisés

Les relevés de la classe C sont situés sur éboulis instables, à lithosols moyennement riches en bases et pauvres en substances nutritives. La matrice granulométrique est constituée, selon les relevés, de petits, moyens ou gros blocs. On retrouve associées à cette classe des espèces semi-héliophiles à héliophiles, souvent dispersées, dont la répartition est fortement dépendante de la nature granulométrique du substrat :

- sur gros blocs : *Gymnocarpium dryopteris* (modalités du taux de recouvrement 3 et 4) ;
- sur blocs moyens : *Centranthus angustifolius* (4 ; 5), *Allium narcicifolium* (4), et *Scrophularia juratensis* (1) ;
- sur petits blocs : *Centranthus angustifolius* (2 ; 3), *Scrophularia juratensis* (2) ; *Silene vulgaris* (1 ; 2) ; *Rumex scutatus* (1 ; 2) ; *Valeriana montana* (3) *Thymus praecox* (1 ; 2) ;

Thymus praecox (3 ; 4) ; *Valeriana montana* (5) ; *Helleborus foetidus* (1 ; 2 ; 3), *Ranunculus repens* (1) et *Calamagrostis varia* (1 ; 2) caractérisent aussi les secteurs à piquetages herbacé et sous-arbustif hétérostasiques ainsi que certains écotones graduels situés au contact de la prairie à *Calamagrostis varia* de l'éco-complexe de la Plagne (bombements végétalisés). *Helleborus foetidus* a la particularité de coloniser les anciens cônes stabilisés qui séparent les différents bombements végétalisés, en zone apico-proximale du tablier d'éboulis de La Plagne (1.2.1.2, A).

- Classe D : Formations herbacées biostasiques denses

La classe D regroupe la prairie à *Calamagrostis varia* et la pelouse à *Carex sempervirens*. *Lotus corniculatus*, *Scabiosa columbaria*, *Cirsium arvense* et *Ranunculus repens* constituent des espèces compagnes. La présence de *Rumex scutatus* s'explique par le fait que l'espèce affectionne particulièrement les petits secteurs situés au contact des formations herbacées denses où les largages de fines sont particulièrement importants. C'est une espèce qui marque par sa présence les écotones à piquetage herbacé situés sous les bombements végétalisés de La Plagne ou la pelouse à *Carex sempervirens* du Grand Som.

- Classe E : contacts éboulis/lande/îlots hétérostasiques à biostasiques et écotones hétérostasiques à piquetage herbacé

Cette classe est assez hétéroclite et regroupe des espèces à large amplitude autécologique. Les variables abiotiques et biotiques traduisent des conditions écologiques appartenant conjointement à la biostasie et l'hétérostasie. On distingue :

- les landes hétérostasiques et biostasiques à *Arctostaphylos uva-ursi*, *Juniperus communis* et/ou *Laserpitium siler* ;
- les îlots arbustifs denses à *Sorbus aria*, *Rhamnus alpina*, *Salix caprea* et *Amelanchier ovalis* ;
- des formations herbacées hétérostasiques, constituées d'espèces à faibles taux de recouvrement, appartenant à l'origine à des formations biostasiques denses de type pelouse ou prairie comme *Carex sempervirens* et *Calamagrostis varia*. *Sesleria varia*, *Globularia vulgaris*, *Scabiosa columbaria*, *Helianthemum nummularium* et *Lotus corniculatus* constituent des espèces compagnes à large amplitude.

Finalement, quelque soit l'éco-complexe considéré, les relevés s'ordonnent principalement en fonction du gradient biorhexistasique. La classification oppose nettement l'éboulis rhexistasique aux formations herbacées et ligneuses biostasiques. Les milieux hétérostasiques sont plus diversifiés et regroupent les strates herbacée, sous-arbustive et arbustive. Les principaux types de contact entre les formations périphériques et l'éboulis sont mis en évidence. Les espèces caractéristiques des écotones francs et graduels sont révélées par la CAH, qui les englobe au sein des milieux hétérostasiques.

1.3.2. Les résultats de l'AFC

Quatre AFC exploratoires ont été réalisées sur la matrice des 411 relevés et des 141 variables initiales (12 variables mésologiques et 126 espèces). Ces AFC nous ont permis d'écarter de l'analyse finale deux variables redondantes trop structurantes : l'état géodynamique et la stratification. L'état géodynamique est en réalité une variable assez subjective, qui classe automatiquement les relevés selon le gradient biorhexistatique. Elle masque la contribution des autres variables aux axes factoriels. La stratification produit le même effet. Les paragraphes qui suivent montrent que malgré l'absence de ces deux variables, les informations sont conservées et le nuage de points est structuré par un plus grand nombre de facteurs mésologiques. Les espèces rares ont été triées lors de l'analyse univariée (présentes dans moins de trois relevés). Elles ont été projetées comme éléments supplémentaires sur les plans de l'AFC mais ne contribuent pas aux axes. Le détail des résultats de l'AFC est présenté dans l'annexe N.

1.3.2.1. L'inertie associée au plan factoriel

Axe 1 : 36,4%

Axe 2 : 30,5%

Les taux obtenus sont très bons, l'AFC permet d'expliquer la structuration du nuage de points. Ceci est lié au fait que nous avons éliminé les variables peu structurantes telles que les espèces rares. FENELON (1981) souligne que le taux d'inertie s'affaiblit proportionnellement au « parasitage » de l'information essentielle par des variables peu structurantes et, est très sensible au codage. Lorsque celui-ci est limité à quelques modalités (3 à 4 modalités par exemple), les positions possibles, géométriquement, se trouvent réduites, ce qui entraîne des taux d'inertie faibles.

1.3.2.2. Contributions des variables et des modalités aux axes factoriels

Les variables sociabilité-répartition, pédologie, stabilité et granoclassement caractérisent fortement l'axe 1. La contribution des espèces herbacées est assez importante. L'axe 2 est représenté par les valeurs indicatrices de lumière, de réaction et de substances nutritives ainsi que par des espèces ligneuses arbustives et arborescentes (Annexe N).

1.3.2.3. La position des modalités des variables

En raison du nombre important de contributions secondaires des variables « espèces » aux axes factoriels, seules les positions des modalités des variables mésologiques seront représentées ici. Nous renvoyons à l'annexe N pour plus de détails sur les contributions des 99 espèces.

Les modalités des variables biotiques et abiotiques ont été projetées une à une sur les plans de l'AFC (Figure 48). Ces descripteurs ont été numérotés dans le sens d'un gradient environnemental (Chapitre 5) qui est ici représenté par une flèche. Par exemple pour la variable stabilité, la modalité « instable » (modalité 1) correspond au départ de la flèche et la modalité « stable » (modalité 3) est située à l'extrémité de la flèche. Entre ces deux modalités, le tracé relie la ou les modalités intermédiaires (pénéstabilité, modalité 2).

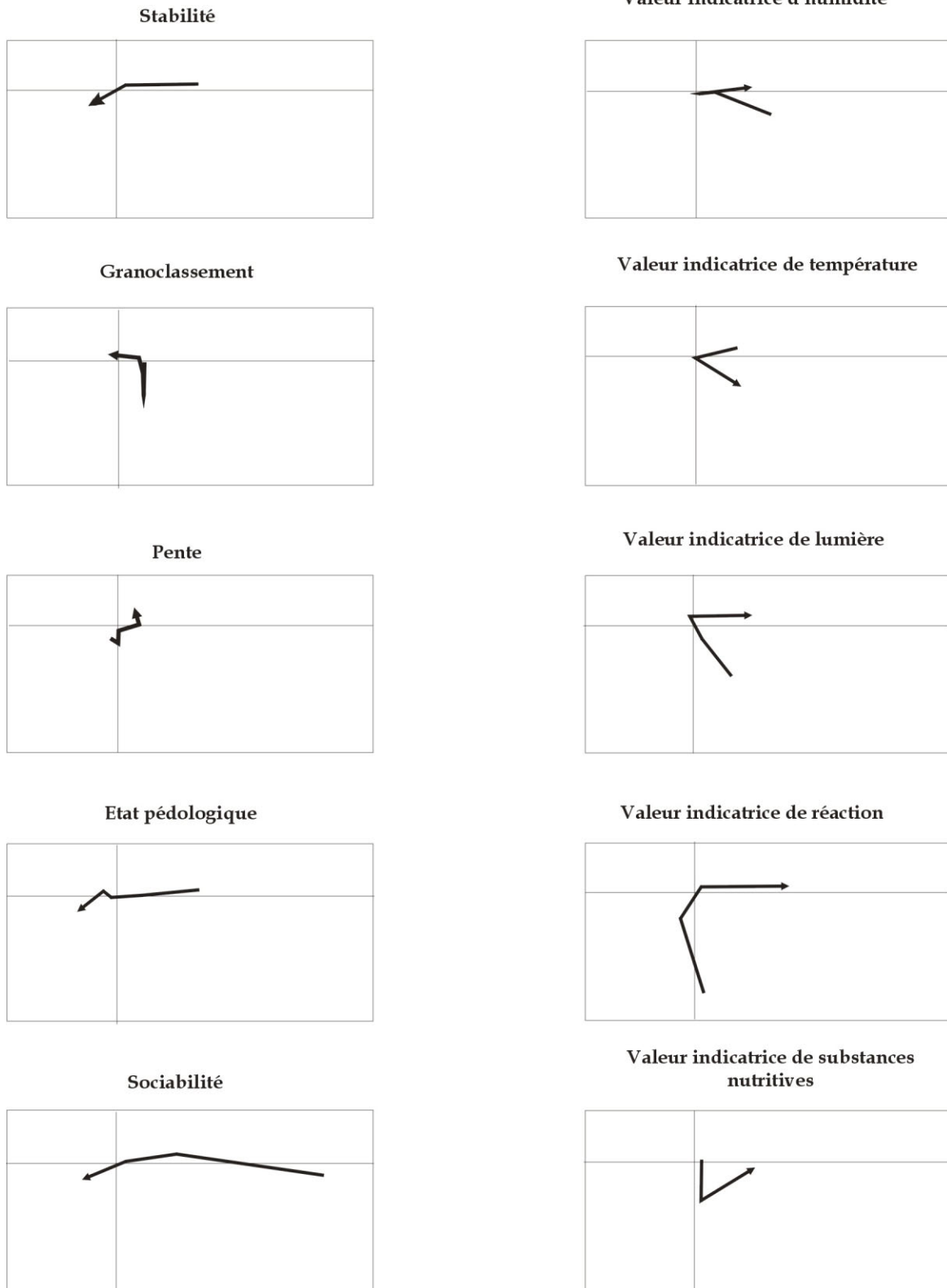
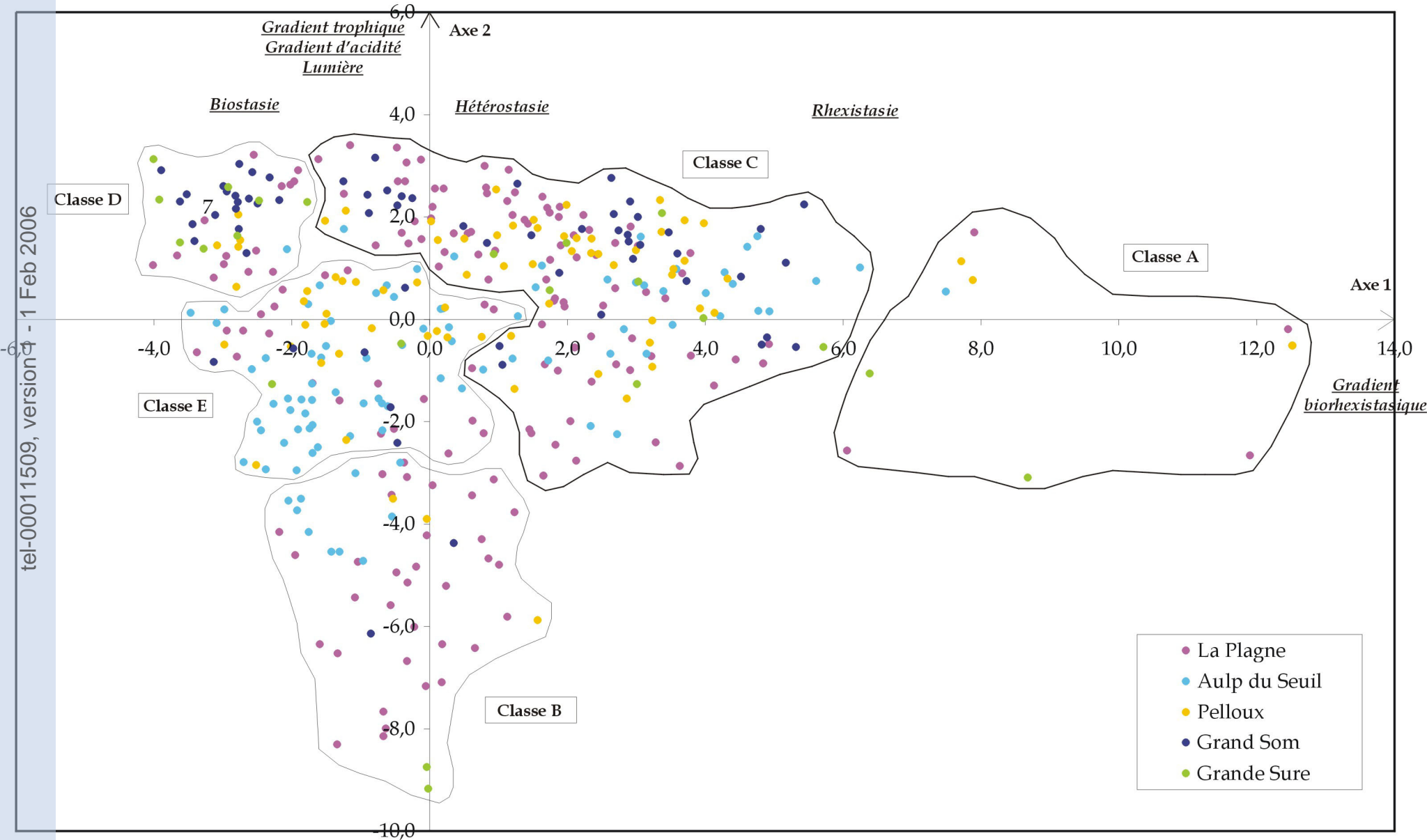


Figure 48 : Orientation des variables et position des modalités sur les axes factoriels 1/2. Sur chaque graphique, les modalités sont reliées par un trait dans l'ordre de leur numéro (sens de la flèche).

Figure 49 : Position des cinq classes de la CAH sur le plan 1-2 de l'AFC



1.3.2.4. L'agencement des relevés sur les plans de l'AFC

Dans l'optique de faciliter la lecture des plans de l'AFC et de synthétiser l'information, les 411 relevés ont été regroupés dans les classes de la CAH (Figure 49). D'autre part, un code couleur permet de les identifier en fonction de l'éco-complexe d'appartenance.

1.3.2.5. L'interprétation des axes

L'objectif de l'AFC est de dégager les principaux gradients représentés sur chacun des axes (Figures 50, 51 et 52). Les axes symbolisent des variables de synthèse qui résument un ensemble de variables. L'analyse des contributions des variables, de la position des modalités et de la position des relevés conduit à l'interprétation suivante :

● **l'axe 1** illustre le gradient biorhexistasique. Il représente le passage d'un milieu rhexistasique (en positif) à un milieu biostasique (en négatif). Cette transition s'effectue par l'intermédiaire d'une zone hétérostatique (au centre). Les herbacées sont fortement représentées.

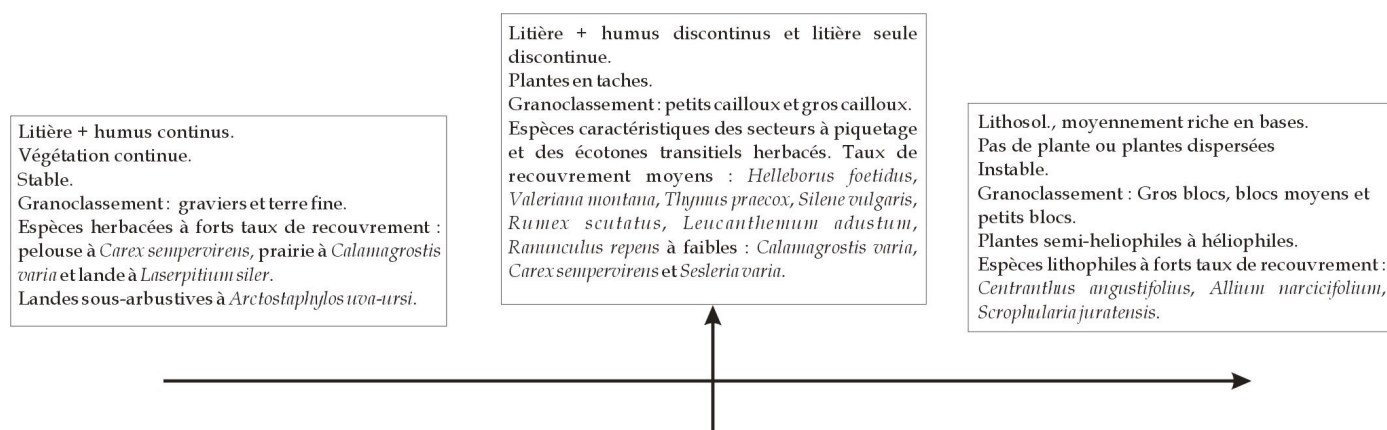


Figure 50 : Organisation simplifiée des modalités sur l'axe 1

● **l'axe 2** est révélateur du caractère indicateur des espèces (Figure 51). Il discrimine les relevés en fonction du niveau trophique, de l'acidité des sols et de la lumière. Il traduit le passage entre les formations forestières ou de lisière forestière qui se développent sur sols mésotrophes, moyennement riches en éléments nutritifs et modérément acides et les formations arbustives et sous arbustives d'éboulis, semi-héliophiles, installées sur sols maigres, peu acides à moyennement riches en bases. C'est un axe où les ligneux sont fortement représentés.

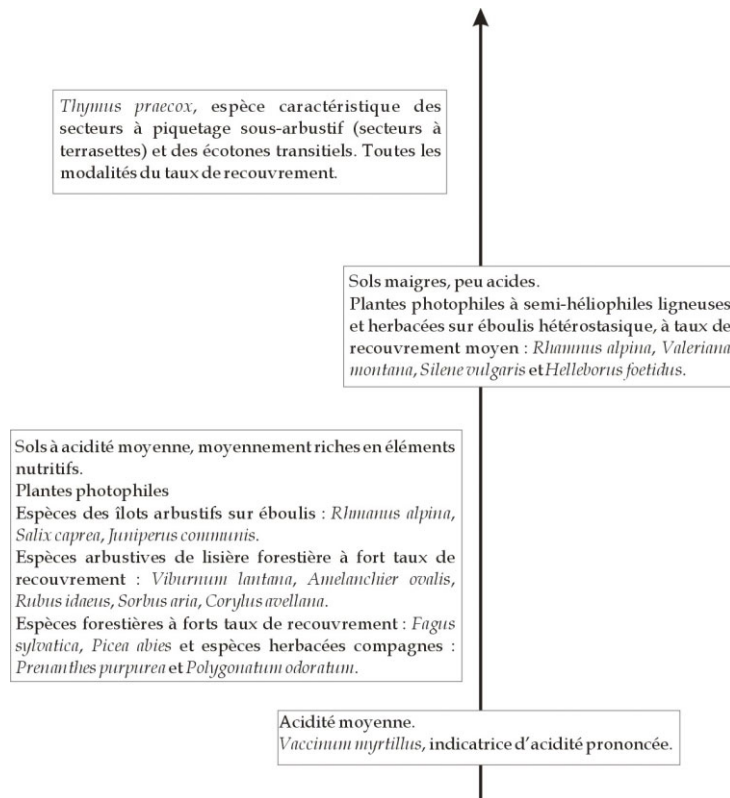


Figure 51 : Organisation simplifiée des modalités sur l'axe 2

La figure 52 résume la répartition des modalités des variables qui contribuent le plus à la direction des axes ainsi que les gradients environnementaux structurants.

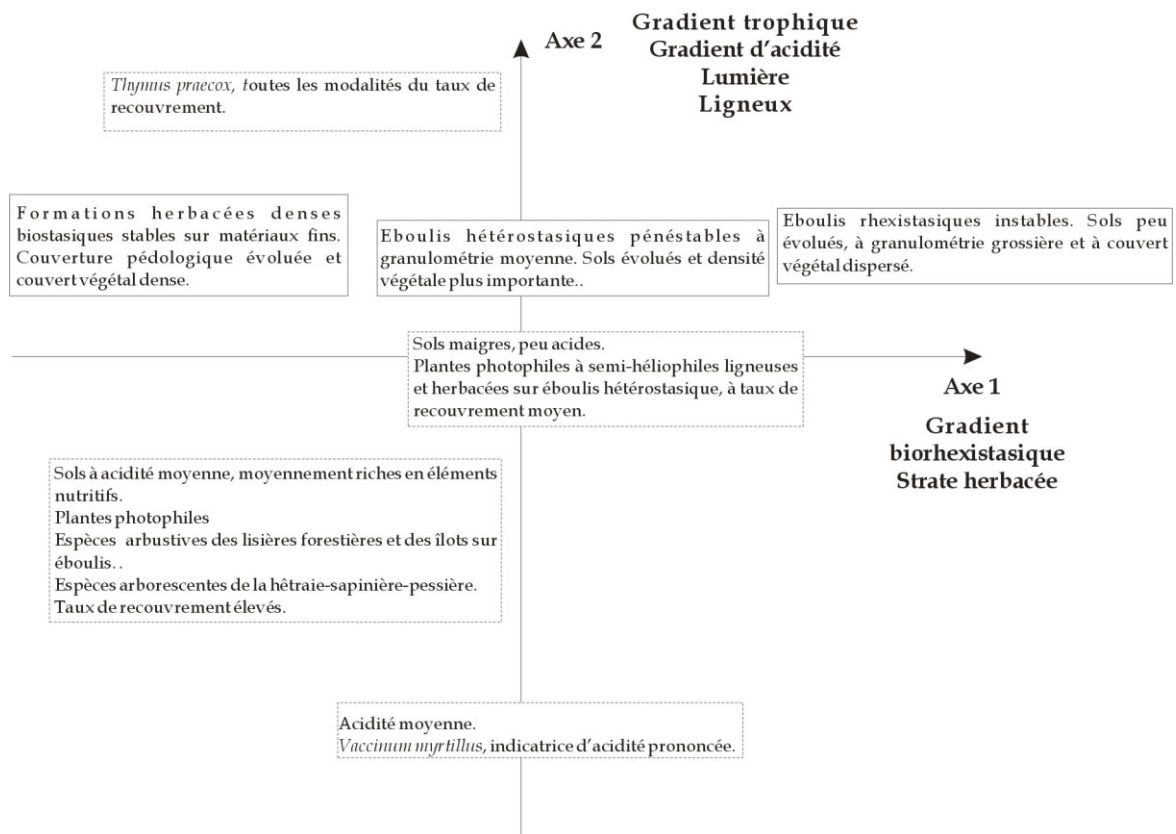


Figure 52 : Organisation simplifiée des modalités sur les axes 1 et 2

L'absence d'une typologie qui permet de différencier réellement les écosystèmes entre eux est confirmée par l'analyse multivariée. Ils ne sont pas fondamentalement différents. Si il est vrai que les mosaïques biorhexistatiques d'éboulis constituent des milieux hétérogènes par rapport aux écosystèmes environnants, elles sont intrinsèquement homogènes entre elles. A l'échelle paysagère, une typologie structurelle et d'évolution différentielle a été mise en évidence. A l'échelle stationnelle, d'un point de vue fonctionnel et phyto-écologique, peu de critères nous permettent de dresser une typologie autre que celle légèrement mise en évidence par les types biologiques de Raunkier et la valeur indicatrice d'humidité de Landolt. Dans l'optique de spatialiser nos résultats et de caractériser la composition floristique des unités biorhexistatiques, nous proposons une typologie basée sur l'évolution végétale différentielle des mosaïques, qui intègre le degré d'anthropisation ainsi que les modalités de la dynamique ligneuse et herbacée. Il s'agit de la seule typologie qui se dégage réellement. Celle-ci oppose les écosystèmes de la Grande Sure et du Grand Som à ceux de La Plagne, des Pelloux et de l'Aulp du Seuil. A l'intérieur de cette typologie et grâce à l'utilisation d'une sémiologie cartographique appropriée, les écosystèmes seront différenciés ou regroupés, en fonction de l'état hydrique du milieu (valeur indicatrice d'humidité) et de la diversité des phytomorphosystèmes et des écotones biorhexistatiques rencontrés.

Mais auparavant, nous allons nous intéresser à la flore des mosaïques biorhexistatiques, dans l'optique de préciser les enjeux de l'évolution végétale en cours et ses conséquences possibles sur l'évolution paysagère et par extension sur la phytodiversité. D'autre part, cette évaluation nous permettra peut être d'affiner la typologie initiale.

1.4. Evaluation de la phytodiversité des mosaïques biorhexistatiques : diversité et richesse spécifiques

Dans le contexte environnemental actuel ce ne sont pas uniquement la diversité et la richesse spécifiques qui sont importantes, dans le cadre de notre étude, mais surtout le type d'habitat considéré. Ainsi, les talus d'éboulis cartusiens couvrent actuellement de faibles surfaces et abritent une richesse spécifique **extraordinaire**. Si l'évolution végétale se poursuit elle pourrait constituer une menace pour la conservation des habitats et entraîner une diminution de la phytodiversité (richesse et diversité spécifique), au profit d'espèces voisines plus compétitives, à large amplitude autécologie et banales.

L'objectif de ce paragraphe est donc de faire le point sur deux aspects de la phytodiversité actuelle des mosaïques biorhexistatiques d'éboulis : **la diversité et la richesse spécifiques**.

1.4.1. La diversité spécifique des mosaïques biorhexistatiques d'éboulis

1.4.1.1. Diversité alpha (α) et régularité : indice de Shannon-Weaver (H) et indice de Pielou (R)

L'indice de diversité de Shannon-Weaver a été utilisé pour déterminer la diversité spécifique α des cinq mosaïques biorhexistatiques, à trois niveaux d'organisation : l'écosystème, la station et la parcelle. A l'échelle de l'écosystème, les calculs portent sur les collections complètes d'espèces. A l'échelle de la station, deux types ont été retenus :

- la station « éboulis *ss* » : les calculs portent uniquement sur les collections d'espèces d'éboulis *sensu stricto*;
- la station « formations périphériques » : ce type regroupe les collections d'espèces appartenant aux formations périphériques toutes catégories confondues (pelouse, prairie, forêt et lande).

Enfin, à l'échelle de la parcelle, seules les collections d'espèces recensées au sein des écotones ont été retenues. Les détails des calculs sont présentés dans l'annexe O (1 et 2)⁶². Les tableaux résumant les valeurs de S , H et R (Annexe O, 1) permettent de déterminer, lors des variations de l'indice de diversité, ce qui revient à l'augmentation du nombre d'espèces et à la « régularisation » de leurs proportions.

A. Diversité α et régularité mesurées à l'échelle des écosystèmes

Les valeurs des indices de Shannon-Weaver sont très élevées, ce qui traduit bien la complexité des communautés des mosaïques biorhexistatiques (Figure 53). Ces valeurs dépendent de la richesse spécifique S (ici 126 espèces) et de la répartition des effectifs entre les diverses espèces (Annexe O). Pour rappel, des valeurs supérieures à 4,5 ou 5 bits sont exceptionnelles et sont mesurées dans les échantillons de grande taille des communautés complexes (MARGALEF, 1972 *in* GOSSELIN et LAROUSSINIE, 2004; FRONTIER et PICHOD-VIALE, 1998; FAURIE *et al.*, 2003). D'autre part, la régularité est forte, toujours supérieure à 0,80, ce qui est généralement considéré comme l'indice de communautés équilibrées.

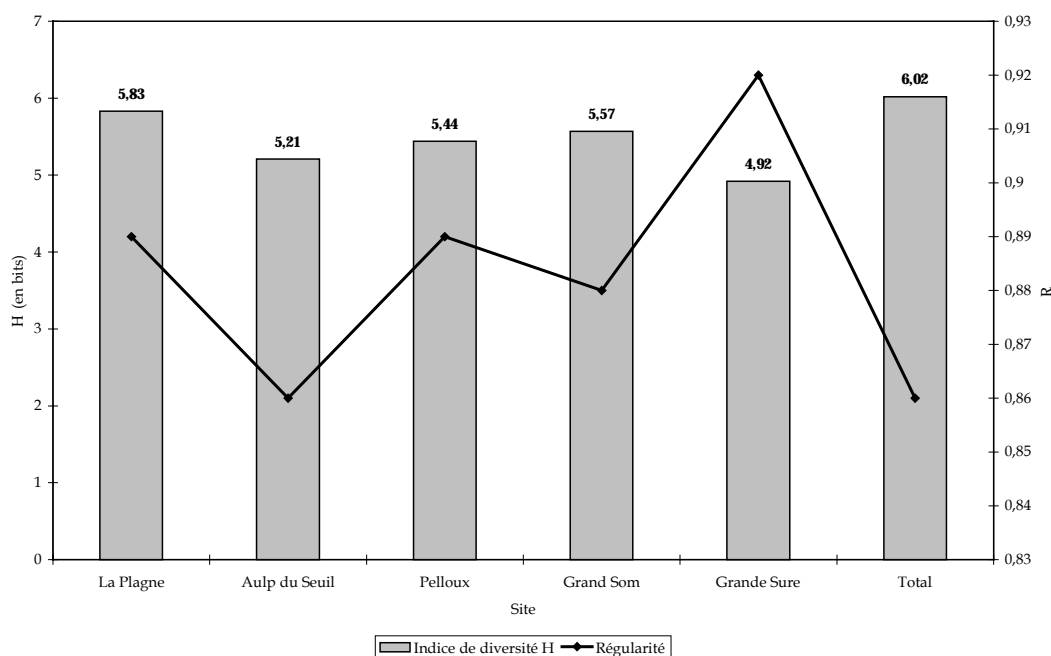


Figure 53 : Variations de l'indice de diversité et de la régularité à l'échelle des écosystèmes

Les écosystèmes de La Plagne et du Grand Som ont les indices de diversité spécifique les plus élevés. Cela correspond à la réalité de terrain où, objectivement, les communautés semblaient être plus complexes que celles des autres écosystèmes. L'écosystème de la Grande Sure enregistre la plus forte régularité. Cela signifie simplement que la répartition des abondances entre les espèces est plus équilibrée. Dans le cas de l'Aulp du Seuil (régularité la plus faible), une ou quelques espèces sont alors nettement dominantes.

Ces résultats confirment les conclusions émises lors de l'analyse des diagrammes rangs-fréquences (1.2.1.2 de ce chapitre). Toutefois, nous considérons que ces valeurs ne sont pas surprenantes car nous avons volontairement mélangé les communautés (éboulis *ss*, formations périphériques).

⁶² Seuls les calculs de La Plagne ont été détaillés en utilisant les deux formules proposées par DAGET (1976) (logarithme vulgaire et logarithme en base 2). Se reporter au paragraphe II, 2.1.3.1, A, a du Chapitre 5 pour plus de détails.

B. Diversité α et régularité mesurées à l'échelle des stations « formations périphériques »

Les valeurs des indices de diversité et de régularité sont légèrement plus faibles que les précédentes mais demeurent élevées par rapport à la « normale »⁶³ (Figure 54). Les communautés de pelouse et de prairie sont plus complexes que celles des forêts ou des landes.

En général, la richesse spécifique est plus élevée, les effectifs nombreux et relativement bien équilibrés, malgré la présence des espèces rares. Cela explique les valeurs observées pour les écosystèmes de La Plagne et du Grand Som où ces deux formations périphériques sont présentes et surtout dominantes (pelouse à *Carex sempervirens* et prairie à *Calamagrostis varia*). D'autre part, la lande et la forêt sont aussi bien représentées (Annexe O). Le cas de l'écosystème des Pelloux est sensiblement similaire.

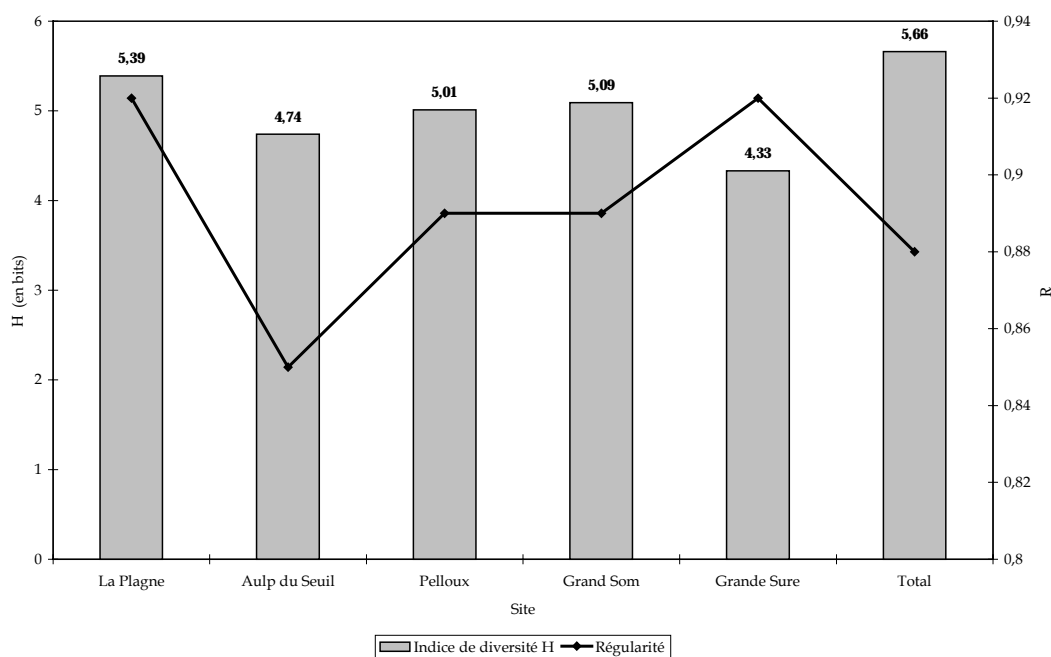


Figure 54 : Variations de l'indice de diversité et de la régularité à l'échelle des stations « formations périphériques »

L'Aulp du Seuil est caractérisé par la présence d'une lande sous-arbustive et herbacée à *Arctostaphylos uva-ursi* et *Laserpitium siler*. Les peuplements sont très denses ce qui limite la concurrence des autres espèces (la richesse spécifique est moins élevée). Par conséquent, lorsque plusieurs espèces sont largement dominantes sur les autres cela tend à faire chuter l'indice de diversité. De plus, lorsqu'il y a de grandes différences dans les valeurs d'abondances entre les espèces, la régularité diminue.

C. Diversité α et régularité mesurées à l'échelle des stations « éboulis ss »

Les communautés d'éboulis ss sont plus homogènes, la richesse spécifique moins élevée (1,4,2) et la répartition des effectifs entre les différentes espèces moins équilibrée par conséquent, les indices de diversité sont plus faibles (Figure 55). La diversité varie entre des limites étroites, de 3,12 à 3,63 mais la régularité est toujours aussi forte malgré les disparités ($> 0,80$). En terme de diversité spécifique, le classement des écosystèmes est identique aux précédents. Les écosystèmes de La Plagne et du Grand Som présentent des indices de diversité élevés et une plus grande régularité dans la répartition des valeurs d'abondances entre les espèces.

⁶³ (MARGALEF, 1972 in GOSSELIN et LAROUSSINIE, 2004; FRONTIER et PICHOD-VIALE, 1998; FAURIE *et al.*, 2003).

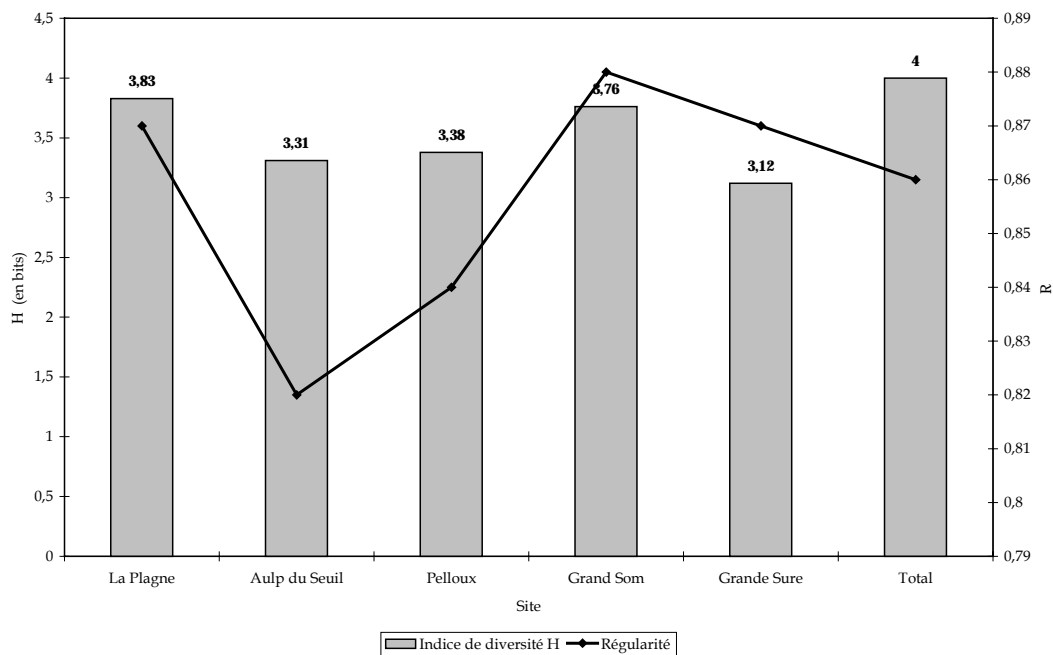


Figure 55 : Variations de l'indice de diversité et de la régularité à l'échelle des stations « éboulis ss »

Ces valeurs, plutôt normales, suggèrent simplement que la diversité spécifique des communautés d'éboulis ss n'est pas exceptionnelle et que la richesse spécifique n'est pas extrêmement élevée. Nous reviendrons sur cet aspect dans le paragraphe consacré à la richesse spécifique (1.4.2. de ce chapitre).

D. Diversité α et régularité mesurées à l'échelle des parcelles écotones

Logiquement, les valeurs des indices de diversité ont augmenté (Figure 56).

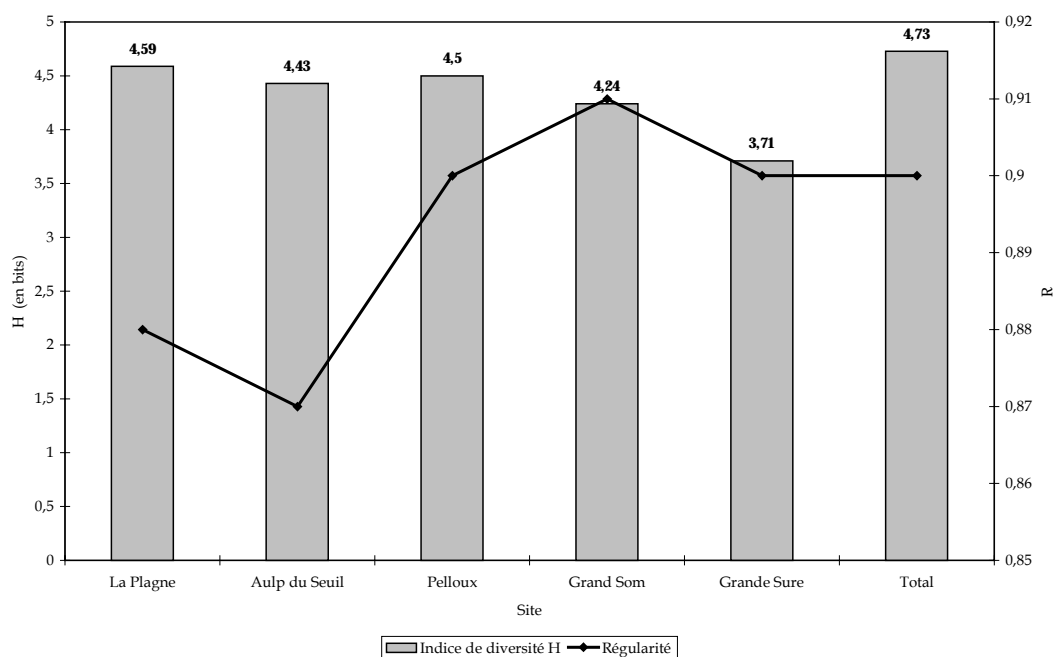


Figure 56 : Variations de l'indice de diversité et de la régularité à l'échelle des parcelles écotones

Les communautés des parcelles d'écotones sont plus hétérogènes, la richesse spécifique élevée et les effectifs plus nombreux. D'un point de vue général, la régularité est toujours aussi élevée mais les valeurs de certains éco-complexes révèlent un déséquilibre marqué au sein des communautés (La Plagne et l'Aulp du Seuil). Cela signifie d'une part, que quelques espèces sont nettement dominantes au sein de ces écotones et, d'autre part, qu'il y a plus de différences dans les valeurs d'abondance entre les espèces. C'est le cas par exemple des écotones caractérisés par la présence d'espèces à large amplitude écologique comme par exemple *Valeriana montana*, *Calamagrostis varia* et *Galium anisophyllum* pour l'éco-complexe de La Plagne ou *Arctostaphylos uva-ursi*, *Laserpitium siler* et *Valeriana montana* pour l'Aulp du Seuil.

Finalement et logiquement, les valeurs des indices de diversité spécifique des mosaïques biorhexistatiques varient en fonction :

- du niveau d'organisation : la diversité spécifique est plus élevée à l'échelle des éco-complexes qu'à l'échelle de la parcelle;
- de l'homogénéité ou de l'hétérogénéité des communautés : le mélange des communautés tend à faire augmenter l'indice de Shannon-Weaver;
- de la richesse spécifique S ;
- de la répartition des effectifs entre les différentes espèces (régularité).

Comme nous avons pu le constater, indépendamment du niveau d'organisation ou de la mosaïque biorhexistatique considérée, les valeurs des indices de diversité et la régularité sont en général élevées. Les mosaïques biorhexistatiques où la diversité spécifique est la plus importante, quelque soit le niveau d'observation, sont celles de La Plagne et du Grand Som (à l'exception des parcelles d'écotones pour ce dernier). Certes, on pourrait invoquer l'effort d'échantillonnage pour La Plagne mais certainement pas pour le Grand Som, l'Aulp du Seuil ou les Pelloux (Annexe O, 1). Comme nous l'avons souligné précédemment (Chapitre 5), l'effort d'échantillonnage correspond à la réalité de terrain. Ainsi, les mosaïques biorhexistatiques supposées être plus complexes et hétérogènes⁶⁴ ont fait l'objet de relevés plus nombreux (Annexe O, 1). Cependant, nos résultats montrent que les différences observées dans l'effort d'échantillonnage n'ont pas forcément une incidence sur l'indice de diversité. Un effort d'échantillonnage plus élevé pour certaines mosaïques biorhexistatiques, telles que celles des Pelloux ou de la Grande Sure n'aurait rien changé.

Le calcul de l'indice de Shannon-Weaver permet de mesurer la diversité α de chacune des mosaïques biorhexistatiques, à trois niveaux d'organisation. Pour comparer des sites entre eux et quantifier l'importance de la variation de composition en espèces ou étudier leurs similarités, nous calculons la diversité β .

1.4.1.2. Diversité bêta (β) et similarité : indice de diversité de Hill d'ordre 1 ($D_{Hi, 1}$) et indice de Dice (D_{ij})

C'est à l'échelle des stations « formations périphériques » que les différences entre les compositions floristiques des mosaïques biorhexistatiques sont les plus marquées (Figure 57, annexe O, 3).

La diversité β est élevée dans l'ensemble mais son amplitude est forte (2,47). L'indice varie entre 1,31 (La Plagne) et 3,78 (Grande Sure).

⁶⁴ Au niveau de leur composition végétale et secondairement, ici, au sens de l'écologie du paysage.

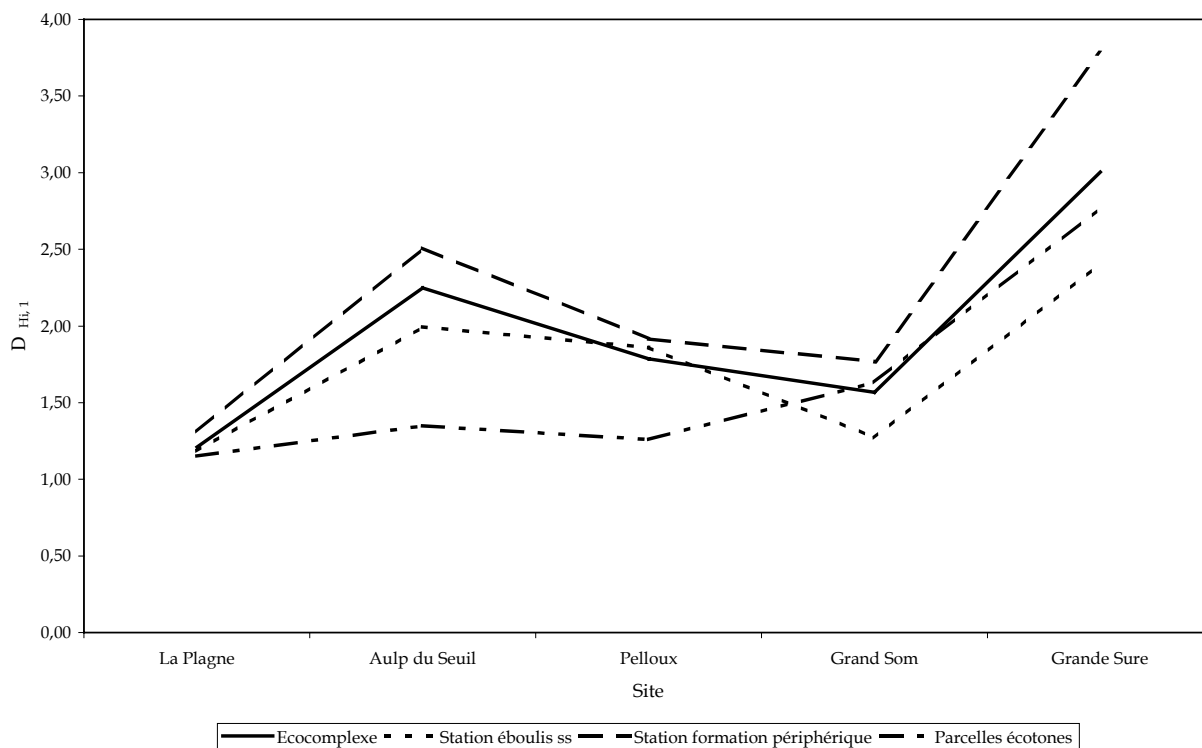


Figure 57 : Variation de l'indice de diversité de Hill d'ordre 1

Cependant, ce sont les mosaïques biorhexistatiques de La Plagne et du Grand Som qui se ressemblent le plus. Cet aspect est confirmé par les valeurs de l'indice de Dice (Tableau 55, annexe O, 4).

Tableau 55 : Matrice de similarité (Stations « formations périphériques »)

Indice de Dice D_{ij}	La Plagne	Aulp du Seuil	Pelloux	Grand Som	Grande Sure
La Plagne	1				
Aulp du Seuil	0,7	1			
Pelloux	0,62	0,69	1		
Grand Som	0,79	0,55	0,48	1	
Grande Sure	0,52	0,48	0,35	0,6	1

Elles sont caractérisées par la présence des communautés de pelouse, prairie, lande et forêt. Les deux premières sont dominantes et la richesse spécifique plus élevée (Annexe O, 1), ce qui explique que les variations de l'indice de Hill soient moins prononcées entre ces deux sites. La mosaïque des Pelloux constitue un cas intermédiaire. L'Aulp du Seuil se distingue par sa lande à *Arctostaphylos uva-ursi* et *Laserpitium siler* et la Grande Sure par la pauvreté de ses formations périphériques (pelouse essentiellement) et sa richesse spécifique réduite (Annexe O, 1). Les indices de Hill traduisent parfaitement le phénomène.

A l'échelle des éco-complexes, les résultats sont sensiblement similaires (Figure 57). La diversité β est moins élevée mais l'amplitude reste forte, 1,79 pour des valeurs d'indice de Hill qui varient entre 1,21 (La Plagne) et 3 (Grande Sure). L'indice de Dice a légèrement augmenté, ce qui confirme la similarité des compositions floristiques des mosaïques biorhexistatiques de La Plagne et du Grand Som (Tableau 56, annexe O, 4c). Celle-ci devrait logiquement apparaître aux niveaux d'observation inférieurs.

Tableau 56 : Matrice de similarité (Ecocomplexes, collections complètes)

D_{ij}	La Plagne	Aulp du Seuil	Pelloux	Grand Som	Grande Sure
La Plagne	1				
Aulp du Seuil	0,69	1			
Pelloux	0,64	0,69	1		
Grand Som	0,8	0,59	0,52	1	
Grande Sure	0,53	0,51	0,39	0,61	1

A l'échelle des stations « éboulis ss », l'amplitude est la plus faible (1,22). L'indice de Hill varie entre 1,19 (La Plagne) et 2,41 (Grande Sure) (Figure 57, annexe O, 3). Les variations de composition floristique sont moins marquées et trois groupes se distinguent nettement : La Plagne/Grand Som, Aulp du Seuil/Pelloux et la Grande Sure (Figure 57). L'indice de Dice souligne la similarité des mosaïques au sein des deux premiers binômes et isole l'éco-complexe de la Grande Sure (Tableau 57, annexe O, 4c).

Tableau 57 : Matrice de similarité (Stations « éboulis ss »)

D_{ij}	La Plagne	Aulp du Seuil	Pelloux	Grand Som	Grande Sure
La Plagne	1				
Aulp du Seuil	0,78	1			
Pelloux	0,75	0,83	1		
Grand Som	0,88	0,75	0,76	1	
Grande Sure	0,58	0,44	0,46	0,62	1

A l'échelle des parcelles d'écotones, les variations de composition floristique sont les moins marquées surtout entre les mosaïques de La Plagne, de l'Aulp du Seuil, des Pelloux et secondairement du Grand Som (Figure 57). Leur diversité β est moins élevée mais la similarité de la composition floristique de leurs écotones est très importante (Tableau 58, annexe O, 4c).

Tableau 58 : Matrice de similarité (Parcelles écotones)

D_{ij}	La Plagne	Aulp du Seuil	Pelloux	Grand Som	Grande Sure
La Plagne	1				
Aulp du Seuil	0,9	1			
Pelloux	0,86	0,82	1		
Grand Som	0,83	0,73	0,73	1	
Grande Sure	0,62	0,59	0,56	0,74	1

De plus, cette similarité est très prononcée entre La Plagne et les trois autres mosaïques, ce qui signifie que la composition floristique des parcelles d'écotones de La Plagne constitue un échantillon représentatif à l'échelle des quatre sites (Tableau 58, annexe O, 4c).

Finalement, des variations de composition floristique notables sont décelables entre les différentes mosaïques biorhexistasiques, en fonction du niveau d'organisation observé (variation « inter-mosaïques »). Ce sont les compositions floristiques des mosaïques biorhexistasiques de La Plagne et du Grand Som qui se ressemblent le plus, à chaque niveau d'organisation. Cependant, à l'échelle des stations « éboulis ss » et des parcelles d'écotones, les indices révèlent l'existence de trois groupes distincts : La Plagne/Grand Som, Aulp du Seuil/Pelloux et la Grande Sure (Figure 57, tableaux 57 et 58). Par pur hasard, nous retrouvons ici d'une part, le découpage latitudinal du

massif de la Chartreuse (Carte 5) et, d'autre part, le regroupement des mosaïques biorhexistatiques en fonction de l'exposition dominante⁶⁵.

La figure 57 révèle aussi une variation de composition floristique « intra-mosaïque » mais elle n'offre pas d'intérêt particulier. Les valeurs des indices soulignent simplement la plus ou moins grande similarité de la composition floristique entre les niveaux d'organisation de chaque mosaïque biorhexistatique avec celle des mêmes niveaux d'organisation à l'échelle du massif. Au sein d'une mosaïque biorhexistatique, plus l'indice de Hill est faible plus la composition floristique du niveau d'organisation considéré est proche de celle du même niveau d'organisation, à l'échelle du massif. C'est normal car la diversité β s'exprime par le rapport entre la diversité γ et la diversité α (Annexe O, 3 a, b et c). Dans notre cas, une étude de la diversité spécifique α intra-mosaïque est plus intéressante (1.4.1.1).

1.4.2. La richesse des mosaïques biorhexistatiques d'éboulis

Rappelons que 411 placettes de 2 m² ont été réalisées sur l'ensemble des cinq écocomplexes. Ces placettes appartiennent à des transects réalisés au contact de quatre grands types physiologiques : la forêt, la lande, la pelouse et la prairie. Sur l'ensemble des relevés, nous avons répertorié 126 espèces végétales vasculaires sur une surface échantillonnée de 844 m² (Annexe G). Malgré l'abondante bibliographie relative au massif de la Chartreuse, la distribution de nombreuses espèces y est mal connue et contrairement à une idée répandue, la plus grande partie de la Chartreuse n'a jamais été prospectée dans le détail par des botanistes. En 1999, environ 1860 taxons étaient répertoriés en Chartreuse dont 820 taxons dans la Réserve Naturelle des Hauts (Philippe DRUART⁶⁶, comm. Pers., 2002). La richesse spécifique des cinq mosaïques biorhexistatiques représente à peine le 1/6^{ème} de cette valeur. De plus, elle comptabilise les espèces d'éboulis mais aussi certains taxons appartenant aux formations périphériques. Par conséquent, si nous devons comptabiliser uniquement les espèces d'éboulis *sensu stricto*, la richesse spécifique serait portée à 24 (21 herbacées et 3 ligneuses, Annexe O). La bibliographie consacrée à la flore des éboulis est rare, nous ne disposons guère de points de comparaison dans les Alpes. Citons tout au plus l'étude menée par RICHARD et PAUTOU (1982) et consacrée aux groupements spécialisés d'éboulis calciques de haute altitude. Dans cette étude, les espèces calciques et les espèces compagnes⁶⁷ ont fait l'objet de 10 relevés situés à une altitude moyenne de 2072 m (altitudes extrêmes 1700-2450 m) et les éboulis calciques suintants, 7 relevés à une altitude moyenne de 2054 m (altitudes extrêmes 1770-2100 m). Les auteurs dénombrent 33 espèces (31 herbacées et 2 ligneuses). Nous ne connaissons pas la surface échantillonnée mais la différence n'est pas très importante d'autant que notre amplitude altitudinale s'échelonne de 1500 à 1800 m.

Nous allons comparer les écocomplexes en termes de richesse locale et globale. Les calculs sont réalisés sur la totalité des 411 relevés. L'originalité et la rareté sont abordées dans le paragraphe 1.4.3. Les résultats sont présentés dans l'annexe P.

1.4.2.1. La richesse locale

Les nombres moyens d'espèces par placette de 2m² sont sensiblement similaires. L'écocomplexe du Grand Som est le plus riche avec en moyenne 10 espèces/2m². Viennent ensuite La Plagne, les Pelloux et la Grande Sure avec 8 espèces/2m² de relevés. L'Aulp du Seuil est le moins riche avec en moyenne 7 espèces/2m².

⁶⁵ Pour rappel, les mosaïques de La Plagne et du Grand Som présentent une exposition à dominante sud, celles des Pelloux et de l'Aulp du Seuil, est et celle de la Grande Sure, ouest.

⁶⁶ Laboratoire de Phanérogamie de l'Université de Neuchâtel (Suisse), spécialiste de la flore cartusienne.

⁶⁷ Que nous ne comptabiliserons pas ici car ce ne sont pas des espèces d'éboulis *ss*. Même remarque pour les espèces pionnières.

Même si sa valeur n'est pas très élevée, la richesse locale du Grand Som pourrait s'expliquer par le rôle des Pères Chartreux dans le maintien de la biodiversité du massif. Situé à proximité du monastère, il constituait un petit laboratoire de biodiversité entretenu par les Chartreux. De nombreuses espèces servaient notamment à la confection de la fameuse liqueur. La Vulnéraire des Chartreux (*Hypericum nummularium*) en est un exemple. Quoiqu'il en soit, ces valeurs ne font que confirmer l'homogénéité intrinsèque des mosaïques biorhexistatiques d'éboulis.

1.4.2.2. La richesse globale

L'analyse de la totalité des espèces rencontrées dans chaque écosystème, montre que la richesse globale est plus importante à La Plagne et au Grand Som qui totalisent respectivement 89 et 77 espèces (Figure 58). Nous pensons que cette différence s'explique d'une part, par la diversité des formes phyto-morphologiques rencontrées et, d'autre part, par une présence plus importante des écotones transitiels herbacés et sous-arbustifs. Certains pourraient invoquer la pression d'échantillonnage et effectivement cette remarque serait pertinente. Cependant, si la Plagne totalise le plus grand nombre de relevés (159), le Grand Som (62) n'arrive qu'en quatrième position après l'Aulp du Seuil (92) et les Pelloux (76).

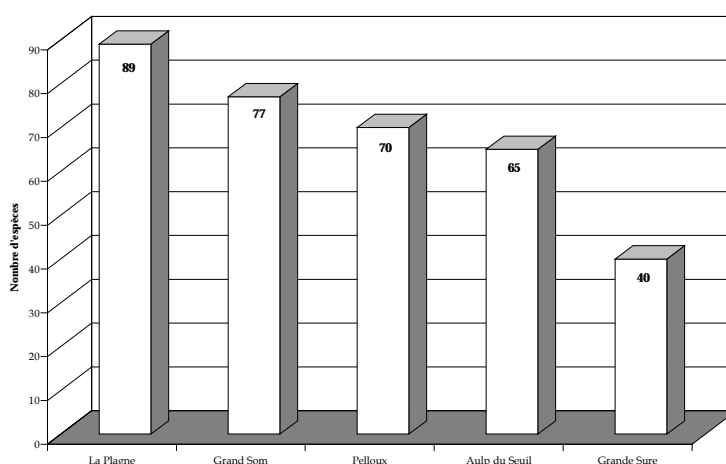


Figure 58 : Comparaison de la richesse globale des cinq mosaïques biorhexistatiques

D'autre part, dans une étude consacrée à l'évaluation de la richesse globale des milieux de bois, friches et prairies de fauche, VANPEENE-BRUHIER (1998) a montré, en ramenant la valeur à une richesse globale théorique de 100 relevés pour les 6 sites étudiés, qu'il y avait très peu d'écarts dans l'ensemble et que le classement initial était conservé.

1.4.3. Prise en compte de l'originalité et de la rareté des espèces

1.4.3.1. La richesse originale

Le fond commun d'espèces est constitué par 16 espèces sur les 126 répertoriées au total, 27 sont présentes dans quatre écosystèmes, 21 dans trois écosystèmes, 29 dans deux écosystèmes et 32 dans un seul écosystème.

Si nous analysons ces résultats en terme d'originalité de la végétation de chacun des écosystèmes, les Pelloux possède 9 espèces originales (Px), c'est-à-dire qui ne sont présentes que sur cet écosystème, l'Aulp du Seuil (As) 8 espèces, le Grand Som (Gso) 7 espèces, La Plagne (Lp) 5 espèces et la Grande Sure (Gs) 3 espèces (Figure 59).

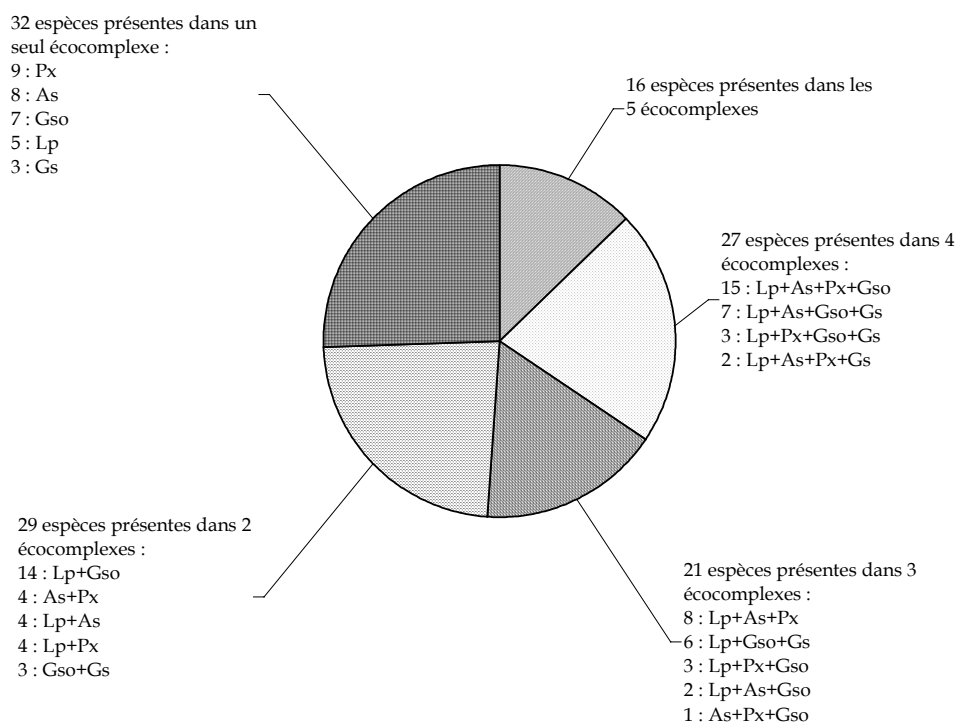


Figure 59 : Originalité de la flore des cinq écocomplexes

Cette analyse révèle la variété des milieux étudiés car seules 13% des espèces sont présentes sur les cinq éco-complexes et 25% des espèces sont localisées dans un seul site d'étude.

L'éco-complexe des Pelloux présente la plus grande originalité mais les écarts sont relativement faibles. D'autre part, si l'on considère les espèces qui traduisent cette originalité sur l'ensemble des éco-complexes, la majorité appartient aux formations périphériques biostatiques (Tableau 59). L'originalité des talus d'éboulis ss est portée à quatre espèces dont deux se situent à la Grande Sure (En gras, tableau 59).

Tableau 59 : Espèces originales par éco-complexe

Éco-complexe	Espèce originale
Les Pelloux	<i>Aconitum vulparia</i> , <i>Briza media</i> , <i>Bromus erectus</i> , <i>Carex flacca</i> , <i>Hieracium umbellatum</i> , <i>Hieracium vulgatum</i> , <i>Ribes alpinum</i> , <i>Saxifraga rotundifolia</i> , <i>Vicia cracca</i> .
Aulp du Seuil	<i>Cephalanthera longifolia</i> , <i>Daphne mezereum</i> , <i>Knautia arvensis</i> , <i>Lamium galeobdolon</i> , <i>Lamium purpureum</i> , <i>Lonicera xylosteum</i> , <i>Polygala chamaebuxus</i> , <i>Salix appendiculata</i> .
Grand Som	<i>Epilobium montanum</i> , <i>Hieracium pilosella</i> , <i>Phleum pratense</i> , <i>Phyteuma betonocifolium</i> , <i>Rumex acetosa</i> , <i>Stachys alopecuros</i> , <i>Thalictrum minus</i> .
La Plagne	<i>Convallaria majalis</i> , <i>Coronilla vaginalis</i> , <i>Gymnocarpium dryopteris</i> , <i>Polygonatum odoratum</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i> .
Grande Sure	<i>Allium narcissiflorum</i> , <i>Geranium sylvaticum</i> , <i>Salix retusa</i> .

1.4.3.2. Prise en compte de la rareté des espèces

Nous avons déterminé deux types de rareté, la rareté « absolue » qui concerne les espèces rares ou endémiques, protégées et/ou menacées et la rareté « relative » qui indique la plus ou moins grande présence des espèces répertoriées sur nos différents écosystèmes. Pour cette étude, nous avons quelque peu adapté la formule proposée par GEHU et GEHU (1981).

Ainsi, le coefficient de rareté Rsp (modifié) d'une espèce est donné par l'expression :

$$R_{sp} = \frac{\text{Nombre total de relevés} - \text{nombre de fois où l'espèce est présente}}{\text{Nombre total de relevés}}$$

Plus le coefficient est élevé, plus l'espèce est rare. Nous avons calculé ce coefficient pour les 126 espèces et établi une classification des taxons en fonction de leur rareté absolue ou relative (Annexe P).

A. La rareté « absolue »

Pour cette étude, nous nous sommes basé sur quelques ouvrages (FITTER *et al.*, 1993 ; AICHELE, 1975 ; RAMEAU *et al.*, 1993) mais surtout sur le Livre Rouge (1995)⁶⁸ et l'article de DRUART (1999) consacré à l'inventaire de la flore de Chartreuse. Le Livre Rouge nous propose par ailleurs une définition de la rareté : « *De part ces activités, l'homme agit sélectivement, depuis plusieurs millénaires sur le milieu naturel, entraînant la disparition de certains habitats, réduisant de manière significative les effectifs, fragmentant ou isolant des ensembles de population autrefois plus amples et certainement diversifiés (...) mais la rareté peut avoir d'autres causes, indépendamment de cette intervention humaine. Beaucoup d'espèces endémiques sont dans ce cas là. Souvent, l'espèce est rare car les habitats qui lui sont favorables sont eux-mêmes rares et ont toujours été rares (habitats rupestres, éboulis, zones humides...)* ».

Sur l'ensemble des écosystèmes, 14 taxons sont concernés (Livre Rouge, 1995 ; DRUART, 1999).

- Taxons à surveiller : *Anthyllis vulneraria*, *Helianthemum nummularium*, *Linaria alpina* et *Pulsatilla alpina*.

- Taxons rares entièrement protégés : *Cephalanthera longifolia*, *Epipactis atrorubens*, *Gentiana lutea*, *Gentiana verna* et *Pulsatilla alpina*

En Isère, quatre espèces sont entièrement protégées par arrêté préfectoral : *Convallaria majalis*, *Daphne mezereum*, *Hypericum nummularium* et *Dianthus monspessulanus* (DRUART, 1999).

- Taxons en général assez rares mais non protégés : *Prenanthes purpurea* et *Sedum album*.

A titre de comparaison, *Valeriana montana* (espèce commune) a été répertoriée dans 270 relevés pour un coefficient de 0,34 et *Senecio doronicum*, dans 53 relevés pour un coefficient de 0,86 (Annexe P). Les espèces classées comme rares et protégées présentent des coefficients élevés : *Daphne mezereum* (1, **1⁶⁹**), *Cephalanthera longifolia* (2, **0,99**), *Hypericum nummularium* (8, **0,98**), *Dianthus monspessulanus* (7, **0,98**), *Convallaria majalis* (10, **0,97**), *Prenanthes purpurea* (11, **0,97**), *Pulsatilla alpina* (13, **0,96**), *Sedum album* (16, **0,96**), *Epipactis atrorubens* (24, **0,94**) et *Gentiana lutea* (37, **0,9**). Cette classification a été réalisée à l'échelle de la France ou de l'Isère et certaines espèces considérées comme rares, sont en réalité assez communes en Chartreuse.

⁶⁸ Flore menacée de France, espèces prioritaires. Le Livre Rouge répertorie les taxons subendémiques rares et/ou menacés en France, les taxons rares et entièrement menacés, les taxons partiellement protégés ainsi que ceux qui sont en danger.

⁶⁹ Le premier chiffre indique le nombre de relevés et le deuxième, en gras, le coefficient de rareté.

C'est le cas par exemple de *Prenanthes purpurea* (forêt), *Pulsatilla alpina* (pelouses, prairies et pâturages), *Sedum album* (éboulis), *Epipactis atrorubens* (pelouses sèches) et *Gentiana lutea* (pelouses, prairies et pâturages). Cependant, comme ces espèces bénéficient d'un statut de protection légale à l'échelle nationale ou départementale, nous les intégrons au sein de la rareté absolue.

B. La rareté « relative »

La rareté relative concerne à la fois les taxons considérés comme rares en Chartreuse (DRUART, 1999) mais qui ne font pas l'objet de mesure de protection (à l'exception de *Convallaria majalis*, *Daphne mezereum*, *Hypericum nummularium* et *Dianthus monspessulanus*) et la plus ou moins grande présence des espèces rencontrées dans nos relevés.

BREISTROFFER (1975-1980⁷⁰) cité par DRUART (1999), propose une classification des taxons en fonction d'un degré de rareté : R (rare), RR (très rare) et RRR (extrêmement rare). DRUART (1999) souligne l'originalité de l'espèce en indiquant le nombre de stations où elle a été répertoriée. Nous renvoyons aux auteurs pour le détail des stations. Le tableau 60 présente cette classification pour les 10 espèces considérées comme rares, répertoriées au sein de nos relevés. Lorsque l'un de nos sites d'étude a été cité, nous l'indiquons (ex. Grande Sure). Dans le cas contraire, nous mentionnons le nom du (ou des) écosystème (s) où nous avons répertorié l'espèce.

Tableau 60 : Degrés de rareté « relative » des mosaïques biorhexistatiques d'éboulis

Taxon	Degré de rareté	Écosystèmes ⁷¹	Coefficient de rareté
<i>Allium narcissiflorum</i>	RR, 2 stations.	Grande Sure	6 relevés, 0,98
<i>Anthyllis vulneraria</i>	RRR, 3 stations.	non cités : La Plagne et l'Aulp du Seuil	3 relevés, 0,99
<i>Coronilla vaginalis</i>	RR, 12 stations.	non cité : La Plagne	1 relevé, 1
<i>Gymnocarpium dryopteris</i>	RR, 3 stations.	non cité : La Plagne	26 relevés, 0,93
<i>Lathyrus heterophyllus</i>	RR, 2 stations.	non cité : Grand Som	2 relevés, 0,99
<i>Poa cenisia</i>	R, 10 stations.	non cités : La Plagne, les « Pelloux » et le Grand Som	31 relevés, 0,92
<i>Salix retusa</i>	R, > 25 stations.	Grande Sure	2 relevés, 0,99
<i>Scrophularia juratensis</i>	R > 25 stations.	Grand Som non cités : La Plagne et la Grande Sure	32 relevés, 0,92
<i>Stachys alopecuroides</i>	R > 10 stations.	Grand Som	6 relevés, 0,98
<i>Thalictrum minus</i>	R > 10 stations.	Grand Som	20 relevés, 0,95

Les coefficients sont relativement élevés. Le nombre de relevés permet d'augmenter la résolution de l'analyse. Ainsi, sur l'ensemble de notre terrain d'étude quatre espèces sont très rares à extrêmement rares : *Anthyllis vulneraria*, *Coronilla vaginalis*, *Lathyrus heterophyllus* et *Salix retusa*.

Enfin, un deuxième aspect de la rareté « relative » concerne la présence des espèces au sein de nos relevés. La plupart de ces espèces sont communes mais pour des raisons liées à notre méthode d'échantillonnage, elles enregistrent des coefficients de rareté élevés. C'est notamment le cas des espèces appartenant aux formations périphériques (forêt, pelouse, prairie et lande) qui n'étaient pas au centre de nos préoccupations (Annexe P).

⁷⁰ M. BREISTROFFER s.d (-1980), Flore de Chartreuse. Manuscrit inédit déposé au Muséum d'Histoire Naturelle de Grenoble. (Les dernières citations de la main de BREISTROFFER datent de 1975, deux autres vont jusqu'en 1980).

⁷¹ P. DRUART a validé la reconnaissance des espèces répertoriées dans le cadre de ce travail.

Les mosaïques biorhexistasiques d'éboulis sont caractérisées par la présence d'une richesse spécifique locale et globale originale, intégrant différents degrés de rareté. Les variations observées en termes d'originalité et de richesse spécifique sont directement liées au gradient biorhexistasique. Si l'on compare les écocomplexes, la richesse spécifique et l'originalité de la flore ne sont, certes, pas très élevées, ce qui souligne une fois de plus le caractère intrinsèque homogène des mosaïques. Cependant, l'originalité prend tout son sens lorsque la flore des talus d'éboulis rhexistasiques est comparée à celle des formations périphériques biostasiques. Les valeurs de richesse spécifique et de diversité spécifique ne sont pas extraordinaires, mais l'habitat est original. Il accueille des espèces originales, rares et protégées qui sont susceptibles de disparaître si l'évolution végétale observée, continue à réduire la surface des talus d'éboulis. Comme nous l'avons souligné dans la première partie de ce travail, en Chartreuse, la présence des corniches urgoniennes limite les possibilités de migration des espèces en altitude. Par conséquent, si les habitats se réduisent et si les espèces n'adoptent pas de stratégies de migration particulières ou d'adaptations physiologiques, les conséquences sur la phytodiversité pourraient être considérables. Dans cette dynamique évolutive, le talus d'éboulis de la Plagne mériterait de faire l'objet d'un suivi régulier. Sa colonisation végétale a été très rapide au cours du siècle dernier et si les conditions environnementales actuelles se poursuivent, elles contribueraient à accélérer le processus de fermeture paysagère, déjà bien amorcé.

A ce stade de notre travail, nous sommes en mesure de présenter une autre facette de la phytodiversité des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis, celle de la diversité écosystémique. Le travail de terrain nous a permis de récolter un certain nombre de données que les traitements cartographiques et statistiques nous ont permis d'organiser. La partie qui suit est consacrée à la définition et à la spatialisation des unités phyto-morphologiques biorhexistasiques.

II. Typologie affinée et cartographie actuelle des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis

Comme nous l'avons souligné dans le paragraphe 1.3.2., dans l'optique de synthétiser nos résultats et de caractériser la composition floristique des différentes unités biorhexistasiques, nous proposons une typologie qui intègre à la fois les composantes structurelles et l'évolution végétale des mosaïques développées dans le Chapitre 6 (degré d'anthropisation, modalités de la dynamique ligneuse et herbacée) mais aussi quelques composantes fonctionnelles telles que l'état hydrique du substrat et le caractère indicateur des espèces, vis-à-vis des conditions édaphiques et géodynamiques stationnelles. Concernant ce dernier aspect et comme le souligne SOMSON (1983), la classification des types biologiques de RAUNKIER basée sur la position du bourgeon dormant par rapport à la surface du sol ne permet pas, dans le cadre de notre étude, de rendre compte des types de relations susceptibles d'exister entre les espèces colonisatrices et le substrat. En nous inspirant des travaux de SCHROTER (1908), VAN UFFORD (1909), BAUDIERE et BONNET (1963)⁷² et surtout SOMSON (1983), nous tenterons de préciser, pour chaque unité biorhexistasique identifiée, les mécanismes relationnels entre les espèces et leur substrat.

Cette typologie définitive, dans le cadre de cette étude, oppose les écosystèmes de la Grande Sure et du Grand Som à ceux de La Plagne, des Pelloux et de l'Aulp du Seuil. La sémiologie cartographique utilisée est inspirée de celle de la carte de la végétation de la France au 1/200.000^{ème} (GAUSSEN et REY, 1945). Nous avons notamment repris la symbolique des couleurs traduisant, dans notre cas, l'état hydrique du substrat. Ainsi, les unités biorhexistasiques du Grand Som, écosystème le plus humide, sont représentées par des teintes de couleurs froides, plutôt foncées (bleu foncé = humidité). Au contraire, pour l'écosystème des Pelloux, le plus sec, nous avons utilisé des teintes plus chaudes (jaune, bleu clair). Les unités biorhexistasiques des autres écosystèmes sont cartographiées à l'aide de teintes intermédiaires. Nous ne nous attarderons pas sur la définition des caractéristiques des unités biostasiques.

Seules les mosaïques biorhexistasiques du Grand Som, de la Grande Sure et des Pelloux seront présentées dans ce paragraphe. Celles de l'Aulp du Seuil et de La Plagne seront développées dans le Chapitre 8, consacré à la géodynamique de surface et à l'approche micro-climatologique. Les mesures relatives à la géodynamique de surface permettront de caractériser chaque unité biorhexistasique en terme de déstructuration et de vitesses de déplacement des matériaux.

2.1. La mosaïque biorhexistasique du Grand Som

9 unités biorhexistasiques caractérisent la mosaïque du Grand Som (Carte 25).

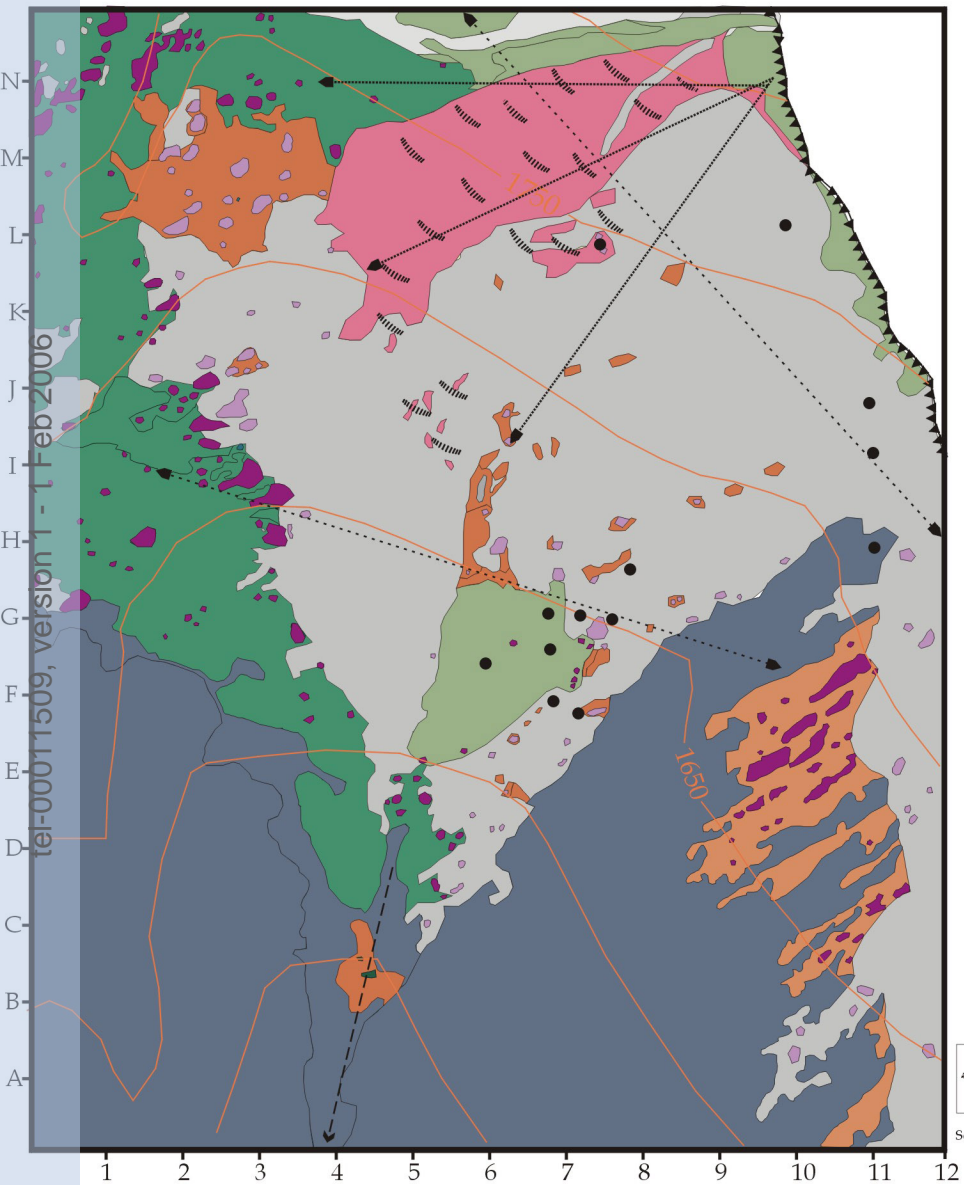
- Les écosystèmes biostasiques : ce sont les formations végétales situées en périphérie du talus d'éboulis. Elles sont caractérisées par un sol évolué stable, d'un point de vue géodynamique, à matrice fine. La végétation est continue (1.3.2, D) :

- **la pessière** (*Picea abies*) : principale formation ligneuse dense, elle ceinture le talus d'éboulis à l'ouest et au sud-est. Elle présente un faciès hygrocline, assez humide (assèchement estival possible en raison de l'exposition du talus) et constitue la base de l'étage subalpin.

- **la lande à *Juniperus communis*** : formation de transition, elle se développe en général au sein des prairies ou des pelouses. Dans le cas du Grand Som, son caractère pionnier est très marqué sur secteur rhexistasique où l'espèce a progressivement colmaté les plages colluviales à gros blocs situées au sud-est de l'écosystème, au contact du front forestier.

⁷² Première Partie, Chapitre 1, 1.2.2.

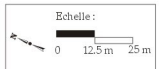
Carte n°25 : Mosaïque biorhexistatique du Grand Som (2001)



Zone apico-proximale à matériaux fins

Zone médiale à matériaux hétérométriques

Zone distale à gros blocs



Sources : S. ARQUES, 2003

Ecosystèmes biostatiques :

Formation (s) ligneuse (s)

Pessière (faciès mésohygrocline). Formation à progression moyenne entre 1920 et 2001.

Formation (s) de transition

Lande à *Juniperus communis*. Formation à progression moyenne entre 1920 et 2001.

Ilot arbustif sur formation végétale (prairie et lande) : *Picea abies*, *Acer pseudoplatanus*, *Sorbus aucuparia*, *Corylus avellana*, *Salix caprea*, *Fagus sylvatica* et *Sorbus aria*. Formation à fusion rapide entre 1956 et 2001.

Formation (s) non boisée (s)

Prairie à *Dactylis glomerata* : *Scabiosa columbaria*, *Crepis pyrenaica*, *Trifolium badium*, *Astrantia major*, *Phyteuma hemisphaericum*, *Phyteuma betonocifolium*, *Centaurea montana*, *Dianthus monspessulanus*, *Gentiana lutea*, *Pinpinella major*, *Serratula alpina*, *Euphorbia cyparissias* et *Thesium alpinum*. Formation à progression lente entre 1920 et 2001.

Pelouse à *Carex sempervirens* et *Sesleria varia* : *Laserpitium siler*, *Pulsatilla alpina*, *Centaurea montana*, *Cirsium arvense*, *Crepis pyrenaica*, *Scabiosa columbaria*, *Phyteuma hemisphaericum*, *Gentiana lutea*, *Trifolium badium*, *Asperula cynanchica*, *Euphorbia cyparissias*, *Lotus corniculatus*, *Hieracium murorum*, *Hypericum maculatum*, *Campanula rotundifolia*, *Laserpitium latifolium*, *Alchemilla conjuncta* et *Ranunculus repens*. Formation à progression moyenne entre 1920 et 2001.

Phytomorphosystème (s) hétérostatique (s) :

Piquetage herbacé sur secteur rhexistatique à granulométrie hétérométrique : *Valeriana montana*, *Thalictrum minus*, *Rumex scutatus*, *Leucanthemum adustum*, *Petasites paradoxus*, *Silene vulgaris*, *Galium anisophyllum*, *Sideritis hyssopifolia* et *Senecio doronicum*. Formation à progression rapide entre 1920 et 2001.

Terrassettes à *Thymus praecox* et *Globularia cordifolia* : *Valeriana montana*, *Sideritis hyssopifolia*, *Senecio doronicum*, *Thalictrum minus*, *Leucanthemum adustum*, *Rumex scutatus*, *Poa cenisia*, *Campanula cochlearifolia*, *Eriurus alpinus*, *Petasites paradoxus*, *Lotus alpinus*, *Pritzelago alpina*, *Silene vulgaris*, *Galium anisophyllum*, *Ranunculus repens*, *Carex sempervirens*, *Sesleria varia*, *Scabiosa columbaria*, *Alchemilla conjuncta*, *Helianthemum nummularium*, *Euphorbia cyparissias*, *Globularia nudicaulis*, *Cirsium arvense*, *Hypericum maculatum* et *Thesium alpinum*. Plages colluviales à graviers et fines. Ecotone à progression rapide entre 1920 et 2001.

Ilot(s) arbustif (s) sur éboulis (non différencié (s)) : *Rhamnus alpina*, *Salix caprea*, *Pinus uncinata* et *Picea abies*. Plages colluviales à blocs moyens et gros blocs. Formation à progression moyenne entre 1920 et 2001.

Phytomorphosystème (s) rhexistatique (s) :

Secteur rhexistatique à *Centranthus angustifolius* et *Thalictrum minus*. Plages colluviales à blocs moyens. Régression rapide entre 1956 et 2001.

Données géomorphologiques :

Corniche principale (calcaire urgonien)

Zonation longitudinale

Cône d'éboulis "peu actif" (bombement végétalisé)

Ancien couloir d'avalanche

Blocs décamétriques

Terrasette

Secteur rhexistatique actif (couloir d'alimentation)

Non cartographié

- **les îlots arbustifs sur formation végétale** : *Picea abies* colonise indifféremment la prairie et la lande. Les autres espèces se répartissent en deux groupes et privilégient la prairie. On distingue les espèces de lisière forestière : *Fagus sylvatica*, *Corylus avellana*, *Sorbus aucuparia* et *Sorbus aria* et des espèces à caractère pionnier assez marqué comme *Acer pseudoplatanus* et *Salix caprea*. La plupart de ces feuillus sont de bons combustibles (*Fagus sylvatica*, *Sorbus aria*, *Corylus avellana*) et devaient être régulièrement prélevés par les Chartreux. D'autre part, leur bois était aussi utilisé pour la confection de petits outils de menuiserie, en ébénisterie, en vannerie et lutherie (*Salix caprea*, *Sorbus aria*, *Sorbus aucuparia*, *Acer pseudoplatanus*, *Corylus avellana*). La plupart de ces espèces sont mésophiles voir parfois mésohygrophiles (*Acer pseudoplatanus*) et privilégient les sols aérés et frais. Le caractère xérophile de *Sorbus aria* révèle des conditions de sécheresse estivale prononcées. Leur progression (1920-1956) puis leur fusion (1956-2001) ont été très rapides en réponse à la déprise pastorale et probablement au réchauffement climatique (Chapitre 6). Les individus adultes et les semis sont très nombreux au sein de la prairie.

- **la prairie à *Dactylis glomerata*** : elle occupe le nord et l'ouest de l'éco-complexe. Cette espèce fourragère à fort rendement, constitue le témoin de l'activité pastorale passée. Les espèces compagnes à très large amplitude autécologique, colonisent aussi les pelouses des différents éco-complexes.

- **la pelouse à *Carex sempervirens* et *Sesleria varia*** : elle occupe les zones apico-proximale et distale du talus. Elle est constituée d'espèces communes, à large amplitude autécologique, souvent très compétitives. Certaines espèces présentent de fortes capacités d'adaptation sur éboulis et participent à la mise en place des formations hétérostasiques : *Carex sempervirens*, *Sesleria varia*, *Cirsium arvense*, *Scabiosa columbaria*, *Euphorbia cyparissias* et *Lotus corniculatus*. Sa progression, entre 1920 et 2001, s'est essentiellement opérée de manière longitudinale en zone apico-proximale du dépôt (Chapitre 6). L'îlot situé en zone distale du talus, déjà présent en 1920, était classé en parcelle pâturée. La formation est caractérisée par un phytofaciès mésoxérophile.

- **Les phytomorphosystèmes hétérostasiques** : pénestables, ils sont caractérisés par une granulométrie hétérométrique et des sols moyennement évolués (1.3.2., D). Les plantes se développent en taches et la prolifération d'espèces dites « sociales », appartenant aux formations périphériques biostasiques, est importante au sein des écotones :

- **le piquetage herbacé à *Valeriana montana*** : à progression rapide entre 1920 et 2001, il est constitué d'espèces lithophiles stabilisatrices (SOMSON, 1983) qui se développent sur substrat colluvial à matrice hétérométrique variable ($2 \leq L \leq 20$). Pour SOMSON (1983), il s'agit d'espèces à systèmes sédentaires, incapables de suivre ou de subir le mouvement. Elles occupent en général les plages colluviales peu mobiles. Certaines d'entre elles présentent une organisation particulière de leur appareil végétatif hypogé ou épigé qui leur permet de jouer un rôle dans la stabilisation définitive du substrat (végétaux stabilisateurs) ou dans l'évolution ultérieure du milieu (végétaux recouvreurs et édificateurs de formes : terrassettes à *Thymus praecox*, voir plus loin). *Valeriana montana* et *Silene vulgaris* sont des végétaux à système « souterrain » stabilisateur, qui forment des rhizomes très ramifiés, courts et robustes. Leur racine, unique et de type pivotant, révèle la stabilité de la matrice colluviale sous-jacente. L'enchevêtrement des rhizomes dans les parties graveleuses superficielles, contribue à freiner les glissements des matériaux. Sur matériaux plus fins, se développe *Sideritis hyssopifolia*. A ce premier groupe stabilisateur, s'ajoutent les lithophytes migratrices (VAN UFFORD, 1909) par « allongement et régénération » (SOMSON, 1983) telles que *Rumex scutatus* et *Poa cenisia*. Sur les éboulis, le déchaussement, la fragmentation des tiges et des rhizomes, occasionnés par des remaniements brutaux, peuvent être supportés par ces espèces qui possèdent de bonnes capacités de régénération, à condition que le substratum présente une humidité suffisante et un minimum de matrice fine. « Leur système souterrain très ramifié et flexueux est composé de longs cordons hypogés qui proviennent des pousses annuelles successives de tiges recouvertes

et rabattues par les glissements de printemps et d'automne » (SOMSON, 1983). De nouvelles tiges se forment ainsi chaque année sur celles de l'année précédente recouvertes par les matériaux, ce qui provoque l'allongement et la ramification du système végétatif souterrain. Ces espèces ont profité de conditions de stabilité favorables du substrat, mises en place par les ligneux entre 1920 et 1956, pour se développer en zone médiale du talus, au contact de la prairie (L-N, 1-4) et du petit îlot de pelouse (E-J, 5-8). Leur développement, sous forme de petites taches isolées au sein du secteur rhexistasiqne (H-L, 8-10), est indicateur de la présence de plages colluviales à granulométrie plus fine et stables. La progression de ces taches « par capillarité » est ici très lente en raison de la nature grossière du substrat environnant.

- **terrassettes à *Thymus praecox* et *Globularia cordifolia*** : elles se sont développées au sein de la portion du dépôt cartographiée en cône d'éboulis « peu actif » (K-N, 4-11). Présent sous forme de petites taches entre 1920 et 1956, le phytomorphosystème a connu une progression rapide entre 1956 et 2001. Il constitue actuellement un vaste écotone, situé au contact de la prairie et de la pelouse biostasiqnes. Les terrassettes ont été façonnées par des espèces « édificatrices » (BAUDIERE et SERVE, 1971), à système aérien stabilisateur sédentaire, telles que *Thymus praecox*, *Leucanthemum adustum* et *Globularia cordifolia*. SOMSON (1983) souligne que ces végétaux sont en réalité des végétaux « recouvreurs » possédant un appareil végétatif aérien particulièrement compact qui contribue à retenir dans sa trame les particules fines ; ils concourent également, avec les espèces ligneuses à fort développement (comme *Rhamnus alpina*), à freiner la dynamique superficielle. Ces espèces sont généralement de fortes productrices de matière organique. Le cône étant déjeté vers l'intérieur du talus, le largage des fines a permis la progression de l'écotone de manière latérale, conformément à l'inclinaison du secteur. La forte production de matière organique et la présence d'une matrice granulométrique constituée de petits graviers et de fines ont favorisé l'installation de végétaux rupicoles mais aussi des espèces dites « sociales » provenant des communautés périphériques biostasiqnes. Ainsi, on retrouve ici les espèces à système « souterrain » stabilisateur, telles que *Valeriana montana*, *Silene vulgaris* et *Sideritis hyssopifolia*.

Au sein des portions colluviales plus actives, se développent deux types de lithophytes migrateurs :

- par régénération et allongement : telles que *Rumex scutatus*, *Campanula cochlearifolia* et *Poa cenisia*. *Poa cenisia* colonise principalement les plages colluviales où la matrice fine abonde sous les quelques centimètres superficiels de débris grossiers. SOMSON (1983) souligne que « *cette graminée possède de longs stolons, peu ramifiés qui cheminent au contact des fines. Les racines qui se forment à leur extrémité sont fines et superficielles. Le glissement des débris sur la matrice peut donc entraîner, en fonction de son intensité, soit une bonne résistance, soit une fragmentation des stolons accompagnée d'une migration vers l'aval avec les matériaux en transit. Les fragments végétaux déplacés, formés en général d'une portion de stolon avec racines et rejets feuillés, seront capables au début de l'été suivant, soit de se réimplanter directement s'ils sont au contact avec la matrice, soit de donner naissance à de nouveaux stolons qui chemineront alors entre les pierres jusqu'à parvenir au contact de la terre fine où ils pourront s'enraciner et donner naissance à de nouvelles plantes* » ;

- les lithophytes migratrices à système racinaire adhérent fortement au substrat : *Senecio doronicum* appartient à ce groupe. Il s'agit d'une espèce, très commune sur éboulis, dont l'appareil souterrain est composé de nombreuses racines longues et robustes qui solidarisent fortement l'espèce avec son substrat. Son appareil racinaire révèle la présence d'une matrice fine en surface ou à faible profondeur. Selon SOMSON (1983), dans les éboulis, la distribution de cette espèce dépend plus de la morphométrie du matériel constitutif que du degré de stabilité du milieu. En effet, cette espèce possède des racines suffisamment solides et nombreuses pour pouvoir pénétrer dans les couches sous-jacentes de l'éboulis et adhérer fortement à un substrat renfermant encore de nombreux matériaux grossiers.

Plus rarement, on note la présence d'espèces telles que *Pritzelago alpina* et *Linaria alpina*. Selon SOMSON (1983), ces espèces n'ont pas de fonction particulière. Ce sont des végétaux à système racinaire pivotant, nécessitant impérativement la présence à plus ou moins grande profondeur d'une matrice stable. Ils privilégient les plages colluviales à fines les moins végétalisées et échappent ainsi à la concurrence interspécifique active. Ils se développent principalement en bordure de l'écotone, au contact du secteur rhexistasique, et dans la zone apicale du cône.

Petasites paradoxus est très présent au sein du phytomorphosystème à terrassettes mais aussi sur l'ensemble du talus d'éboulis. Espèce hygrocline à mésohygrophile, elle privilégie les stations souvent soumises à des contrastes hydriques au cours de l'année, comme au Grand Som. Géophyte à rhizome, elle revêt un caractère pionnier sur matériaux humides, riches en éléments fins.

Enfin, les terrassettes sont progressivement colonisées par les espèces sociales de la prairie à *Dactylis glomerata* et la pelouse à *Carex Sempervirens*. Leur taux de recouvrement sont faibles (1.3.1.) mais elles s'accommodent parfaitement des conditions édaphiques stationnelles mises en place par les végétaux stabilisateurs. Ce sont en général des espèces à large amplitude autécologique : *Carex sempervirens*, *Sesleria varia*, *Galium anisophyllum*, *Scabiosa columbaria*, *Alchemilla conjuncta*, *Helianthemum nummularium*, *Euphobia cyparissias*, *Globularia nudicaulis*, *Cirsium arvense* et *Ranunculus repens*.

- **les îlots arbustifs sur éboulis** : il s'agit d'arbres isolés ou d'îlots arbustifs, dont la progression a été relativement moyenne entre 1920 et 2001 (Chapitre 6). *Rhamnus alpina*, espèce pionnière d'éboulis, cohabite ici avec les espèces herbacées rupicoles des phytomorphosystèmes à piquetage herbacé et terrassettes (L-M, 2-4 ; K, 3-4 ; G-J, 6-9). Cette espèce, à caractère lithophile très prononcé, ne colonise jamais les formations biostasiques denses⁶². Au contraire, *Salix caprea* privilégie les lisières du talus d'éboulis et la proximité de la prairie ou de la pelouse (I-K, 2-3 ; C-M, 5-7). Quelques individus de *Picea abies* et *Pinus uncinata* se sont installés à proximité du front forestier, au sud-est de l'écocomplexe (A-H, 11-12). Les pins étaient déjà présents en 1920 (Carte 19).

• Le (s) phytomorphosystème (s) rhexistasique (s) : localement instables, notamment dans les zones apico-proximale et parfois distale, ils sont caractérisés par une absence de sol (lithosol) et une matrice granulométrique grossière (1.3.2., D). La végétation se développe en touffes dispersées. Les plages colluviales à blocs moyens ($10 \leq L \leq 20$) sont principalement colonisées par *Centranthus angustifolius* et *Thalictrum minus*. *Centranthus angustifolius* appartient au groupe des espèces lithophiles migratrices par « régénération ». Elle se développe sous la forme de larges et grandes touffes qui jouent un rôle non négligeable en terme de freinage géodynamique (Chapitre 8).

La présence de ces différentes espèces, et notamment celle des végétaux à système racinaire sédentaire, révèle des conditions géodynamiques stationnelles assez stables, au sein des phytomorphosystèmes à piquetage herbacé et à terrassettes. L'approche géodynamique des phytomorphosystèmes hétérostasiques de La Plagne et de l'Aulp du Seuil devrait nous permettre de préciser cet aspect (Chapitre 8).

⁶² Sur les versants à éboulis cartusiens.

2.2. La mosaïque biorhexistasique de la Grande Sure

7 unités biorhexistasiques caractérisent la mosaïque de la Grande Sure (Carte 26). La diversité écosystémique est ici moins importante.

- Les écosystèmes biostasiques :

- **la pessière (*Picea abies*)** : elle présente un faciès mésophile et contrairement au Grand Som, le front forestier est moins développé en raison d'une exploitation pastorale plus intense et régulière⁶³. En réponse à la diminution pastorale des années 50 (mise en place d'une clôture) et aux effets du réchauffement climatique, sa progression, par fusion d'îlots arbustifs isolés, a été très rapide entre 1956 et 2003.

- **les îlots arbustifs sur pelouse** : comme nous pouvons le constater, les feuillus sont aujourd'hui encore extrêmement rares sur l'ensemble de l'écocomplexe. La dynamique ligneuse est essentiellement le fait de conifères tels que *Picea abies* et *Pinus uncinata*, beaucoup moins prisés par les troupeaux. Leur fusion a été très rapide entre 1956 et 2003 (*Picea abies*, essentiellement).

- **la pelouse à *Carex sempervirens* et *Sesleria varia*** : elle occupe la plus grande surface. Comme celle du Grand Som, elle est caractérisée par la présence d'espèces communes, à large amplitude autécologique. Cette formation n'enregistre pas d'évolution notable entre 1956 et 2003. La présence de *Dactylis glomerata* témoigne de l'activité pastorale passée.

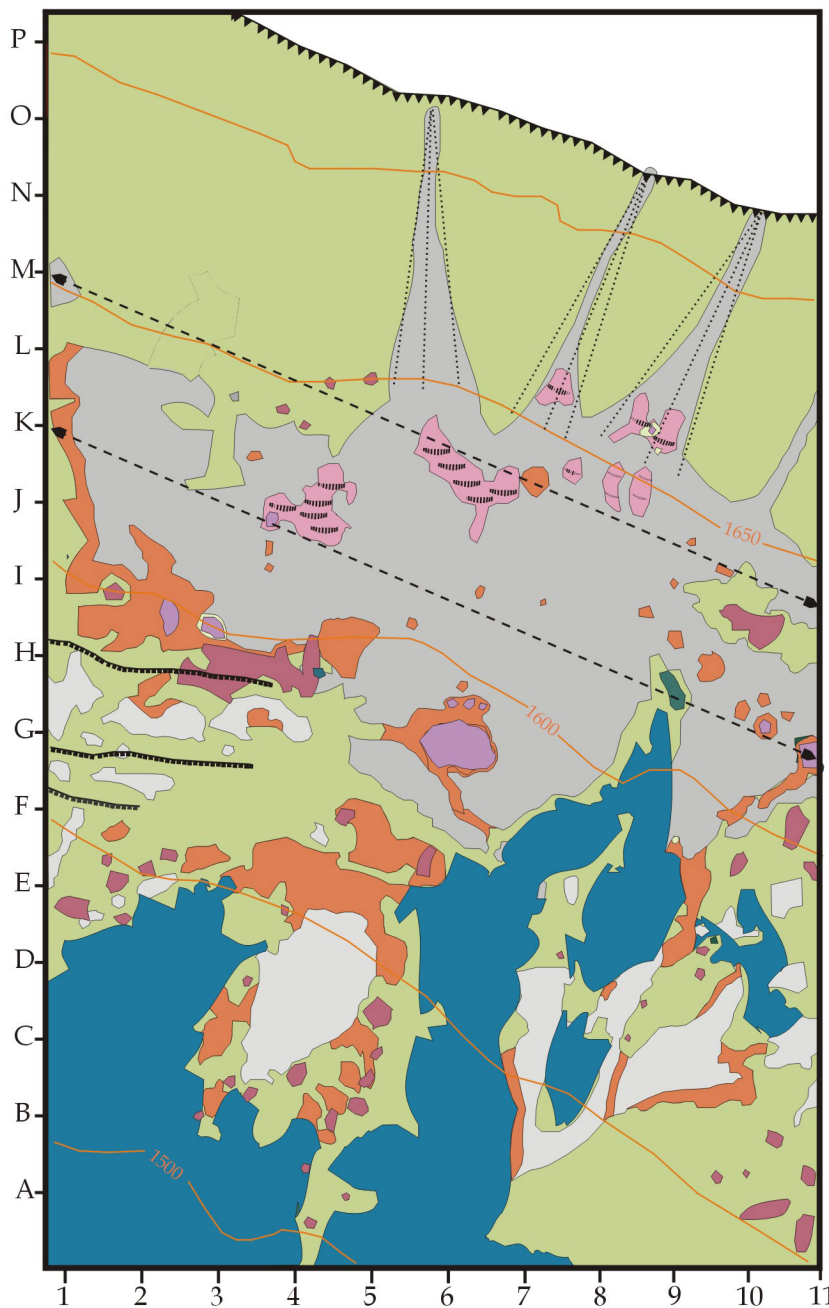
- Les phytomorphosystèmes hétérostasiques : leur progression a été relativement moyenne sur la période, en termes de vitesse et d'extension surfacique. D'autre part, les écotones graduels sont inexistantes même au contact de la pelouse :

- **le piquetage herbacé à *Valeriana montana*** : la composition floristique est sensiblement identique à celle du Grand Som. Il colonise principalement la zone distale du talus, dans les secteurs où la matrice granulométrique est plus fine, au contact de la pelouse. Il est essentiellement constitué d'espèces lithophiles stabilisatrices, à système racinaire sédentaire (*Valeriana montana*, *Peucedanum ostruthium*) et de quelques végétaux migrants (*Rumex scutatus*, *Poa cenisia*, *Galium anisophyllum* et *Senecio doronicum*).

- **terrassettes à *Thymus praecox*** : elles sont principalement localisées en zone apico-proximale du talus dans le prolongement de la pelouse. Comme pour le Grand Som, les espèces constitutives de ce phytomorphosystème privilégient les plages colluviales à graviers et à fines. La présence de *Thymus praecox* (espèce édifiatrice à système racinaire aérien stabilisateur sédentaire) a favorisé l'installation de la plupart des espèces appartenant au piquetage herbacé.

- **les îlots arbustifs sur éboulis** : installés sur blocs moyens et gros blocs, peu nombreux, il s'agit essentiellement de conifères (*Picea abies* et *Pinus uncinata*). Cependant, quelques individus de *Salix retusa* se sont développés au sein de l'îlot situé en zone distale du talus (G6). Comme *Thymus praecox*, il entre dans la catégorie des végétaux à système aérien stabilisateur. Son port prostré peut couvrir de vastes étendues.

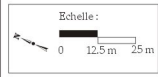
⁶³ Pour rappel, contrairement aux autres écocomplexes, l'exploitation pastorale de la Grande Sure ne s'est jamais arrêtée depuis 1914.



Zone apico-proximale à matériaux fins

Zone médiale à matériaux hétérométriques

Zone distale à gros blocs




Source : S. ARQUES, 2003

tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2006


Légende :

Ecosystèmes biostasiqques :


Formation (s) ligneuse (s)

 Pessière (faciès mésophile). **Formation à progression rapide entre 1956 et 2003.**


Formation (s) de transition


 Ilot (s) arbustif (s) sur formation végétale herbacée : *Pinus uncinata* et *Picea abies*. **Formation à fusion rapide entre 1956 et 2003.**


Formation (s) non boisée (s)

 Pelouse à *Carex sempervirens* et *Sesleria varia* : *Scabiosa columbaria*, *Globularia micidialis*, *Astrantia major*, *Crepis pyrenaica*, *Alchemilla conjuncta*, *Lotus corniculatus*, *Cirsium arvense*, *Laserpitium latifolium*, *Pulsatilla alpina*, *Gentiana lutea*, *Dactylis glomerata*, *Hypericum maculatum*. **Formation stable entre 1956 et 2003.**


Phytomorphosystème (s) hétérostasiqque (s) :

 Piquetage herbacé sur secteur rhexistasiqque à granulométrie hétérométrique : *Valeriana montana*, *Senecio doronicum*, *Rumex scutatus*, *Poa cenisia*, *Galium anisophyllum*, *Peucedanum ostruthium*. **Formation à progression moyenne entre 1956 et 2003.**


 Terrassettes à *Thymus praecox* : *Valeriana montana*, *Senecio doronicum*, *Rumex scutatus*, *Poa cenisia*, *Galium anisophyllum*, *Peucedanum ostruthium*. **Plages colluviales à graviers et fines. Formation à progression moyenne entre 1956 et 2003.**

 Ilot (s) arbustif (s) sur éboulis (non différencié (s)) : *Pinus uncinata*, *Picea abies* et *Salix retusa*. **Plages colluviales à blocs moyens et gros blocs. Formation à progression lente entre 1956 et 2003.**

Phytomorphosystème (s) rhexistasiqque (s) :

 Secteur rhexistasiqque à *Allium narcissiflorum*. **Plages colluviales à blocs moyens et gros blocs. Régression lente entre 1956 et 2003.**

Données géomorphologiques :

 Corniche principale (calcaire urgonien)

 Escarpement secondaire

 Zonation longitudinale

 Cône apical stabilisé

 Terrassettes

 Secteur rhexistasiqque non végétalisé

- Les phytomorphosystèmes rhexistasiques : ils présentent les mêmes caractéristiques que ceux du Grand Som, en termes de stabilité et d'état pédologique. Le secteur rhexistasique du talus d'éboulis de la Grande Sure est caractérisé par la présence d'une granulométrie relativement grossière dans l'ensemble. Seules quelques plages colluviales à blocs moyens et gros blocs sont colonisées par *Allium narcissiflorum*, notamment au sein de la zone distale du dépôt. Comme *Centranthus angustifolius*, elle se développe sous forme de larges touffes dispersées. D'après la typologie de SOMSON (1983), il s'agirait d'une lithophile indépendante. Les espèces de ce groupe s'affranchissent du mouvement soit, par leur cycle biologique (thérophytes), soit par une possible désorganisation de leur système souterrain à l'intérieur du substrat pendant les périodes où celui-ci subit des remaniements (géophytes à bulbes, dans notre cas, ou plantes pseudo-bulbeuses).

2.1.3. La mosaïque biorhexistasique des Pelloux

Situé sur la bordure orientale du massif, il s'agit de l'éco-complexe le plus sec. Il est constitué de 8 unités biorhexistasiques (Carte 27).

- Les écosystèmes biostasiques : ils sont relativement diversifiés. Les phytofaciès mésoxérophiles à xérophiles dominent :

- **la hêtraie et pessière à *Fagus sylvatica* et *Picea abies*** : elle présente un faciès mésoxérophile et *Picea abies* est peu représenté. Elle délimite, sur toute sa largeur, la zone distale du talus d'éboulis. Il s'agit d'une formation dense, parsemée de quelques couloirs avalancheux aujourd'hui peu actifs.

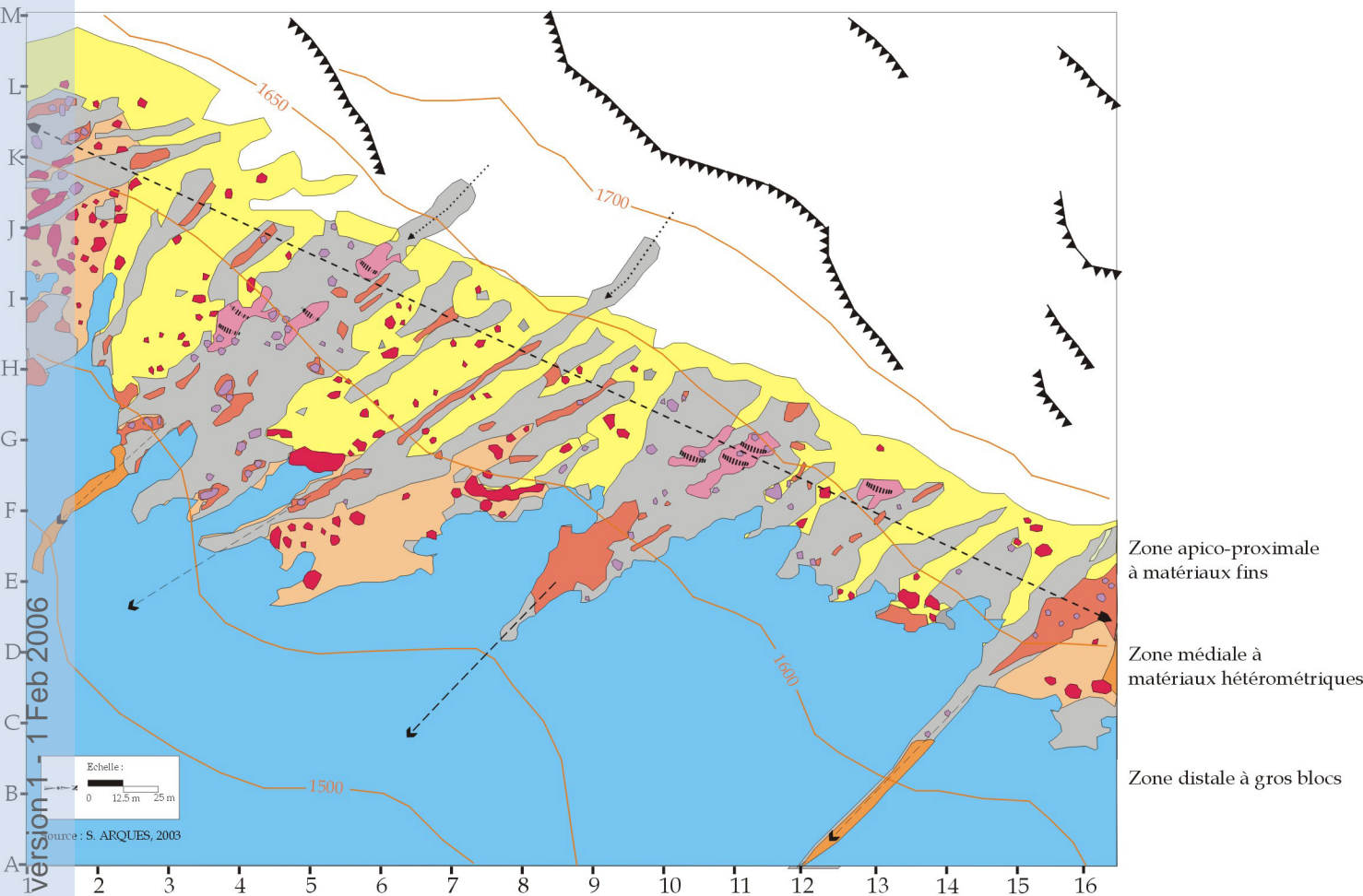
- **la lande à *Laserpitium siler*** : espèce xérophile pionnière, elle constitue un groupement de substitution de la hêtraie mésoxérophile. En général, elle se développe sur des pentes à sols secs. La concurrence des espèces de la pelouse à *Carex sempervirens* la cantonne dans les zones distales du talus, au contact du front forestier. A l'exception de *Juniperus communis* et d'*Arctostaphylos uva-ursi*, sa composition floristique ne diffère pas de celle de la pelouse à *Carex sempervirens*.

- **les îlots arbustifs sur lande et pelouse** : comme nous l'avons souligné dans le Chapitre 6, et contrairement aux éco-complexes de la Grande Sure et du Grand Som, cette formation n'enregistre pas de progression notable entre 1956 et 2001. Il s'agit essentiellement de conifères âgés. *Pinus uncinata* se développe principalement au sein de la pelouse à *Carex sempervirens* et de la lande à *Laserpitium siler* et *Picea abies* au contact du front forestier. Les feuillus sont peu nombreux en périphérie du talus d'éboulis où la concurrence interspécifique avec les ligneux bas (*Juniperus communis* et *Arctostaphylos uva-ursi*) est importante.

- **la pelouse à *Carex sempervirens* et *Sesleria varia*** : elle colonise l'essentiel du versant situé entre la corniche et le front forestier. A l'exception de *Bromus erectus*, sa composition floristique ne diffère guère de celle des mosaïques biorhexistasiques de la Grande Sure et du Grand Som. Espèce à caractère indicateur mésoxérophile, elle affectionne particulièrement les sols secs (pelouses et prairies sèches).

- Les phytomorphosystèmes hétérostasiques : ils enregistrent une progression moyenne sur la période. Du même type que ceux de la Grande Sure et du Grand Som, ils n'ont pas de localisation préférentielle et sont assez dispersés, ici. Ce phénomène révèle une alternance de plages colluviales à matrice fine et à matrice grossière très prononcée et un granoclassement extrêmement perturbé. Quelques espèces soulignent ici encore le faciès à dominante mésoxérophile de la mosaïque biorhexistasique : *Teucrium chamaedrys* et *Teucrium montanum*.

Carte n°27 : Mosaïque biorhexistasiqque des Pelloux (2001)



tel:0001509, version 1 1 Feb 2006

Echelle: 0 12.5 m 25 m
source : S. ARQUES, 2003

Zone apico-proximale à matériaux fins
Zone médiale à matériaux hétérométriques
Zone distale à gros blocs

légende :

- Ecosystèmes biostatiques :**
- Formation (s) ligneuse (s)
Hêtraie et pessière (faciès mésoxérophile). **Formation à progression lente entre 1956 et 1993.**
 - Formation (s) de transition
Lande à *Laserpitium siler* avec : *Laserpitium latifolium*, *Juniperus communis nana*, *Arctostaphylos uva-ursi*, *Globularia cordifolia*, *Globularia vulgaris*, *Galium anisophyllum*, *Scabiosa columbaria*, *Helianthemum nummularium*, *Euphorbia cyparissias*, *Lotus corniculatus*, *Carex sempervirens* et *Sesleria varia*. **Formation à progression lente entre 1956 et 1993.**
 - Ilot arbustif sur formation végétale (herbacée et sous arbustive) : *Pinus uncinata* sur pelouse et lande à *Laserpitium siler*. *Picea abies* en front forestier. **Formation stable entre 1956 et 1993.**
 - Formation (s) non boisée (s)
Pelouse à *Carex sempervirens* et *Sesleria varia* : avec *Bromus erectus*, *Crepis pyrenaica*, *Scabiosa columbaria*, *Taraxacum officinale*, *Cirsium arvense*, *Gentiana lutea*, *Gentiana angustifolia*, *Euphorbia cyparissias*, *Helianthemum nummularium*, *Galium anisophyllum*, *Lotus corniculatus* et *Globularia nudicaulis*. **Formation stable entre 1956 et 1993.**
- Phyto-morphosystème (s) hétérostasique (s) :**
- Piquetage herbacé ou écotone (s) à *Valeriana montana*, *Silene vulgaris*, *Galium anisophyllum*, *Euphorbia cyparissias*, *Erius alpinus*, *Euphrasia salisburgensis*, *Sideritis hyssopifolia*, *Leucanthemum adustum*, *Poa cenisia* et *Teucrium montanum*. **Plages colluviales à graviers, petits cailloux et fines. Formation à progression moyenne entre 1956 et 1993.**
 - Terrassettes à *Thymus praecox* et *Globularia cordifolia* : *Valeriana montana*, *Leucanthemum adustum*, *Sideritis hyssopifolia*, *Silene vulgaris*, *Erius alpinus*, *Teucrium montanum*, *Teucrium chamaedrys* et *Poa cenisia*. **Plages colluviales à graviers ou fines. Formation à progression moyenne entre 1956 et 1993.**
- Phyto-morphosystème (s) rhexistasiqque (s) :**
- Ilot (s) arbustif (s) sur éboulis (non différencié (s)) : *Pinus uncinata*, *Sorbus aria*, *Sorbus aucuparia*, *Salix caprea*, *Acer pseudoplatanus* et *Amelanclier ovalis*. **Plages colluviales hétérométriques. Formation à progression rapide entre 1956 et 1993.**
 - Secteur rhexistasiqque stabilisé à : *Centranthus angustifolius*. **Plages colluviales à matériaux grossiers. Régression moyenne entre 1956 et 1993.**
- Données géomorphologiques :**
- Corniche principale (calcaire urgonien)
 - Zonation longitudinale
 - Ancien couloir d'avalanche
 - Terrasette
 - Non cartographié (secteurs à vires herbeuses)

- **Les îlots arbustifs sur éboulis** : il s'agit de la formation dont la progression a été la plus rapide entre 1956 et 2001. Contrairement aux formations biostasiques périphériques, cette dynamique est essentiellement le fait de feuillus qui profitent de la densification du couvert herbacé pour se développer. Les espèces de lisière forestière sont ici très nombreuses au sein du dépôt : *Sobus aria*, *Sorbus aucuparia* et *Acer pseudoplatanus*. Elles colonisent principalement les phytomorphosystèmes à piquetage herbacé et terrassettes. *Salix caprea* révèle son caractère pionnier et colonise indifféremment les plages colluviales hétérométriques. *Amelanchier ovalis* (xérophyte) colonise préférentiellement les plages colluviales pauvres en fines et s'accommode particulièrement des fissures des gros blocs. *Pinus uncinata* privilégie lui aussi le contact des portions plus végétalisées, moins mobiles.

- Les phytomorphosystèmes rhexistasiques à *Centranthus angustifolius*. Ils présentent les mêmes caractéristiques que ceux de la mosaïque biorhexistasique du Grand Som. Espèce lithophile migratrice, elle colonise principalement les plages colluviales à matériaux grossiers et contribue à stabiliser le substrat en ralentissant la géodynamique de surface.

Finalement, cette typologie des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis ne revêt pas un caractère exceptionnel. Comme nous l'avons souligné précédemment, les caractéristiques phyto-écologiques des écocomplexes ne sont que légèrement différentes. Ce caractère homogène est ici une fois de plus confirmé. Certes, à l'échelle paysagère, les différences structurelles, la variété des évolutions végétales constatée et les différences dans les modalités d'anthropisation, nous permettent d'opposer clairement les écocomplexes de la Grande Sure et du Grand Som à ceux de La Plagne, des Pelloux et de l'Aulp du Seuil. Cependant, d'un point de vue fonctionnel, à l'échelle stationnelle, la mise en évidence de critères de différenciation et/ou de regroupements particuliers est moins évidente. Ainsi, seul l'état hydrique du milieu apparaît être un facteur réellement discriminant mais il ne fait que confirmer le découpage latitudinal du massif (Chapitre 3, carte 5). De plus, si les unités biostasiques sont légèrement différentes en fonction des écocomplexes concernés, les types d'unités phyto-morphologiques hétérostasiques et rhexistasiques sont assez similaires dans l'ensemble. Seule la présence de quelques espèces va confirmer le caractère plus ou moins xérique du milieu.

Dans le chapitre qui suit, nous proposons d'ajouter une dimension géodynamique « quantifiée » à cette étude des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis, en prenant comme exemples les écocomplexes de l'Aulp du Seuil et de La Plagne. Nous avons vu précédemment que la présence des végétaux à système sédentaire, révèle des conditions géodynamiques stationnelles assez stables au sein des phytomorphosystèmes à piquetage herbacé et à terrassettes. L'approche géodynamique des phytomorphosystèmes biorhexistasiques de La Plagne et de l'Aulp du Seuil devrait nous permettre de préciser cet aspect (Chapitre 8). Enfin, nous tenterons de valider l'impact du réchauffement climatique dans l'étage infra-périglaciaire, par le biais de mesures micro-climatiques, dendrochronologiques et dendrogéomorphologiques.

Chapitre 8 : Approche micro-climatique, bioclimatique et géodynamique : contribution à la validation du réchauffement climatique dans l'étage infra-périglaciaire

I. Une ambiance morphoclimatique de moyenne montagne

Dans la première partie de ce travail (Chapitres 1 et 3), nous avons abordé les principales caractéristiques climatiques du massif et le réchauffement climatique en Chartreuse, sur la période 1960-2003, à partir des séries climatiques fournies par Météo-France (poste de la Grande Chartreuse à 985 m). Plus haut vers 1647 m, le topoclimat de l'éco-complexe de La Plagne a été cerné par plusieurs séries de mesures thermiques et pluviométriques, effectuées par nos soins à l'aide d'une station micro-climatique automatique (Auteg) entre le 01/07/2002 et le 14/07/2004. Toutes ces données ont été exploitées selon une optique morphoclimatique, on s'est plus particulièrement intéressé aux relations entre les régimes thermiques et pluviométriques et les processus périglaciaires et post-dépositionnels.

L'ambiance morphoclimatique présentée ici, est seulement déduite des caractéristiques de la basse atmosphère, elle repose sur une comparaison de la série de La Plagne (1647 m) avec celle de la Grande Chartreuse (945 m). Les paramètres micro-climatiques comme le régime thermique des sols, la neige au sol et l'impact des précipitations sur le substrat, phénomènes dont le suivi régulier a permis de cerner plus directement les mécanismes de la morphogenèse seront évoqués ultérieurement lors de l'étude morphogénétique détaillée (paragraphe II de ce chapitre). L'objectif est, ici, d'effectuer une approche préliminaire. Par commodité, l'année morphoclimatique s'étend de juillet à juin.

1.1. Les régimes thermiques et leur intérêt morphoclimatique

Les températures sont exprimées par décades (moyennes des maxima quotidiens, des minima quotidiens et moyennes simples). Pour chaque station météorologique, en plus des moyennes thermiques précitées ont été comptabilisés les jours de gel-dégel ($T_{max} > 0\text{ °C}$, $T_{min} \leq 0\text{ °C}$), les jours de gel continu ($T_{max} \leq 0\text{ °C}$) et les jours sans gel ($T_{min} > 0\text{ °C}$). De plus, trois types de jours de gel selon l'intensité du froid ont été distingués : les jours de gel faible ($0\text{ °C} \geq T_{min} > -5\text{ °C}$), les jours de gel moyen ($-5\text{ °C} \geq T_{min} > -10\text{ °C}$), et les jours de gel fort ($T_{min} \leq -10\text{ °C}$). Nous restituons brièvement les ambiances climatiques en insistant sur le gel.

1.1.1. La situation à 945 m (ubac) : La Grande Chartreuse

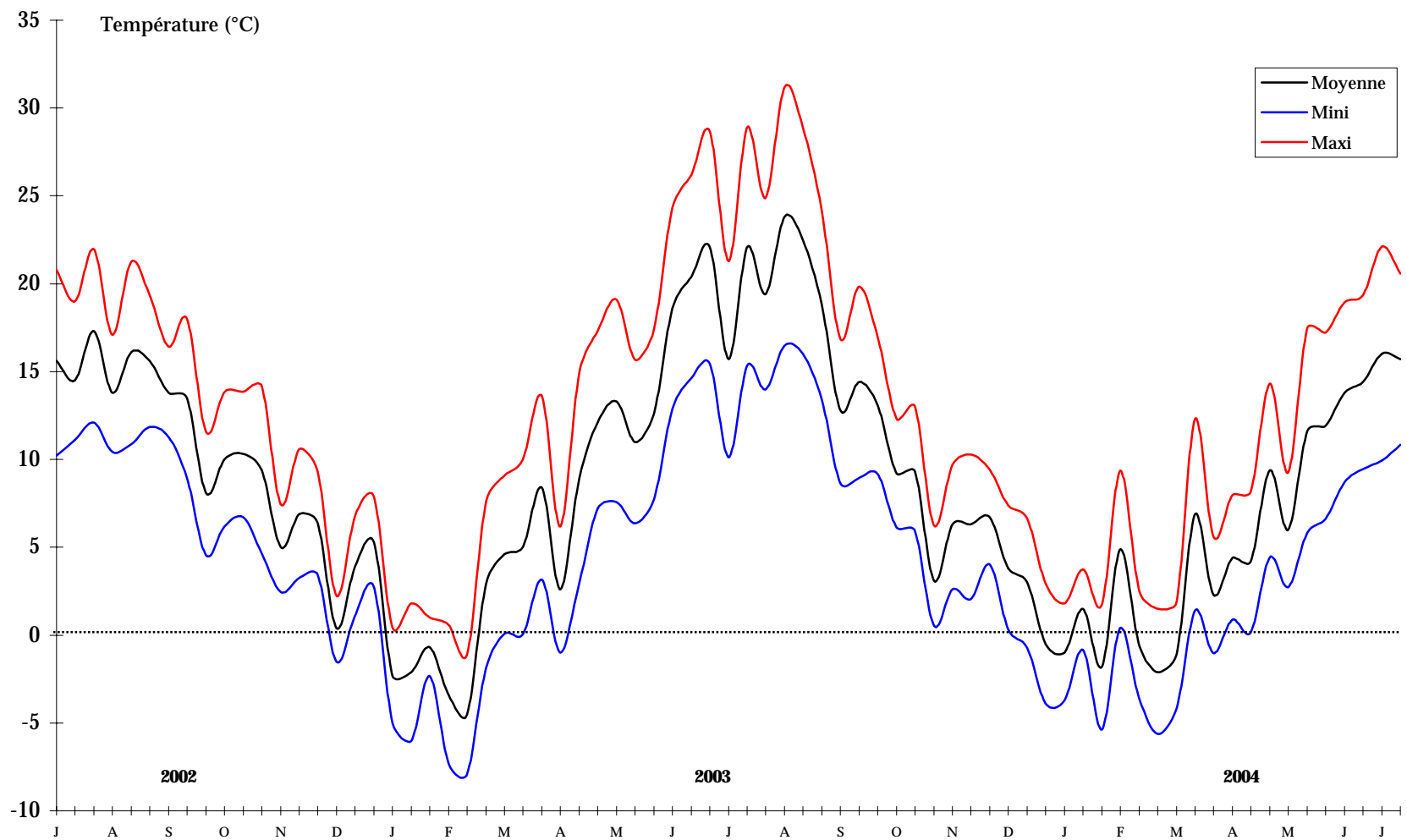
Cette station se situe en Chartreuse centrale, au pied du Grand Som (couvent de la Grande Chartreuse), en position d'ubac (fond de vallée). La température moyenne annuelle⁸⁶ approche les 9 °C (8,8 °C pour l'année 2002/2003 et 9,3 °C pour 2003/2004). La moyenne quarantenaire 1961-2003 est de 8 °C.

1.1.1.1. L'année 2002-2003

Le début de saison se caractérise par un été relativement frais, marqué par une cyclicité décadaire importante jusqu'à la première décade de septembre (Figure 60). La température moyenne décadaire oscille entre 13,8 °C et 17,3 °C. Le mois d'août enregistre des maxima quotidiens particulièrement bas les 10 (11,9 °C) et 11 (11,2 °C). L'automne est assez doux avec cependant deux périodes de refroidissement marqué dans la 3^{ème} décade de septembre (8,1 °C) et la 1^{ère} décade de novembre (5 °C).

⁸⁶ Année météorologique normale (janvier à décembre).

Figure 60 : Régime thermique de la Grande Chartreuse (945 m). Températures de l'air maximale, minimale et moyenne décadaires, relevées sous abri (juillet 2002-juin 2004).



La fin du mois est plus clémente mais le refroidissement de la 1^{ère} décennie de décembre marque l'entrée dans l'hiver. L'hiver est assez froid même si la température moyenne décennale n'est jamais descendue en dessous de -5 °C ($-4,5\text{ °C}$ dans la 2^{ème} décennie de février). Les maxima décennaux moyens, proches de 0 °C pendant tout l'hiver, descendent en dessous de 0 °C dans la 2^{ème} décennie de février ($-1,1\text{ °C}$). Par rapport à la normale 1961-1990, les températures moyennes mensuelles des mois de janvier et février sont plus froides. Les écarts à la moyenne 1961-1990 sont respectivement de $-1,7\text{ °C}$ pour le mois de janvier et $-2,9\text{ °C}$ pour le mois de février. Les minima enregistrent des écarts respectifs de $-1,4\text{ °C}$ et $-3,7\text{ °C}$ et les maxima de $-2,15\text{ °C}$ et -2 °C .

L'hiver est également assez court, la température moyenne décennale ne passant au-dessous de 0 °C que de début janvier à mi-février, soit à peine un mois et demi. La période de gel/dégel prévernale est assez courte, elle débute dès la 1^{ère} décennie de mars et se prolonge jusqu'à la 2^{ème} décennie d'avril où les températures minimales deviennent positives. Le printemps est marqué par des températures exceptionnellement chaudes dès la 2^{ème} décennie d'avril et par de fortes amplitudes thermiques. La sécheresse s'installe durablement et annonce déjà la fameuse canicule de l'été 2003⁸⁶ (Figure 60). Par rapport à la normale 1961-1990, le mois de mars est le plus chaud avec $+3,3\text{ °C}$ contre $+1,9\text{ °C}$ pour le mois d'avril et $+2,2\text{ °C}$ pour le mois de mai. Le printemps 2003 est significativement plus chaud pour les températures maximales ($+3,3\text{ °C}$). Les températures moyennes mensuelles enregistrent une augmentation de $+2,5\text{ °C}$ et les minima de $+1,6\text{ °C}$.

Globalement, l'année 2002-2003 a été fraîche. La température moyenne « annuelle » s'est élevée à $8,7\text{ °C}$ ⁸⁷, les minima décennaux moyens sont demeurés négatifs au cours de la 1^{ère} décennie de décembre 2002 puis de janvier à mi-mars 2003 soit l'équivalent de 3 mois sur 12.

L'année 2002-2003 se divise en plusieurs périodes :

- deux périodes sans gel totalisant 274 jours soit 75% de l'année :

- une première période sans gel de 128 jours groupés de juillet 2002 à début novembre 2002. Cette période est suivie d'un nouvel épisode sans gel, de 18 jours consécutifs, sur les 2^{ème} et 3^{ème} décennies de novembre. Les périodes préhivernale, hivernale et prévernale enregistrent 127 jours sans gel par épisodes de 4 à 14 jours consécutifs de la 1^{ère} décennie de décembre 2002 à la 3^{ème} décennie de mars 2003 et 1 jour sans gel, isolé, dans la 1^{ère} décennie de mars 2003.

- une seconde période sans gel de 79 jours groupés de mi-avril à juillet 2003.

- une période sans dégel de 24 jours, soit 6% de l'année dont 23 jours sans dégel par épisodes de 3 à 8 jours consécutifs et 1 jour sans dégel isolé. Il y a eu une période très froide où les minima quotidiens ont été inférieurs à -10 °C et les maxima quotidiens proches de -10 °C , avec 5 jours de gel continu du 09/01/2003 au 13/01/2003. Dans l'ensemble, l'hiver n'a pas été très rigoureux d'autant plus que le mois de janvier, réputé comme étant le plus froid, n'a pas connu plus de cinq jours sans dégel consécutifs (Figure 61). En revanche, le mois de février enregistre une petite période de 8 jours de gel continu du 11 au 18 février 2003.

- une période à alternances gel-dégel totalisant 67 jours, soit 18% de l'année (Figure 62). La période préhivernale à gel-dégel a commencé dans la 1^{ère} décennie de novembre 2002 (4 cycles) mais les cycles ont commencé à devenir nombreux dès la 1^{ère} décennie de décembre 2002. Ensuite le nombre de cycles de gel-dégel est resté constant, entre 2 et 10 cycles par décennie, pendant tout l'hiver. Les derniers cycles ont eu lieu entre la 1^{ère} décennie et la 2^{ème} décennie d'avril (11 cycles). La répartition des jours selon l'intensité du gel est la suivante (Figure 61) :

⁸⁶ Record observé sur la France depuis 1950.

⁸⁷ Calculée ici sur la saison 2002-2003.

- gels faibles ($0\text{ °C} \geq T_{\min} > -5\text{ °C}$) : 63 jours soit 17% de l'année.
- gels moyens ($-5\text{ °C} \geq T_{\min} > -10\text{ °C}$) : 17 jours soit 5% de l'année.
- gels forts ($T_{\min} \leq -10\text{ °C}$) : 11 jours soit 3% de l'année.

Figure 61 : Intensité et durée du gel, dans l'air, par décade, novembre 2002-avril 2003, Grande Chartreuse (945 m)

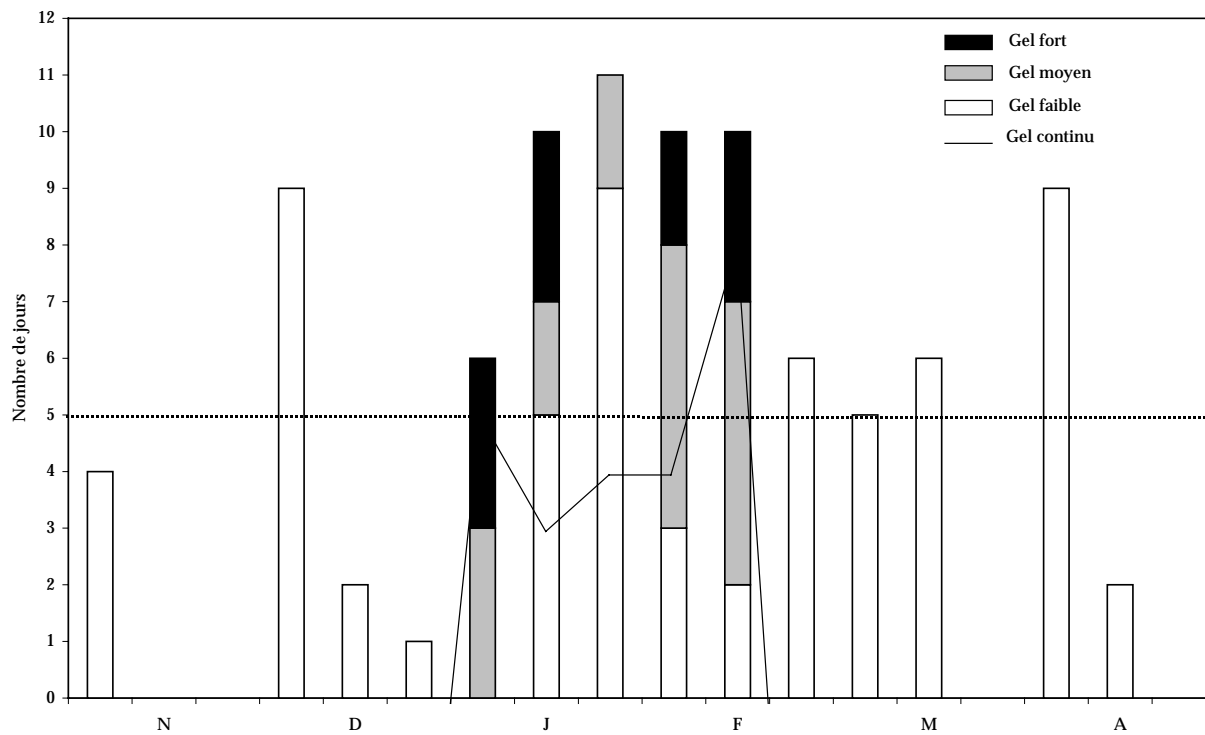
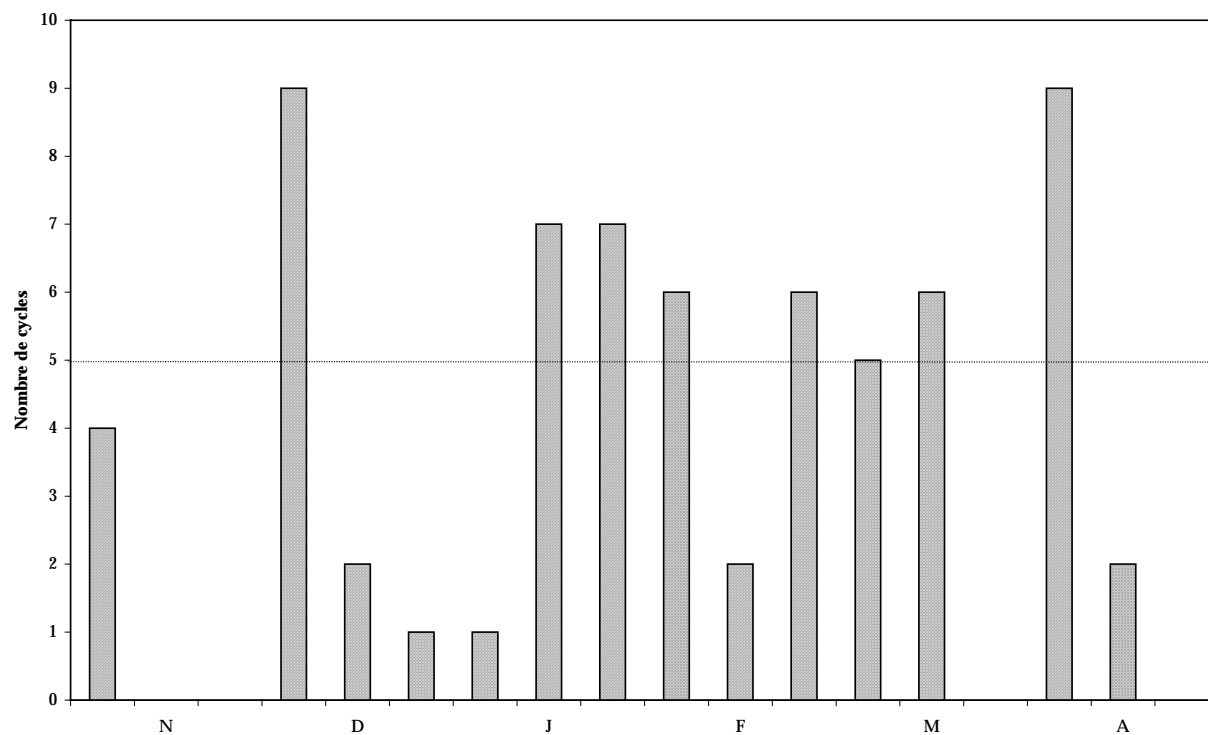


Figure 62 : Cycles de gel-dégel dans l'air, par décade, novembre 2002-avril 2003, Grande Chartreuse (945 m)



1.1.1.2. L'année 2003-2004

La sécheresse se poursuit et l'été 2003 est marqué par une canicule qui a sévi au cours des deux premières décades du mois d'août. Cependant, c'est le mois de juin, avec un écart de +7 °C par rapport à la normale 1961-1990, devant août (5,8 °C) et juillet (2,8 °C), qui enregistre l'excédent le plus important. L'été 2003 est le plus chaud que l'on ait connu ces quarante dernières années tant pour les températures minimales que maximales. Il est significativement plus chaud pour les températures maximales (+4 °C) que les deux derniers étés les plus chauds (1983 et 1994). Mais surtout il est plus chaud pour les températures minimales de 4,1 °C (14,2 °C) que la moyenne 1961-1990⁸⁸ (10 °C) et de 1,7 °C que 1994, le deuxième été le plus chaud. Le début d'automne est assez doux et plus chaud que celui de l'année 2002-2003. Contrairement à l'automne 2002-2003, une petite période préhivernale à gel-dégel s'installe dans la 3^{ème} décade d'octobre mais elle est de courte durée et la clémence des températures se poursuit tardivement. L'entrée dans la période hivernale est plus régulière et commence dès la 1^{ère} décade de décembre. Le mois d'octobre est significativement plus froid (-2,3 °C, écart à la température moyenne mensuelle) que la normale 1961-1990. En revanche, les mois de novembre (+2,3 °C) et de décembre (+0,9 °C) sont plus chauds.

L'hiver est clément et plus chaud que l'hiver 2002-2003. La température moyenne décadaire est passée au-dessus de 0 °C à deux reprises (2^{ème} décade de janvier et 1^{ère} décade de février). Dans la 1^{ère} décade de février, le maxima décadaire moyen atteint 9,3°C, le minima décadaire moyen est de 0,4 °C et la température moyenne est proche de 5 °C. Au cœur de l'hiver, les minima décadaires moyens ont été plus élevés que ceux de l'hiver précédent. Seules les températures minimales des 3^{ème} décades de janvier et février sont descendues au-dessous de -5 °C contre 4 décades pour l'hiver 2002-2003.

L'hiver 2003-2004 est légèrement plus long mais irrégulier (la cyclicité décadaire est très marquée), la température moyenne décadaire passe au-dessous de 0 °C de la 1^{ère} décade de janvier à la 2^{ème} décade de mars incluse, soit deux mois et demi. Plus contrastée que la précédente, mais d'une durée équivalente, la période de gel-dégel prévernale enregistre un léger réchauffement dans la 2^{ème} décade de mars où la température moyenne décadaire atteint 7 °C. Elle se prolonge ensuite jusqu'à la 2^{ème} décade d'avril où les températures minimales deviennent positives. Le début de printemps est assez doux jusqu'à la 1^{ère} décade de mai puis les températures moyennes augmentent rapidement. Il est marqué par deux pointes thermiques (2^{ème} décade de mars et 3^{ème} décade d'avril) espacées de 3 décades. Par ailleurs, ce phénomène apparaît dès le mois de février. Le mois de juin est assez chaud notamment dans la 3^{ème} décade. La saison 2003-2004 a été chaude et l'hiver moins rigoureux.

La division thermique intra-annuelle est la suivante :

- deux périodes sans gel totalisant 259 jours soit 70,7% de l'année :

- une première période sans gel de 113 jours groupés de juillet 2003 au 21 octobre 2003. Celle-ci est rapidement suivie d'un nouvel épisode sans gel, de 31 jours consécutifs, qui s'étend de fin octobre à fin novembre. Les périodes préhivernale, hivernale et prévernale enregistrent 59 jours sans gel par épisodes de 2 à 16 jours consécutifs de la 1^{ère} décade de décembre 2003 à la 1^{ère} décade de mai 2004 et 2 jours sans gel, isolés, dans la 3^{ème} décade de février 2004 et la 1^{ère} décade de mars 2004.

-une seconde période sans gel de 54 jours groupés de mi-avril à juillet 2003.

⁸⁸ Et de 4°C pour la période 1961-2002 (10.35°C).

- une période sans dégel de 25 jours, soit 6,8% de l'année dont 20 jours sans dégel par épisodes de 2 à 5 jours consécutifs et 5 jours sans dégel isolés. Dans l'ensemble, cette période est sensiblement similaire à celle observée sur l'année 2002-2003. Cependant, elle est plus chaude (Figure 63).

Figure 63 : Intensité et durée du gel, par décade, octobre 2003-avril 2004, Grande Chartreuse (945 m)

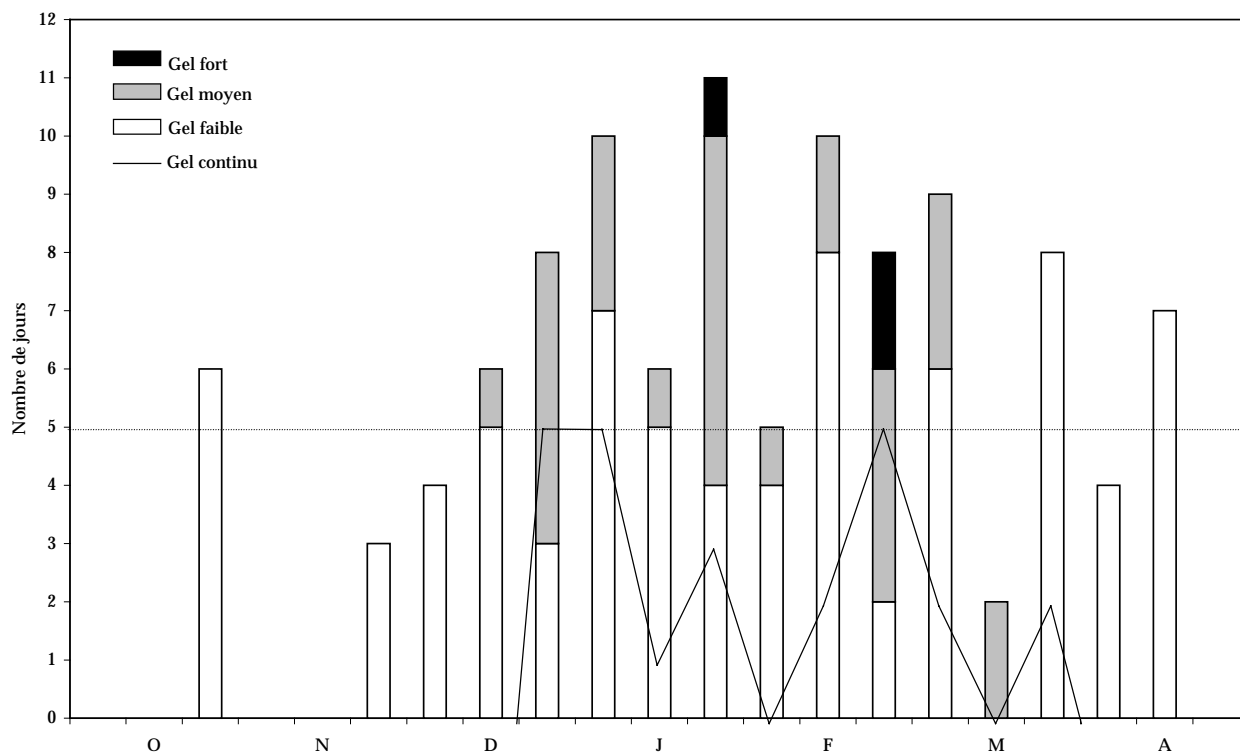
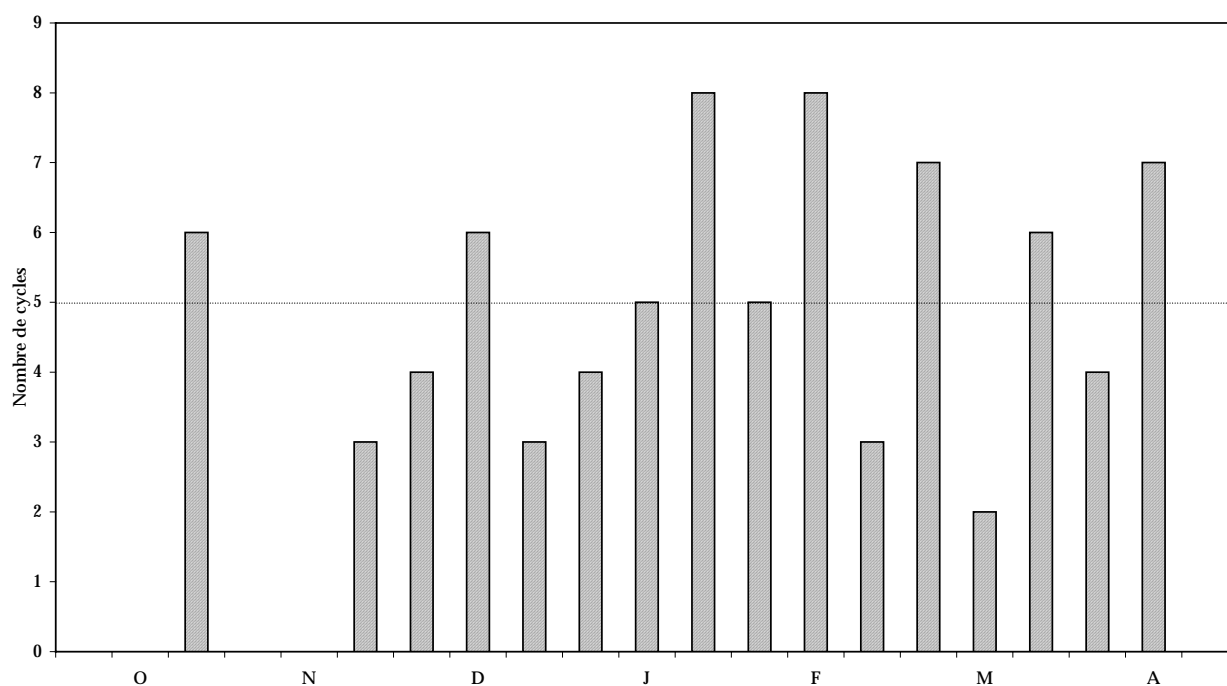


Figure 64 : Cycles de gel-dégel dans l'air, par décade, octobre 2003-avril 2004, Grande Chartreuse (945 m)



• une période à alternances gel-dégel totalisant 82 jours, soit 22% de l'année (Figure 64). La période préhivernale à gel-dégel a commencé dans la 3^{ème} décennie d'octobre 200 (6 cycles) mais s'est réellement installée à partir de la 3^{ème} décennie de novembre. Le nombre de cycles de gel-dégel est resté constant, entre 2 et 8 cycles par décennie, de la 3^{ème} décennie de novembre à la 2^{ème} décennie d'avril.

Les jours de gel se répartissent de la façon suivante selon l'intensité du froid (Figure 63) :

- gels faibles ($0\text{ °C} \geq T_{\min} > -5\text{ °C}$) : 77 jours soit 21% de l'année.
- gels moyens ($-5\text{ °C} \geq T_{\min} > -10\text{ °C}$) : 28 jours soit 7,6% de l'année.
- gels forts ($T_{\min} \leq -10\text{ °C}$) : 3 jours soit 0,8% de l'année.

1.1.2. La situation vers 1647 m (petit adret, exposition WSW) : La Plagne

A cette altitude, la température moyenne annuelle avoisine les 7°C (6,9°C pour la saison 2002/2003 et 7,3°C pour 2003/2004). Malgré une courte période de données manquantes⁸⁹, sur les deux années de mesures, l'essentiel du régime thermique a été cerné (Figure 65). Les données manquantes ont été estimées à partir de la série climatique du poste de la Grande Chartreuse (945 m). Nous restituons ici brièvement l'ambiance climatique en insistant sur le gel.

1.1.2.1. L'année 2002-2003 : une année chaude et sèche

L'été est plus frais qu'à la Grande Chartreuse. Les températures moyennes et mini décennales sont inférieures à celles observées à 945 m (Figures 66 et 67). La température moyenne décennale ne dépasse que très rarement le seuil des 15 °C (Figures 65 et 66). En revanche, les amplitudes thermiques sont très marquées à La Plagne et les maxima décennales avoisinent régulièrement les 25 °C (Figures 65 et 68). L'automne est doux avec cependant deux périodes de refroidissement marqué dans la 3^{ème} décennie de septembre et la 1^{ère} décennie de novembre (Figure 65). La fin de l'automne est plus fraîche, les températures minimales décennales sont proches de 0 °C et la température moyenne ne franchira plus la barre des 5 °C. Le refroidissement de la 1^{ère} décennie de décembre marque l'entrée dans l'hiver. A cette altitude le froid reste tout de même modéré. Les températures moyennes décennales ne sont jamais descendues en dessous de -5 °C (Figure 65) et les maxima décennales moyens sont supérieurs à 0 °C pendant tout l'hiver, atteignant 14,6 °C pour la 2^{ème} décennie de janvier et 11,1 °C pour la 1^{ère} décennie de février. Comme pour la Grande Chartreuse (Figures 60 et 66), l'hiver est également assez court. La température moyenne décennale ne passe durablement au-dessous de 0 °C que de début janvier à fin février, soit uniquement deux mois (Figure 65). Les cycles à alternances gel-dégel sont nombreux dans toutes les décennales de novembre à avril (Figure 69). La période de gel-dégel prévernale est assez courte, elle débute dès la 2^{ème} décennie de mars et se prolonge jusqu'à la 2^{ème} décennie d'avril où les températures minimales deviennent positives. Le printemps est marqué par des températures exceptionnellement chaudes dès la 2^{ème} décennie d'avril et par de fortes amplitudes thermiques (Figure 65). Celles-ci sont assez proches des températures estivales où les maxima décennales moyens dépassent régulièrement les 20 °C à partir de la 2^{ème} décennie d'avril. Le mois de mai est le plus chaud, la sécheresse s'installe durablement et annonce déjà la fameuse canicule de l'été 2003 (Figure 65).

⁸⁹ Du 10 juillet 2003 au 4 août 2003.

Graphique 65 : Régime thermique de La Plagne (1647 m), températures de l'air maximale, minimale et moyenne décadaires, relevées sous abri (juillet 2002-juin 2004).

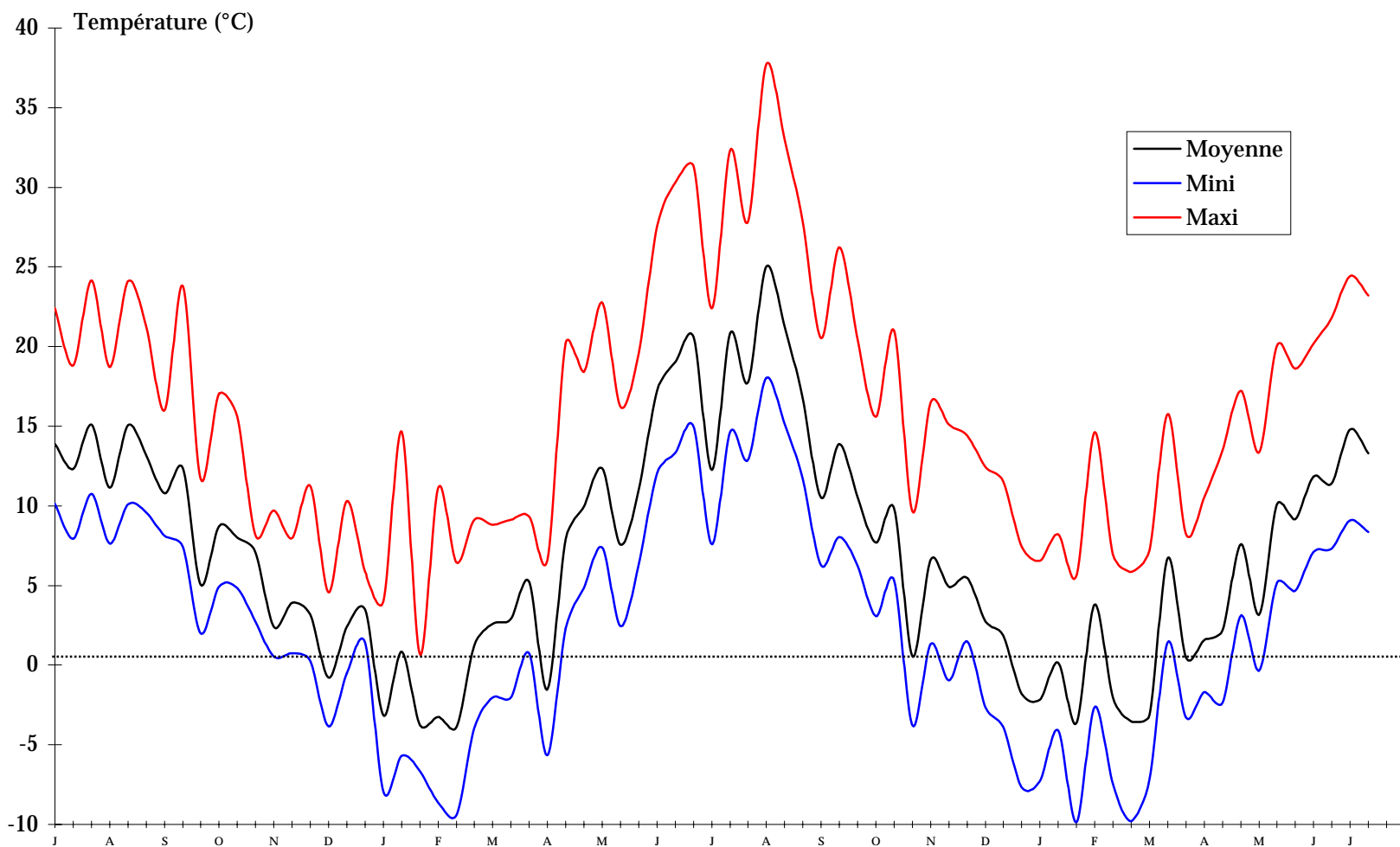


Figure 66 : Etagement des écarts thermiques dans l'air selon l'altitude, de 945 m à 1647 m.
Juillet 2002-Juin 2004, moyennes décadaires.

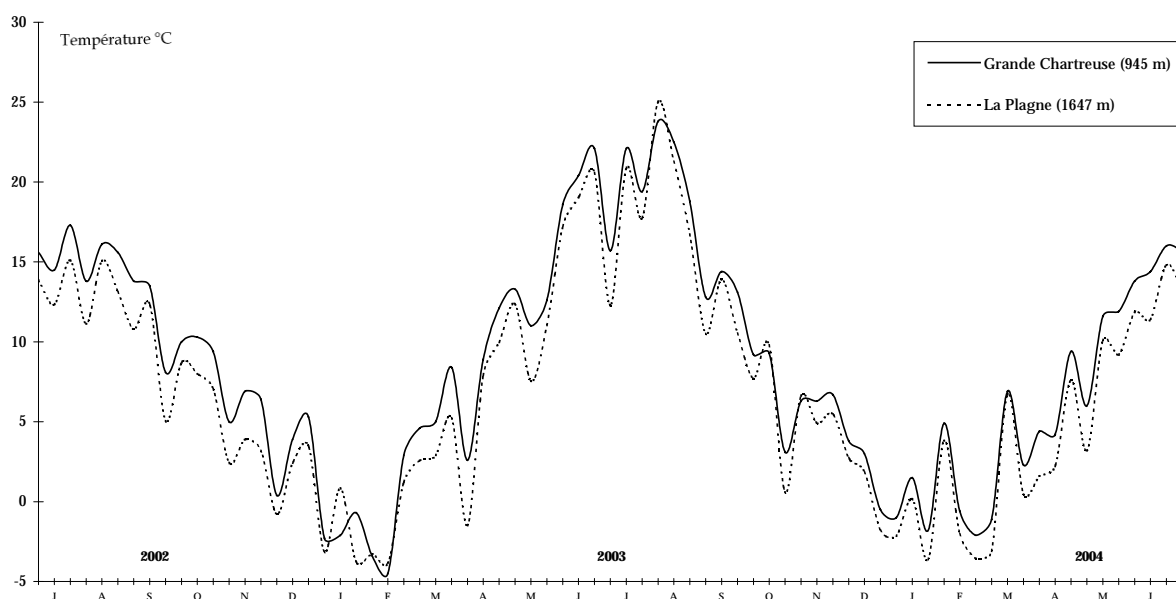


Figure 67 : Etagement des écarts thermiques dans l'air selon l'altitude, de 945 m à 1647 m.
Juillet 2002-Juin 2004, minima décadaires.

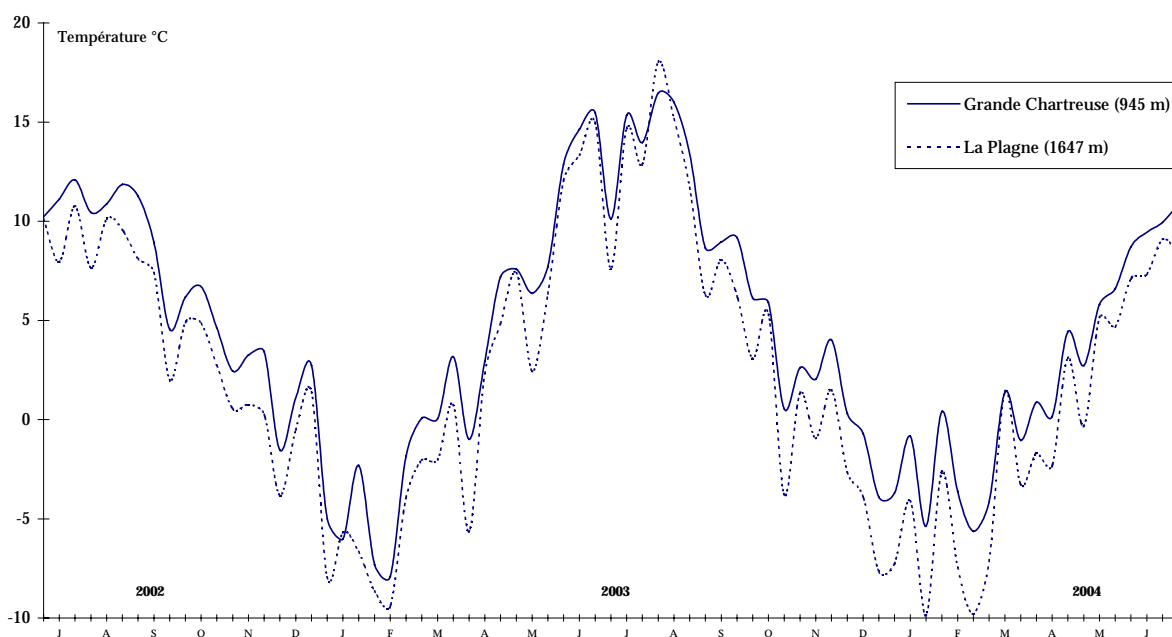
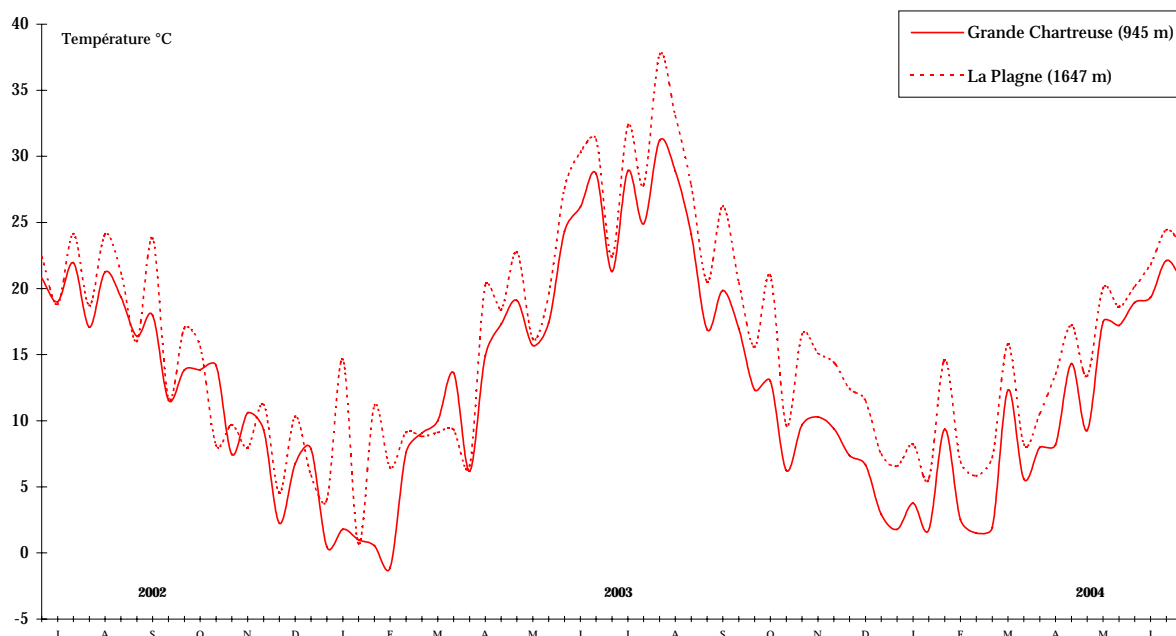


Figure 68 : Etagement des écarts thermiques dans l'air selon l'altitude, de 945 m à 1647 m.
Juillet 2002-Juin 2004, maxima décadaires.



Les mois de janvier et de février ont été les plus froids (Figure 65). La température moyenne « annuelle » s'est élevée à 6,9 °C, les minima décadaires moyens sont demeurés franchement négatifs au cours des deux premières décades de décembre 2002 puis de janvier à la mi-mars 2003, soit l'équivalent de 3 mois sur 12 (le minimum absolu a été de -17,4 °C le 01 février 2003 à 5 h TU). En ce qui concerne les températures moyennes et minimales décadaires, le régime thermique de La Plagne est régulièrement inférieur à celui de la Grande Chartreuse (Figures 66 et 67) mais l'allure des courbes est assez similaire. Au contraire, les maxima sont franchement plus élevés sur presque toute l'année et notamment au cœur de l'hiver et l'amplitude thermique est très marquée (Figure 68). Cela traduit les particularités topoclimatiques du site, exposé SW en position de petit adret.

A La Plagne, l'année thermique 2002-2003 présente les divisions suivantes :

- deux périodes sans gel totalisant 241 jours soit 66% de l'année :

- une première période sans gel de 85 jours groupés de juillet 2002 à mi-septembre 2002. Les périodes pré hivernale, hivernale et prévernale enregistrent 73 jours sans gel par épisodes de 2 à 8 jours consécutifs de la mi-septembre 2002 à la mi-avril 2003 et 6 jours sans gel, isolés, de mi-septembre 2002 à mi-avril 2003.

- une seconde période sans gel de 77 jours groupés de mi-avril à juillet 2003.

- une période sans dégel de 24 jours, soit 6,6% de la saison dont 20 jours sans dégel par épisodes de 2 à 5 jours consécutifs et 4 jours sans dégel isolés. Les jours de gel continu sont les plus nombreux entre la 3^{ème} décade de janvier et la 2^{ème} décade de février (Figure 69).

Figure 69 : Intensité et durée du gel, dans l'air, par décade, septembre 2002-mai 2003, La Plagne, 1647 m.

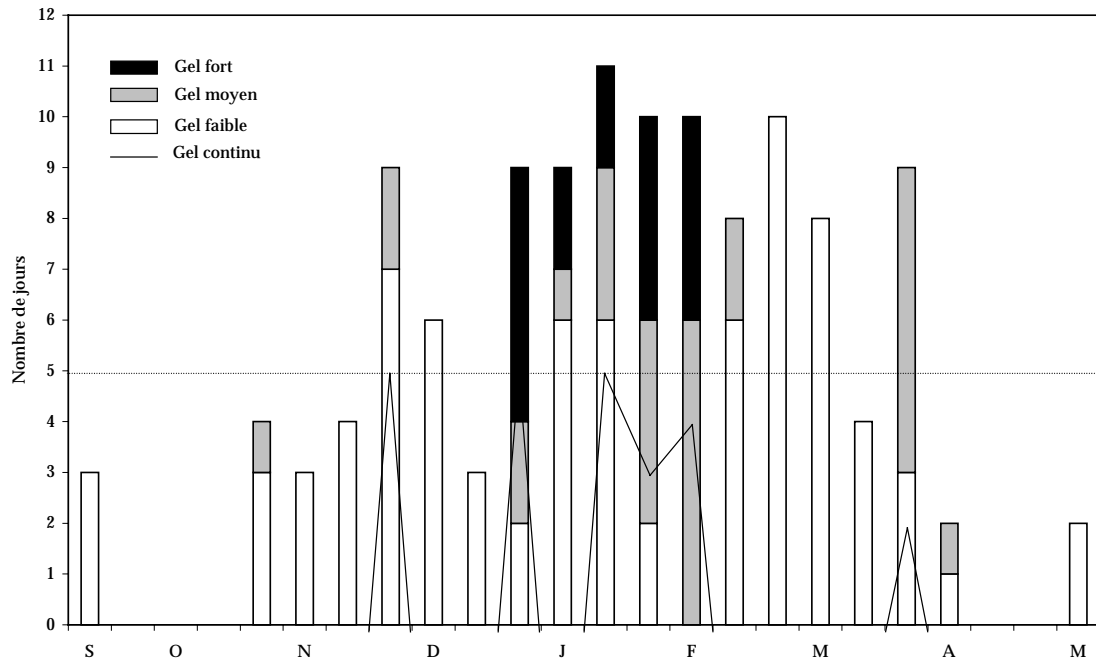
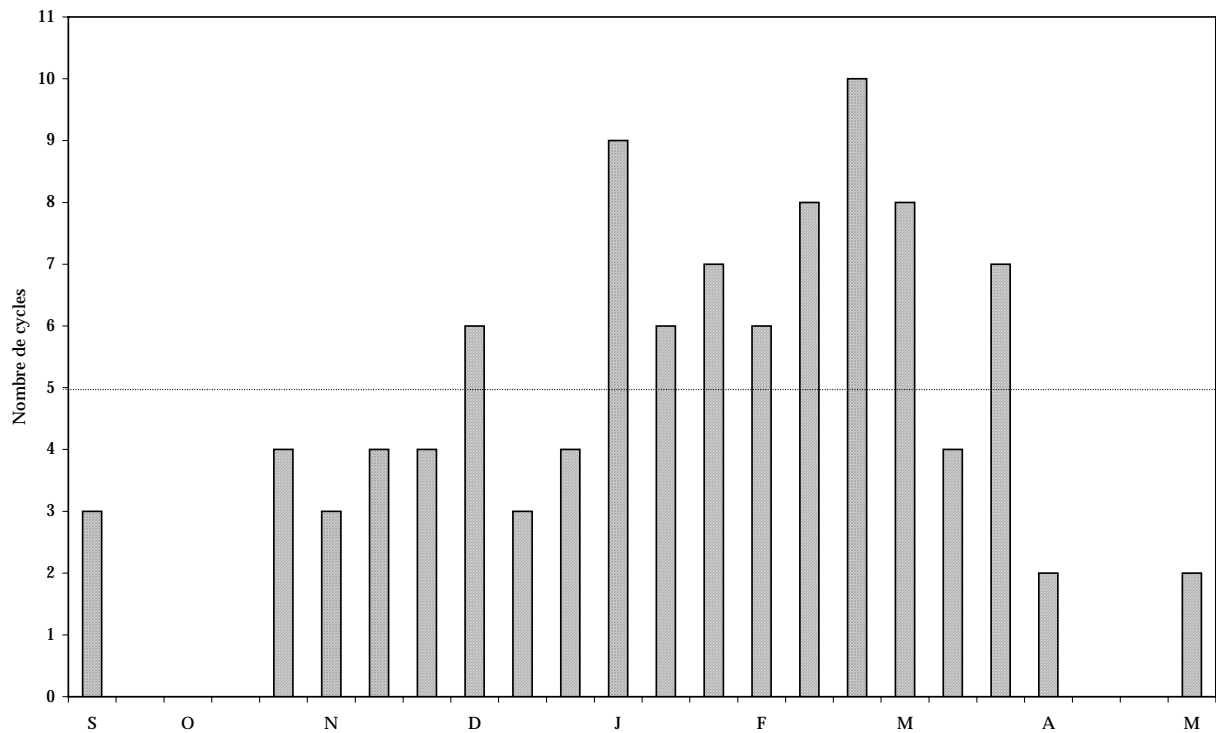


Figure 70 : Cycles de gel-dégel dans l'air, par décade, septembre 2002-mai 2003, La Plagne, 1647 m.



Il y a eu une période très froide où les minima quotidiens ont été inférieurs à -10 °C , avec 5 jours de gel continu du 04/01/2003 au 08/01/2003.

Dans l'ensemble, nous ne pouvons pas dire que l'hiver ait été très rigoureux d'autant plus que le mois de janvier, réputé comme étant le plus froid, n'a pas connu plus de cinq jours sans dégel consécutifs (Figure 69).

- une période à alternances gel-dégel totalisant 100 jours, soit 27,4% de l'année (Figure 70). La répartition mensuelle des cycles est hétérogène et croissante de novembre à février (11 en novembre, 13 en décembre, 19 en janvier et 21 en février). C'est le mois de mars qui totalise les cycles les plus nombreux (22 cycles) et il faut attendre la 2^{ème} décennie d'avril pour observer un net ralentissement. La période préhivernale à gel-dégel a commencé dans la 3^{ème} décennie de septembre 2002 (3 cycles) mais les cycles ont commencé à devenir nombreux dès la 1^{ère} décennie de novembre 2002. Ensuite le nombre de cycles de gel-dégel a oscillé entre 4 et 10 cycles par décennie, pendant tout l'hiver. Le cœur de l'hiver a été plus marqué par les cycles de gel-dégel que par les jours à gel continu (19 contre 10 en janvier), cela témoigne de la faible vigueur de l'hiver mais aussi de la prédominance des alternances gel-dégel à cette altitude. La 2^{ème} décennie de mai enregistre 2 cycles de gel-dégel (gels faibles).

La répartition des jours selon l'intensité du gel est la suivante (Figure 69) :

- gels faibles ($0\text{ °C} \geq T_{\min} > -5\text{ °C}$) : 79 jours soit 21,6% de la saison. Seule la 2^{ème} décennie de février n'a pas connu de jour de gel faible.
- gels moyens ($-5\text{ °C} \geq T_{\min} > -10\text{ °C}$) : 28 jours soit 7,7% de la saison. Groupés au cœur de l'hiver, ils sont aussi nombreux au sein des périodes préhivernales et prévernales.
- gels forts ($T_{\min} \leq -10\text{ °C}$) : 17 jours soit 4,6% de la saison groupés de la 1^{ère} décennie de janvier à la 2^{ème} décennie de février.

A La Plagne, l'hiver a été en moyenne légèrement plus froid qu'à la Grande Chartreuse à l'exception de la 2^{ème} décennie de janvier et des 2^{ème} et 3^{ème} décennies de février (inversions thermiques topoclimatiques, figures 66, 67 et 68). La durée du gel est plus longue (environ 1 mois et demi) et les premières gelées débutent dès la 2^{ème} décennie de septembre (Figures 61 et 69). Les périodes sans dégel sont équivalentes (24 jours) mais les cycles sont parfois plus long à 945 m. Cela s'explique par la configuration topographique du site de la Grande Chartreuse qui est légèrement encaissé, en position d'ubac. La répartition des jours selon l'intensité du gel ne montre pas de différences extrêmement marquées. En revanche, à La Plagne, les alternances gel-dégel sont nombreuses et leur répartition plus homogène (Figures 62 et 70).

1.1.2.2. L'année 2003-2004 : une année froide et humide

La canicule de l'été 2003 n'a pas épargné le site de La Plagne (Figure 65). La température moyenne de la 1^{ère} décennie d'août est de 25 °C , la température minimale de 18 °C et la température maximale atteint $37,7\text{ °C}$. Le maximum absolu a été de $39,6\text{ °C}$ (le 13 août 2003 à 13h TU)! Les valeurs sont largement supérieures à celles enregistrées par le poste de la Grande Chartreuse (Figures 66, 67 et 68). Comme pour la saison 2002-2003, les maxima de La Plagne sont régulièrement supérieurs à ceux de la Grande Chartreuse et parfois de plusieurs degrés sur toute l'année (Figure 68). Le début d'automne est aussi assez doux et plus chaud que celui de la saison 2002-2003. Les amplitudes thermiques sont très marquées et les minima élevés (Figure 65). Les premières alternances gel-dégel automnales commencent plus tardivement (1^{ère} décennie d'octobre) mais deviennent nombreuses dès la 3^{ème} décennie d'octobre (Figures 71 et 72). L'entrée dans la période hivernale est plus régulière et l'hiver s'installe durablement assez rapidement, dès la 3^{ème} décennie de décembre. L'hiver est plus rigoureux que le précédent mais reste tout de même modéré.

Il est aussi plus long mais irrégulier. La température moyenne décadaire est passée au-dessous de 0 °C de la 3^{ème} décade de décembre à la 1^{ère} décade de mars, soit deux mois et demi. Les minima sont inférieurs à 0 °C depuis le début du mois et atteignent -10 °C à deux reprises, dans les troisièmes décades de janvier et février (Figure 65). A partir de la 2^{ème} décade de janvier, la cyclicité décadaire est très marquée et les amplitudes thermiques élevées. Dans la 1^{ère} décade de février, le maxima décadaire moyen atteint 14,6 °C, le minima décadaire moyen est de -2,6 °C et la température moyenne est proche de 4 °C. Au cœur de l'hiver, les minima décadaires moyens ont été plus élevés que ceux de l'hiver précédent.

Plus contrastée que la précédente et d'une durée plus longue, la période de gel-dégel prévernale enregistre un léger réchauffement dans la 2^{ème} décade de mars où la température moyenne décadaire atteint 6,9 °C. Elle se prolonge ensuite jusqu'à la 3^{ème} décade d'avril où les températures minimales deviennent positives. Le début de printemps est assez doux jusqu'à la 1^{ère} décade de mai puis les températures moyennes augmentent rapidement. Le mois de juin est assez chaud.

L'année thermique se fractionne de la manière suivante :

- deux périodes sans gel totalisant 229 jours soit 62,7% de l'année :

- une première période sans gel de 96 jours groupés de juillet 2003 au 4 octobre 2003. Celle-ci est rapidement suivie d'un nouvel épisode sans gel, de 12 jours consécutifs, dans la 2^{ème} décade d'octobre. Les périodes préhivernale, hivernale, prévernale et vernale enregistrent 62 jours sans gel par épisodes de 2 à 12 jours consécutifs de la 2^{ème} décade d'octobre 2003 à la 2^{ème} décade de mai 2004 et 8 jours sans gel, isolés, en octobre, novembre, décembre et février.

- une seconde période sans gel de 51 jours groupés du 24 mai 2004 au 13 juillet 2004.

- une période sans dégel de 28 jours, soit 7,7% de l'année dont 19 jours sans dégel par épisodes de 3 à 5 jours consécutifs (les épisodes de 3 jours consécutifs sont les plus nombreux) et 9 jours sans dégel isolés. Dans l'ensemble, cette période est plus longue que celle observée sur l'année 2002-2003 (Figure 71).

- une période à alternances gel-dégel totalisant 122 jours, soit 33,4% de l'année (Figure 72). La période préhivernale à gel-dégel a commencé dans la 1^{ère} décade d'octobre 2003 (3 cycles) mais s'est réellement installée à partir de la 3^{ème} décade d'octobre. Le nombre de cycles de gel-dégel est resté constant, entre 3 et 9 cycles par décade, de la 3^{ème} décade d'octobre à la 1^{ère} décade d'avril.

Les jours de gel se répartissent de la façon suivante, selon l'intensité du froid (Figure 71) :

- gels faibles ($0\text{ °C} \geq T_{\min} > -5\text{ °C}$) : 89 jours soit 24,4% de l'année. Les jours de gel faible sont plus nombreux (77 en 2002-2003 et 79 pour la Grande Chartreuse, la même année).
- gels moyens ($-5\text{ °C} \geq T_{\min} > -10\text{ °C}$) : 50 jours soit 13,7% de l'année. Les jours de gel moyen sont presque deux fois plus nombreux qu'en 2002-2003 (28 jours et 28 jours pour la Grande Chartreuse).
- gels forts ($T_{\min} \leq -10\text{ °C}$) : 11 jours soit 3% de l'année. Les jours de gel fort sont moins nombreux qu'en 2002-2003 (17 jours contre 3 pour la Grande Chartreuse).

Figure 71 : Intensité et durée du gel, dans l'air, par décade, octobre 2003-mai 2004, La Plagne, 1647 m

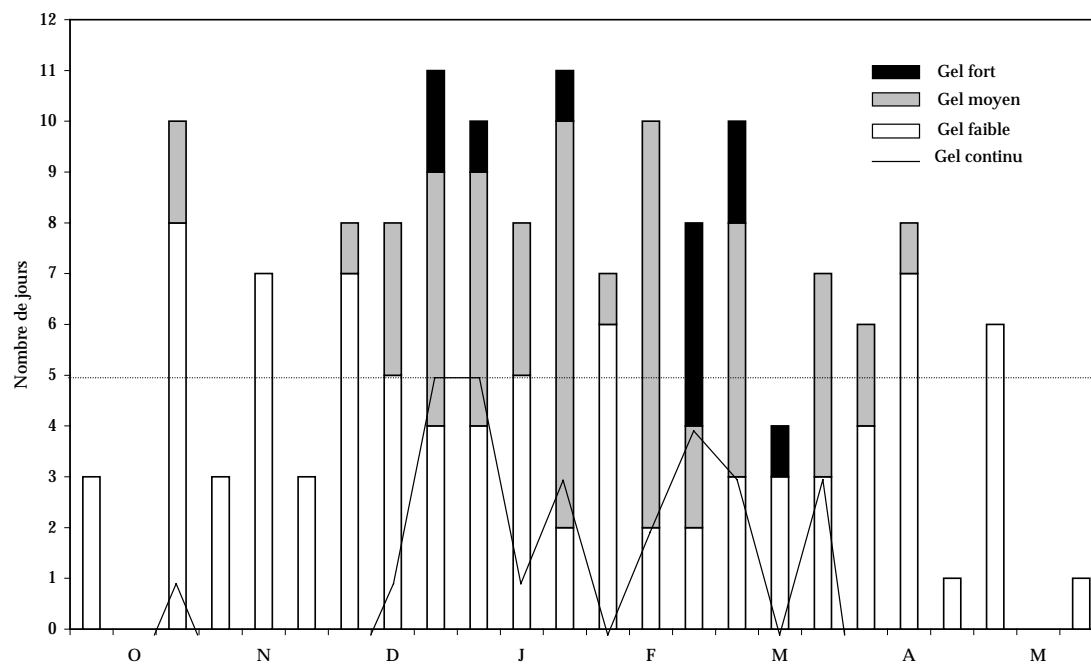
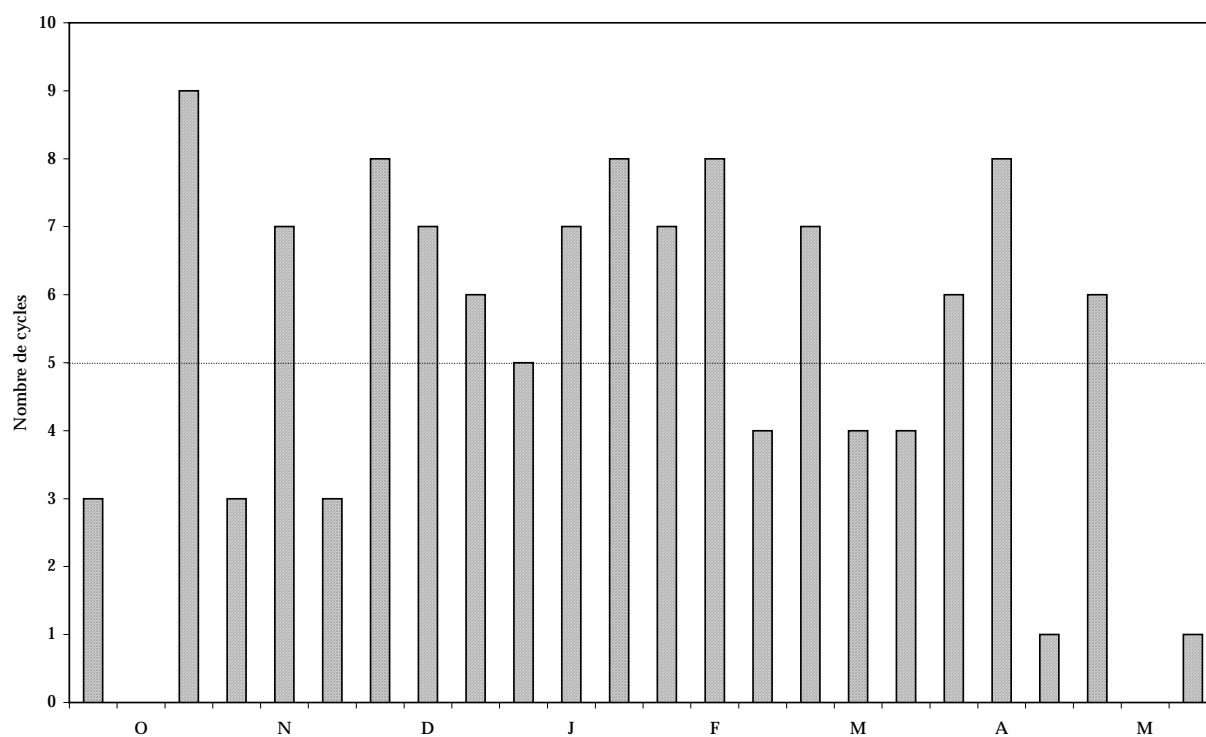


Figure 72 : Cycles de gel-dégel dans l'air, par décade, octobre 2003-mai 2004, La Plagne, 1647 m



1.1.3. Un étagement thermique de faible ampleur

1.1.3.1. L'étagement d'après les températures moyennes

Le phénomène de décroissance thermique avec l'augmentation de l'altitude est bien connu et ne sera pas développé ici. Retenons toutefois les moyennes annuelles suivantes :

- à 945 m : environ 9 °C
- à 1647 m : environ 7 °C

Ces valeurs sont sensiblement similaires à celles observées par ROVERA (1990), en Moyenne Tarentaise :

- à 850 m : environ 9 °C
- à 1500 m : environ 6 °C.

1.1.3.2. L'étagement des périodes thermiques intra-annuelles

A. La période sans dégel

Sur les deux années de mesures, elle n'augmente pas réellement avec l'altitude. A 945 m (ubac), elle oscille entre 6% et 6,8% de l'année et entre 6,6% et 7,7% pour La Plagne, à 1647 m (petit adret). D'autre part, dans les deux cas, les périodes sans dégel sont courtes et dépassent rarement 5 jours consécutifs.

En Chartreuse, pour l'année 1993-1994, vers 1320 m (Col de Porte), la période sans dégel représentait environ 11, 5% de l'année et les épisodes sans dégel pouvaient atteindre 8 jours consécutifs (POULIN, 1994). A La Plagne, la durée de la période sans dégel est fortement influencée par l'exposition mais aussi par le réchauffement thermique des dernières décennies (Chapitre 1, 3.3.3.1, C). Il y a quinze ans, en Moyenne Tarentaise, la période sans gel représentait environ 5% de l'année vers 800 m (Bourg Saint Maurice, 865 m, bas adret) et 11% à 1350 m (Peisey-Nancroix, ouest). De plus, les périodes sans dégel pendant plus de 10 jours consécutifs occupaient 8% de l'année à 1350 m et moins de 5% vers 800 m (ROVERA, 1990).

B. La période à alternances gel-dégel

A 945 m ou à 1647 m, il est difficile de distinguer plusieurs périodes bien individualisées. Effectivement, comme ROVERA (1990) et POULIN (1994), nous pouvons considérer qu'elle se scinde en deux séquences principales sur l'année, l'une pré-hivernale et l'autre pré-vernale mais les cycles demeurent nombreux dans toutes les décades d'octobre à avril. A ces altitudes, les périodes pré-hivernale et pré-vernale à gel-dégel se rejoignent au cœur de l'hiver.

Elle augmente avec l'altitude et est sensible à l'exposition. L'augmentation des amplitudes thermiques observées à La Plagne au cours des phases de transition automne/hiver et hiver/printemps illustre parfaitement le phénomène (Figure 65). De plus, les différences observées, entre les deux stations, dans l'amplitude des températures maximales sur l'ensemble des deux années de mesures confirment nos propos (Figure 68). A 1647 m, le nombre de jours de gel-dégel représente presque 1/3 de l'année (27,4% pour 2002-2003 et 33,4% pour 2003-2004) et oscille entre 18% et 22% à 945 m.

A l'inverse, ROVERA (1990) obtenait des valeurs comprises entre 30 et 35% vers 800 m (bas adret) et 28% à 1350 m (exposition ouest). En Chartreuse, à 1320 m, la période représentait environ 24,4% de l'année (POULIN, 1994).

Nos observations, surtout celles portant sur l'année 2003-2004 à La Plagne, se rapprochent de celles de P. GABERT (1971 in FRANCOU, 1988) qui aux environs de Vars, dans les Hautes-Alpes, a dénombré 120 cycles de gel-dégel par an à 1800 m (33% de l'année). Plus récemment, dans les Alpes du Sud (Draix, 800 m), ROVERA et ROBERT (2005) ont dénombré de novembre 2000 à avril 2001, 114 cycles de gel-dégel⁸⁶. A La Plagne, sur les deux années de mesures, les cycles ont été respectivement de 100 et 122. Ces observations sont-elles simplement liées à l'exposition du site, au fait que l'année 2003 ait été exceptionnellement chaude ou s'agit-il aussi d'un effet lié au réchauffement climatique, qui entraînerait un décalage vertical de leur nombre? Sur la période 1961-2004, à 945 m, nous savons qu'il y a eu une diminution du nombre annuel de jours de gel (surtout les gels forts), une diminution du nombre de cycles gel-dégel et une diminution du nombre de jours de gel continu (Chapitre 1, 3.3.3.1, C). Nous pensons que l'étage infra-périglacière a certainement connu une évolution semblable et il est probable qu'elle se traduise notamment, pour un temps, par une augmentation du nombre d'alternances gel-dégel. Les amplitudes thermiques intra- et inter-annuelles sont extrêmement marquées (Figures 65, 66, 67 et 68) et l'évolution devrait se poursuivre dans ce sens. Ce phénomène est accentué par l'exposition du site.

Conséquences pour la gélifraction des corniches urgoniennes et l'alimentation du tablier d'éboulis dans l'étage infra-périglacière? Si les amplitudes thermiques restent fortes et que la durée mais surtout l'intensité du froid sont encore suffisantes (gels forts et moyens), la gélifraction devrait être plus active. Au contraire, et il semblerait que l'évolution se fasse dans ce sens, si les amplitudes thermiques restent fortes, se stabilisent ou encore diminuent (sous l'effet du réchauffement thermique) mais que la durée et l'intensité du froid diminuent, ce qui est déjà le cas à 945 m, cela entraînerait une réduction de la fréquence et de l'intensité du processus de gélifraction et de l'alimentation du tablier en fracts. Nous tenterons de préciser cet aspect plus loin.

C. La période sans gel

Logiquement, sa durée diminue avec l'altitude même si les écarts sont encore peu marqués. Elle représente environ 73% de l'année à 945 m et 64% à 1640 m. Les jours chauds sont davantage groupés par longues périodes à faible altitude, ainsi les jours sans gel par période de plus de 10 jours consécutifs représentent 66% de l'année à 945 m contre 51% à 1647 m.

Conclusion :

A 945 m, les conditions périglaciaires sont présentes pendant 91 jours entre la 1^{ère} décade de novembre 2002 et la 2^{ème} décade d'avril 2003 (67 jours à alternances gel-dégel et 24 jours de gel continu) et 107 jours entre la 3^{ème} décade d'octobre 2003 et la 2^{ème} décade d'avril 2004 (82 jours à alternances gel-dégel et 25 jours de gel continu) soit, 27% de l'année. A 1647 m, lorsque l'on cumule les jours sans dégel et à gel-dégel, elles sévissent pendant environ 34% de l'année. Soit, 124 jours entre la 3^{ème} décade de septembre 2002 et la 2^{ème} décade de mai 2003 (100 jours à alternances gel-dégel et 24 jours de gel continu) et 150 jours entre la 1^{ère} décade d'octobre 2003 et la 3^{ème} décade de mai 2004 (122 jours à alternances gel-dégel et 28 jours de gel continu).

En Moyenne Tarentaise, les conditions périglaciaires couvraient 33% de l'année vers 800 m et 40% à 1350 m (ROVERA, 1990) et en Chartreuse, elles atteignaient 36% à 1320 m (POULIN, 1994).

⁸⁶ Ce nombre de cycles est équivalent à celui enregistré à Marcoux, une station synoptique de Météo-France située à proximité du site (moyenne de 115 cycles sur la période 1984-1999) (ROVERA et ROBERT, 1999).

Ce qui signifie, dans le cas de la Moyenne Tarentaise, que les conditions périglaciaires vers 800 m (Bourg Saint Maurice), en situation de bas adret, étaient plus marquées qu'aujourd'hui en Chartreuse, à 945 m, en situation d'ubac encaissé.

En Chartreuse, les valeurs précises pour la période 2002-2004 étaient respectivement de 25% en 2002-2003 et 29% en 2003-2004 (alternances gel-dégel plus nombreuses) et dans les deux cas elles sont inférieures. De plus, les données utilisées par ROVERA (1990) portent sur les années 1985 et 1986. Il s'agit probablement d'un écart lié au changement climatique car la Chartreuse enregistre, depuis 1960 mais surtout depuis le début des années 90, un réchauffement thermique significatif (Chapitre 1, figure 5). L'écart des températures, à la normale 1961-1990, est plus marqué sur la période 2002-2004 que sur les années 1985 et 1986 (Chapitre 1, figure 5). Il l'est aussi à l'échelle des Alpes suisses et la Moyenne Tarentaise a certainement connu la même évolution (en tous cas vers 800 m). En Chartreuse, les conséquences sur les conditions périglaciaires ont eu pour effet d'entraîner une diminution simultanée du nombre annuel de jours de gel, des alternances gel-dégel et du nombre de jours de gel continu. De plus, la durée mais aussi l'intensité du froid (surtout les gels forts) ont diminué au cours de la même période (Chapitre 1, 3.3.3.1, C).

En Chartreuse à 945 m, les jours de gel fort ($T_{min} \leq -10^{\circ} C$) occupaient 3% de l'année en 2002-2003 et 0,8% en 2003-2004, les jours de gel moyen ($-5^{\circ} C \geq T_{min} > -10^{\circ} C$) étaient présents 5 % de l'année en 2002-2003 et 7,6% en 2003-2004 tandis que les gels faibles ($0^{\circ} C \geq T_{min} > -5^{\circ} C$) se produisaient plus du quart de l'année (17% en 2002-2003 et 21% en 2003-2004). En moyenne, ces valeurs sont respectivement de 2%, 6% et 19%. A 800m, en Moyenne Tarentaise, les valeurs données par ROVERA (1990) atteignaient 4%, 10% et 23%.

La démonstration est plus difficile à réaliser entre La Plagne (1647 m), Peisey-Nancroix (1350 m, Moyenne Tarentaise) et le Col de Porte (1320 m, Chartreuse) qui bénéficient respectivement d'une situation de petit adret, d'une exposition ouest (où les conditions climatiques sont supposées être plus froides) et d'une position de col. Toutefois, nous sommes assez proches des pourcentages établis par ROVERA (1990) et POULIN (1994) mais le topoclimat de La Plagne est particulièrement chaud.

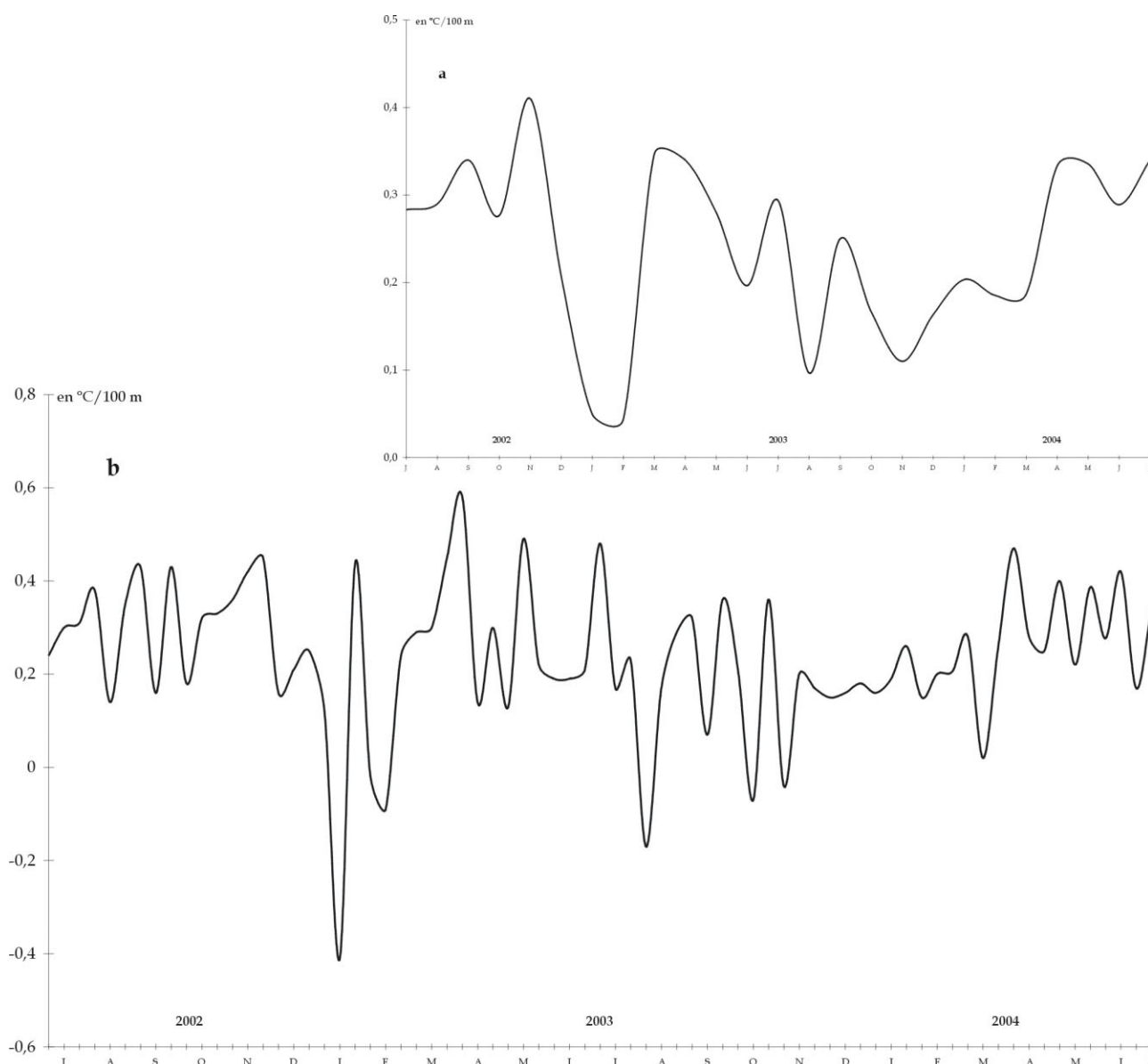
1.1.3.3. Les fluctuations de l'étagement thermique d'après le gradient vertical

Comme le souligne ROVERA (1990), l'état moyen de l'étagement déterminé à partir des températures et des périodes thermiques ne doit pas faire oublier qu'une dynamique intra-annuelle « verticale » existe. Il est fréquent de constater que certains jours, la situation thermique à 1000 m est assez proche de celle rencontrée à 2500 m, d'autres elle diffère ne serait-ce que de 1500 à 2000 m (ROVERA, 1990 ; POULIN, 1994). En Chartreuse, l'étude du gradient permet de bien restituer cette « élasticité » de l'étagement thermique qui n'est pas sans signification morphogénétique (mais peut être bioclimatique, au printemps du moins).

Entre 945 m et 1647 m, la majorité des valeurs positives est comprise entre 0,12 et 0,4 °C/100m (Figure 73b). La moyenne pour l'année 2002-2003 est de 0,26 °C/100 m contre 0,22 °C/100 m pour 2003-2004, pour une dénivellation de 702 m. Le gradient moyen pour l'année 2002-2004 est de 0,24 °C/100 m, valeur inférieure au gradient habituellement admis de 0,56 °C/100 m.

Une certaine hétérogénéité règne au sein des valeurs obtenues et il est difficile de cerner les grandes tendances des variations saisonnières intra- et inter-annuelles (Figure 73 a et b).

Figure 73 : Gradient thermique vertical entre la Grande Chartreuse (945 m) et La Plagne (1647 m), juillet 2002-juillet 2004, moyennes mensuelles (a) et décadaires (b).



A. Les variations saisonnières au cours de l'année 2002-2003

Le gradient est élevé à l'automne et au printemps (Figure 73a). En fin d'automne, il atteint 0,45 °C/100 m (3^{ème} décennie de novembre, figure 73b) et avoisine 0,6 °C/100 m en milieu de printemps (0,58 °C/100m dans la 1^{ère} décennie d'avril). Il fléchit légèrement en été (Figure 73a) et oscille en moyenne entre 0,14 et 0,38 °C/100 m. Il est cependant plus élevé au début du mois d'août (Figure 73b). Si l'on se réfère à la figure 73a, le gradient est faible en hiver. Cependant, les valeurs mensuelles masquent les effets de l'inversion thermique (Figure 73b). Dans le détail, la figure 73b nous indique qu'il est plus fort au cœur de l'hiver et notamment au cours de la 3^{ème} décennie de janvier (0,44 °C/100 m). La 2^{ème} décennie de janvier ainsi que les 1^{ère} et 2^{ème} décennies de février sont marquées par d'importantes inversions thermiques, respectivement de -0,41, -0,02 et -0,09 °C/100 m, liées à une augmentation très significative des températures maximales à La Plagne (Figures 73b, 66, 67 et 68). Ce qui permet, une fois de plus, de souligner les particularités topoclimatiques du site. Sur l'ensemble de la saison hivernale, le gradient thermique oscille entre 0,44 et -0,41 °C/100 m.

B. Les variations saisonnières au cours de l'année 2003-2004

Comme pour l'année 2002-2003, le gradient est plus fort au printemps et notamment en avril et en mai (figure 73a). Les valeurs mensuelles sont sensiblement similaires à celles de l'année 2002-2003. Il atteint une valeur de $0,47\text{ °C}/100\text{ m}$ dans la 1^{ère} décade d'avril et $0,4\text{ °C}/100\text{ m}$ dans la 1^{ère} décade de mai (Figure 73b). Au cours de l'été 2003, il est relativement faible en début et surtout en fin de saison estivale (Figure 73a) mais augmente au cœur de la saison ($0,48\text{ °C}/100\text{ m}$ dans la 1^{ère} décade de juillet, figure 73b). Le faible gradient observé en fin d'été s'explique par une inversion thermique liée à une augmentation brutale des températures, notamment maximales, à La Plagne au cours de la 1^{ère} décade d'août ($-0,17\text{ °C}/100\text{ m}$, figures 73b, 66, 67 et 68). Les faibles valeurs observées en automne (de $0,11$ et $0,25\text{ °C}/100\text{ m}$, figure 73a) sont dues à l'influence de deux inversions thermiques qui ont marqué la 2^{ème} décade d'octobre ($-0,07\text{ °C}/100\text{ m}$, figure 73b) et la 1^{ère} décade de novembre ($-0,04\text{ °C}/100\text{ m}$, figure 73b). Le gradient atteint ensuite les valeurs les plus faibles en hiver où il montre une certaine régularité (de $0,15$ à $0,26\text{ °C}/100\text{ m}$).

Finalement, sur la période étudiée, c'est au printemps que le gradient semble être le plus régulier. Les valeurs sont cependant peu élevées par rapport au gradient habituellement admis ($0,56\text{ °C}/100\text{ m}$), elles oscillent entre $0,19$ et $0,35\text{ °C}/100\text{ m}$, mais c'est en cette saison qu'il est le plus fort (Figure 73a). Les inversions thermiques sont relativement nombreuses (Figure 73b) et soulignent l'originalité du topoclimat de La Plagne où les amplitudes thermiques sont marquées toute l'année et où les températures maximales sont en général élevées car le site bénéficie d'un fort ensoleillement (Figures 65, 66, 67 et 68).

Sur l'année 1985, entre Bourg Saint Maurice (865 m) et Peisey-Nancroix (1350 m), ROVERA (1990) obtenait un gradient élevé au printemps et particulièrement en mars et avril où la moyenne mensuelle oscillait entre $0,5$ et $0,6\text{ °C}/100\text{ m}$. Il fléchissait légèrement en été (entre $0,45$ et $0,5\text{ °C}/100\text{ m}$) et surtout au début de l'automne (entre $0,1$ et $0,2\text{ °C}/100\text{ m}$) et de l'hiver où il atteignait les plus faibles valeurs ($< 0,1\text{ °C}/100\text{ m}$). Plutôt fort au mois de janvier ($0,4\text{ °C}/100\text{ m}$), il fléchissait de nouveau en février ($0,2\text{ °C}/100\text{ m}$).

Nous ne développerons pas les aspects liés à la variation du gradient thermique selon le type de temps car cela n'offre pas d'intérêt particulier dans notre cas. Signalons toutefois que le gradient est généralement plus faible sous régime anticyclonique et plus fort sous régime dépressionnaire. Les valeurs les plus faibles correspondent à des décades où l'inversion thermique est quasi-quotidienne. Au cours de ces périodes, la station de la Grande Chartreuse (ubac, fond de vallée) reçoit peu d'énergie à cause d'une couverture nuageuse assez dense alors que le versant de La Plagne bénéficie d'un réchauffement diurne important (Figure 73 b). L'opposition morphoclimatique entre bas et haut de versant est marquée au printemps (Figure 73 a et b). Le réchauffement gagne la base des versants alors que les hauts de versant demeurent froids à cause de l'enneigement persistant et des perturbations provenant de l'ouest. Le contraste peut également être fort en automne avec les premières chutes de neige.

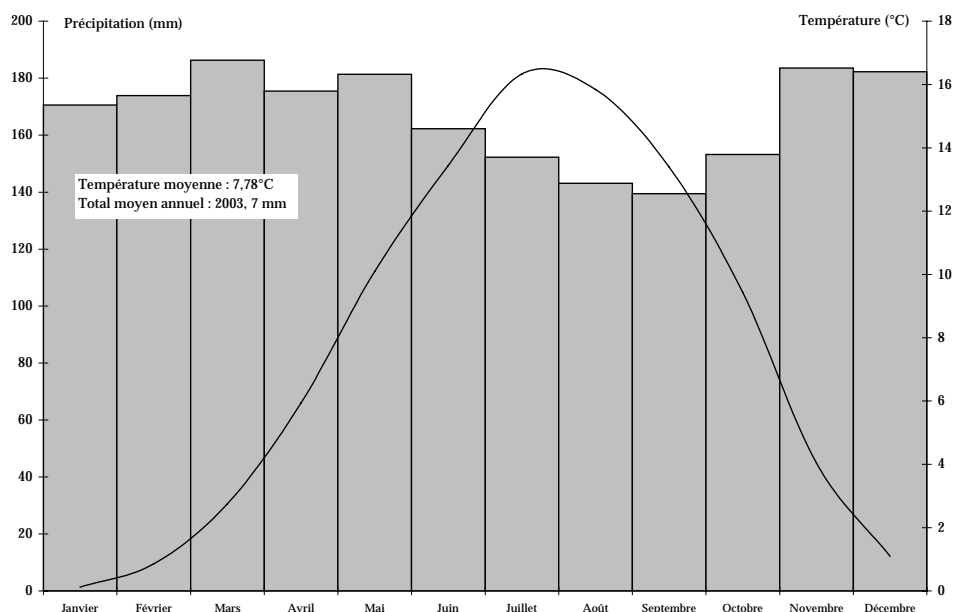
Enfin, le gradient thermique varie aussi quotidiennement. ROVERA (1990) et POULIN (1994) soulignent qu'il est en général faible la nuit et le matin entre températures minimales et fort l'après-midi entre températures maximales mais le phénomène pris isolément a peu d'intérêt morphoclimatique.

1.2. Le régime pluviométrique

1.2.1. La situation à 945 m : La Grande Chartreuse (ubac de fond de vallée)

Le massif de la Grande Chartreuse est réputé pour l'abondance de ses précipitations annuelles mais il ne présente pas un régime saisonnier marqué (Figure 74, Chapitre 1, III, 3.1.3.2 et Chapitre 3, III, 3.1, graphique 18).

Figure 74 : Diagramme ombrothermique de la Grande Chartreuse (945 m).
Températures et précipitations moyennes mensuelles pour la période 1961-1990.



La station de la Grande Chartreuse ne déroge pas à la règle puisqu'il est tombé 2117,1 mm sur l'année 2002-2003 et 1707,7 mm sur 2003-2004. Pour l'année 2003⁸⁷, elle a reçu 1508,1 mm, ce qui constitue un déficit assez important par rapport à l'année moyenne 2003,72 mm établie sur la période trentenaire 1961-1990 (année de référence météorologique, figure 74).

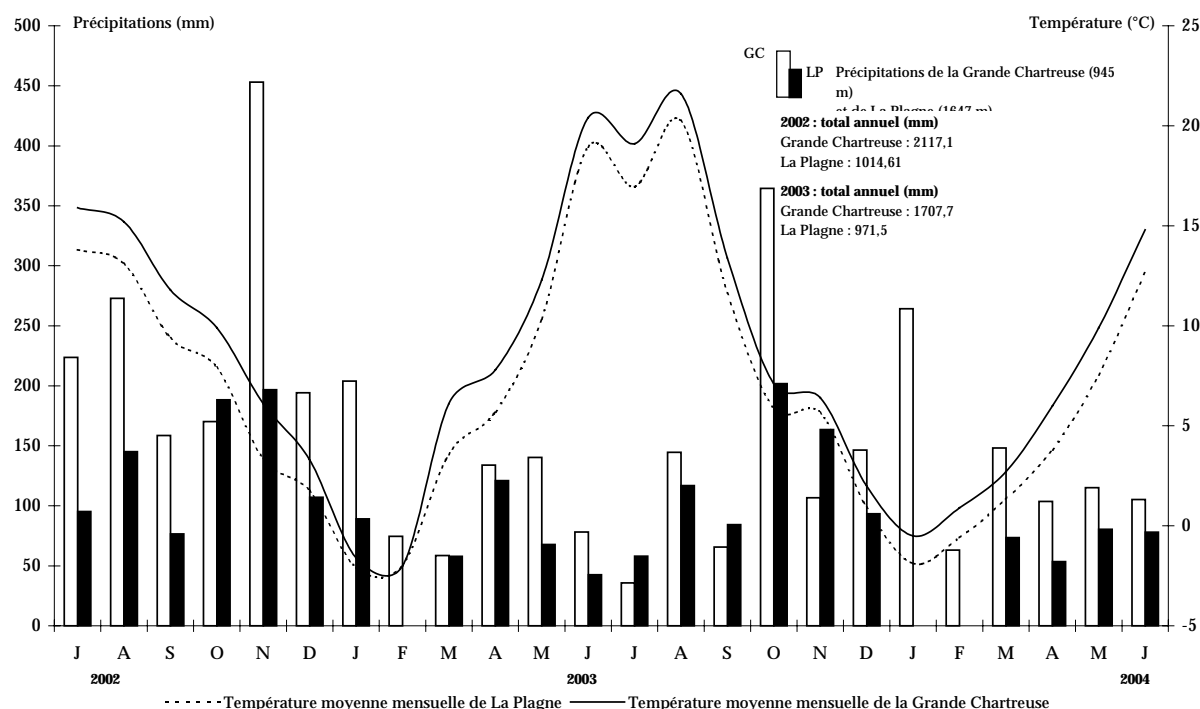
Sur l'année 2002-2004, le site présente un régime pluviométrique AHEP⁸⁸ (Figure 75) mais en général, il est plutôt de type PHAE (Figure 74). La variabilité mensuelle n'est pas extrêmement marquée et les totaux pluviométriques sont souvent supérieurs à 150 mm/mois (Figure 74). Pour la période 2002-2004, sur un total de 24 mois, 6 mois présentent un total pluviométrique supérieur à 200 mm, 9 mois > à 150 mm et 18 mois > à 100 mm (Figure 75).

Le total annuel des précipitations est presque deux fois supérieur à celui enregistré à La Plagne. Les précipitations (liquides) diminuent avec l'altitude mais sont certainement influencées par l'exposition. Les totaux mensuels sont systématiquement supérieurs pour la Grande Chartreuse à l'exception des mois de juillet, septembre et novembre 2003 (Figure 75).

⁸⁷ Il s'agit ici de l'année météorologique normale, de janvier à décembre 2003.

⁸⁸ Automne, Hiver, Été et Printemps, même si l'été 2002 est incomplet (mois de juin). L'été 2004 n'a pas été comptabilisé. Les deux saisons sont toutefois assez proches : printemps 2002-2004 : 699,7 mm et été 2002-2004 : 755,1 mm. **L'année météorologique 2003 est caractérisée par un régime AHPE.**

Figure 75 : Diagrammes ombrothermiques de la Grande Chartreuse (945 m) et de La Plagne (1647 m), données mensuelles (juillet 2002-juillet 2004)

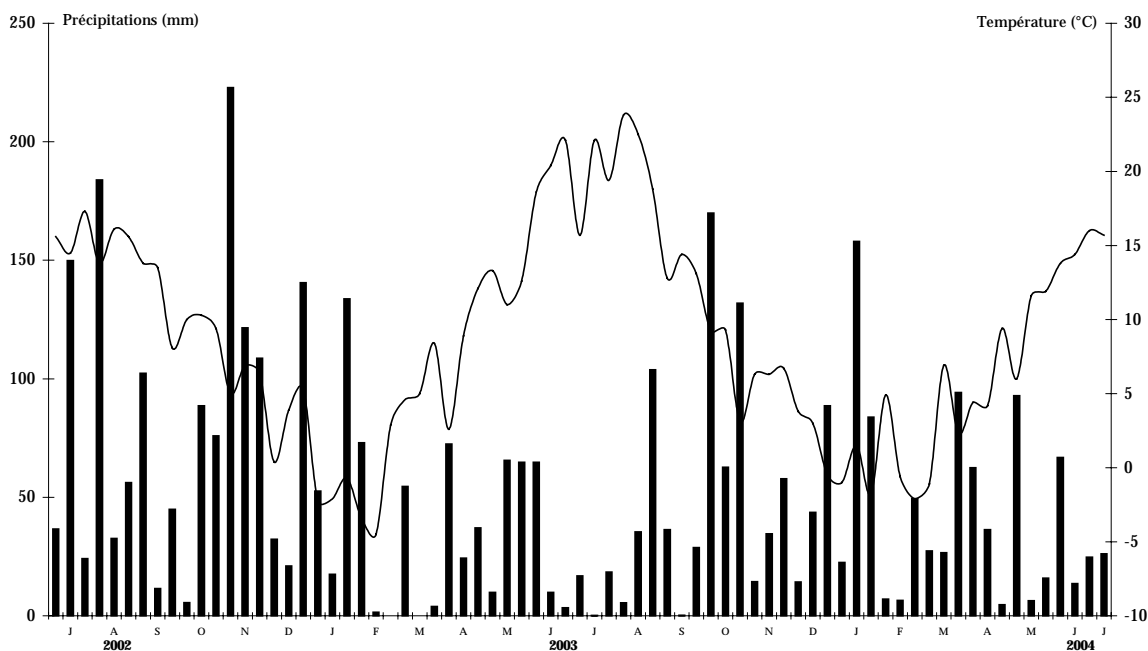


1.2.1.1. L'année 2002-2003

L'été 2002 est pluvieux ce qui explique sa relative fraîcheur (en dépit des données manquantes pour le mois de juin). Les mois de juillet et août regroupent, à eux deux, 496,6 mm, soit presque le quart du total pluviométrique annuel (Figure 75). Les précipitations sont surtout abondantes en milieu de saison (2^{ème} décennie de juillet et 1^{ère} décennie d'août, 333,8 mm, figure 76).

L'automne est pluvieux, notamment en fin de saison, et enregistre 781,9 mm (plus du tiers de l'année). Le maximum pluviométrique annuel se situe par ailleurs en cette saison (222,9 mm au cours de la 1^{ère} décennie de novembre, figure 76). Le mois de novembre totalise à lui seul 453,1 mm de précipitations. L'hiver est doux et pluvieux et tout particulièrement au cours des 3^{èmes} décades de décembre 2002 et janvier 2003 (Figure 76). Le total hivernal est de 472,6 mm avec un maximum fin décembre (140,5 mm). Ce maximum correspond d'ailleurs aux observations de HAUTBOIS (1970) et POULIN (1994) et est conforme aux données de la longue série du poste de la Grande Chartreuse, sur la période 1961-1990 (Figure 74). En revanche, la fin de l'hiver est marquée par un déficit hydrique (2^{ème} et 3^{ème} décades de février). L'écart à la normale 1961-1990 est de -99,4 mm pour le mois de février. Tout en étant un vrai hiver, il n'a pas été exceptionnel. La saison printanière présente un déficit pluviométrique de -255,3 mm par rapport à la normale 1961-1990. Le début du printemps est relativement sec. Le mois de mars n'atteint pas 60 mm (-127,8 mm/1961-1990) mais les mois d'avril et mai sont plus arrosés. Les précipitations se prolongent jusqu'en début d'été où elles connaissent un net fléchissement dès la 2^{ème} décennie de juin (9,9 mm) (Figure 76). La 3^{ème} décennie de juin est très sèche (3,4 mm).

Figure 76 : Diagramme ombrothermique de la Grande Chartreuse (945 m), juillet 2002-juillet 2004, moyennes décadaires



1.2.1.2. L'année 2003-2004

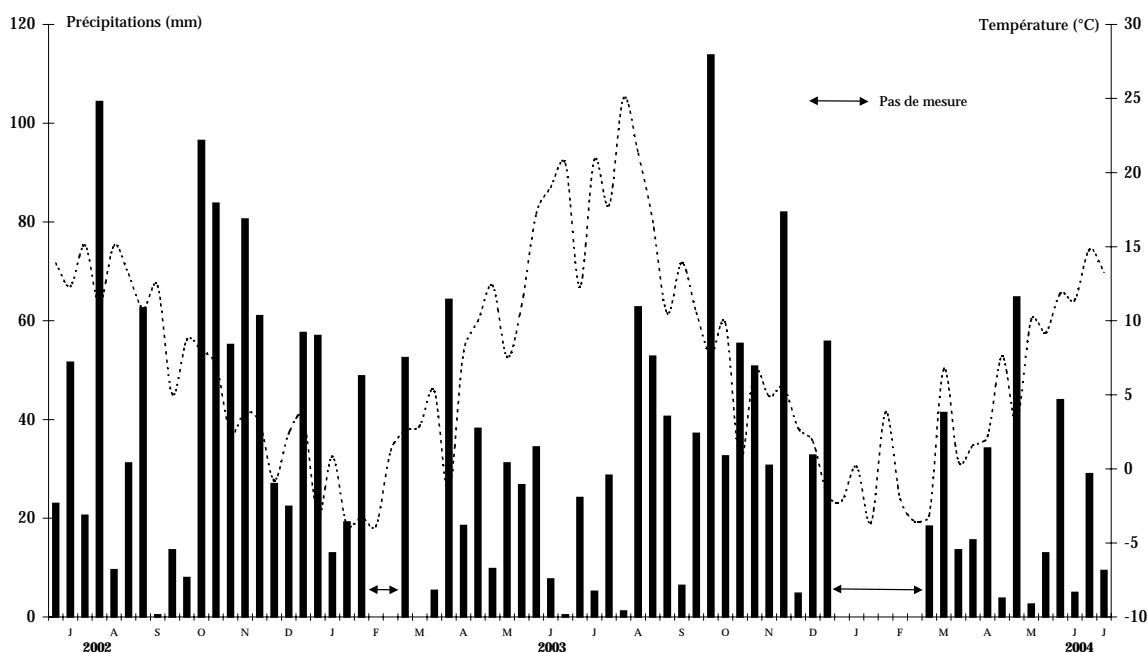
La saison estivale présente un déficit pluviométrique très marqué par rapport à la normale 1961-1990 (199,1 mm) et particulièrement au mois de juillet (-116,5 mm) (Figure 74). Les mois de juin et juillet sont secs mais la fin de l'été est plus arrosée, avec un maximum pluviométrique dans la 3^{ème} décennie du mois d'août (103,80 mm). Celui-ci provoque un fléchissement brutal des températures (Figure 76). Le mois d'août est légèrement excédentaire (+1,6 mm). Le rafraîchissement est de courte durée et le début l'automne assez sec, notamment au cours de la 2^{ème} décennie de septembre où les précipitations totalisent seulement 0,30 mm (Figure 76). Le mois d'octobre est extrêmement pluvieux (Figure 75) et particulièrement dans la 1^{ère} décennie (169,90 mm). Il s'agit par ailleurs du maximum pluviométrique de l'année (Figure 76). Par rapport à la normale 1961-1990, il est largement excédentaire avec +211,3 mm. Il l'est aussi sur l'ensemble de l'année météorologique 2003. La fin de l'automne et le début de la saison hivernale sont moins arrosées (Figures 75 et 76). Les mois de novembre et de décembre enregistrent des déficits pluviométriques respectifs de -76,8 mm et -35,8 mm par rapport à la période 1961-1990. L'hiver est légèrement plus arrosé que le précédent, 473,9 mm contre 472,6 en 2002-2003, et particulièrement au cours de la 2^{ème} décennie janvier où la station a reçu 158 mm (Figure 76). Le mois de février est plus sec et les températures plutôt clémentes (1.1.1.2.). Au printemps, la station a reçu 367 mm d'eau soit 34,3 mm de plus que l'année précédente. Le début de saison est pluvieux, douceur et fraîcheur alternent au mois de mars. Le début du mois d'avril est plus doux et sec mais une période de froid s'installe entre le 5 et le 20. Après une courte plage de douceur au cours de la 3^{ème} décennie d'avril, un ultime refroidissement sévit au cours de la 1^{ère} décennie de mai, qui reçoit 92,90 mm de précipitations (Figure 76). Le reste du mois est sous régime anticyclonique, les précipitations sont faibles et la chaleur presque estivale. En juin, la sécheresse se confirme.

1.2.2. La situation à 1647 m : La Plagne (petit adret)

A La Plagne, on constate, d'après les deux années de mesures, que les précipitations sont inférieures à celles enregistrées au poste de la Grande Chartreuse (Figure 75). La Plagne a reçu une lame d'eau totale de 1014,61 mm pour l'année 2002-2003 et 971,5 mm pour l'année 2003-2004. Nous soulignons cependant que le pluviographe placé sur le site ne disposant pas d'un cône à résistance chauffante, une partie des précipitations neigeuses a pu être perdue par débordement de la neige hors du réceptacle. D'autre part, en raison d'un risque de rupture lié au gel, les augets basculeurs ont été démontés en février 2003 (le 14) puis janvier et février 2004. Nous ne disposons pas de mesures pour ces trois mois d'hiver (Figure 77). Dans tous les cas et en estimant le total pluviométrique mensuel à 100 mm/mois (ce qui est fort probable), les totaux annuels du site restent inférieurs à ceux de la Grande Chartreuse. En revanche, cela fait de la saison hivernale la deuxième saison la plus arrosée de l'année. En dépit d'une sécheresse plus marquée sur le site, les régimes pluviométriques mensuels et saisonniers ressemblent beaucoup à ceux de la Grande Chartreuse (Figure 75).

Sur l'année 2002-2003, le site de La Plagne présente un régime pluviométrique AHPE⁸⁹ mais sur l'année 2003-2004 il est plutôt de type AHEP. Comme pour la Grande Chartreuse, sur l'année météorologique 2003, il est de type AHPE (Figure 75).

Figure 77 : Diagramme ombrothermique de La Plagne (1647m), moyennes décadaires



1.2.2.1. L'année 2002-2003

L'été 2002 est pluvieux et frais. Le mois de juillet a été légèrement plus sec mais les orages sont nombreux en août (Figure 77). Le tablier d'éboulis de La Plagne a reçu une lame d'eau de 240,4 mm avec un maximum marqué au cours de la 1^{ère} décade d'août (104,4 mm). A La Plagne, les températures maximales des 11 (8,7 °C) et 12 août (8 °C) sont exceptionnellement basses. Comme à basse altitude, l'automne est pluvieux et particulièrement à partir du mois d'octobre (Figure 77). Le total pluviométrique atteint 461,7 mm dont 196,8 mm au mois de novembre (Figure 75).

⁸⁹ Avec prise en compte de 100 mm supplémentaires pour les mois manquants.

Contrairement à la station de la Grande Chartreuse, le maximum pluviométrique est atteint au cours de la 2^{ème} décennie d'octobre (96,5 mm) mais les pics pluviométriques sont nombreux jusqu'à la 3^{ème} décennie de novembre (Figure 77). Le début d'hiver est doux et moins arrosé. La station enregistre 107 mm de précipitations pluvieuses et neigeuses (fin du mois) au mois de décembre. Entre décembre et janvier, les totaux décennaires dépassent à deux reprises 50 mm soit, 57,6 mm dans la 3^{ème} décennie de décembre et 57 mm au cours de la 1^{ère} décennie de janvier (Figure 77). Il s'agit là, certainement du maximum hivernal. La 1^{ère} décennie de janvier est marquée par des chutes de neige (autour du 4) et les 57 mm enregistrés correspondent à une hauteur de neige donnée en équivalent eau (probablement sous-estimée). Dès 1000 m d'altitude, la couche de neige a persisté jusqu'à la fin du mois (Météo-France, 2002)⁹⁰. Nous ne disposons pas de données pluviométriques pour l'ensemble du mois de février car les enregistrements s'arrêtent au 14. Cependant, la 1^{ère} décennie du mois enregistre des chutes de neige abondantes (48,8 mm, figure 77). Lors d'une sortie sur le terrain le 14 février, nous avons mesuré une hauteur de neige cumulée de 1,2 mètres. Au début du mois de février, il est tombé en 24 heures 60 cm de neige à l'Alpe d'Huez (1860 mètres) et 50 cm au Rivier d'Allemont (1270 m). L'épaisseur du manteau neigeux a atteint 1,5 m dans ces deux postes alors qu'une couche de 12 cm recouvrait la ville de Grenoble le 5 au matin (Météo-France, 2002). Ces chutes, loin d'être exceptionnelles, ont toutefois permis à l'enneigement de persister tout le mois, jusqu'à des altitudes de 800 à 1000 m. Le reste du mois a été une longue période quasi-sèche (Figures 77 et 76). Le temps sec observé en février se poursuit un peu en mars et particulièrement au cours des 2^{ème} et 3^{ème} décennies (Figure 77). La majeure partie des précipitations est tombée en début de mois (52,5 mm). Une dernière période froide et pluvieuse s'installe début avril mais la 2^{ème} décennie marque l'entrée dans le printemps. Dès la 2^{ème} décennie de mai, la sécheresse s'installe mais les perturbations pluvio-orageuses demeurent nombreuses jusqu'au début du mois de juin. Les orages atteignent le tablier d'éboulis en fin de journée et en soirée. A partir du mois de juin (2^{ème} décennie), la canicule et la sécheresse s'installent durablement. La 3^{ème} décennie enregistre un total pluviométrique de 0,4 mm, une température moyenne de 20,5 °C (Figure 77) et des températures maximales supérieures à 30 °C (Figure 68).

1.2.2.2. L'année 2003-2004

Le déficit estival observé au poste de la Grande Chartreuse est moins marqué à La Plagne (Figure 75 et 1.2.1.2.) mais les tendances générales décennaires sont sensiblement similaires. Le mois de juillet est le plus sec et particulièrement au cours de la 2^{ème} décennie (5,2 mm, figure 77). Toutefois, au cours de ce mois, le tablier d'éboulis de La Plagne a reçu une lame d'eau supérieure à celle de la Grande Chartreuse, soit 58,1 mm contre 35,7 mm (Figure 75). La 1^{ère} décennie d'août est très sèche et chaude (1.1.2.2) mais la fin de l'été est plus arrosée et particulièrement au cours des 2^{ème} et 3^{ème} décennies d'août où La Plagne a reçu 115,6 mm (Figure 77). Le début d'automne est frais à l'exception de la 2^{ème} décennie de septembre. Le mois d'octobre est pluvieux (201,8 mm) et frais et notamment au cours de la 1^{ère} décennie où le total pluviométrique atteint 113,8 mm (Figure 77). Il s'agit du maximum pluviométrique de l'année ainsi que des deux années de mesures. La fin de l'automne est pluvieuse, la station reçoit 163,5 mm de précipitations en novembre. Total pluviométrique supérieur à celui enregistré au poste de la Grande Chartreuse (Figure 75). La 3^{ème} décennie de novembre est plus froide et la neige fait son apparition. Au-dessus de 1000 m, 6 à 10 jours de chutes de neige ont été comptabilisés. Météo-France (2003) relevait une vingtaine de centimètres au sol en fin de mois à 1500 m. Début décembre, un foehn modéré atteint La Plagne, le temps est sec et doux mais rapidement les épisodes pluvieux et neigeux vont se multiplier. A partir du 22 décembre, Météo-France enregistre 20/30 cm d'épaisseur de neige à 1000 m. Concernant le milieu et la fin de l'hiver, il est probable que les précipitations neigeuses aient été plus nombreuses à La Plagne au mois de janvier. Météo-France (2004) souligne que les fréquents épisodes perturbés, parfois accompagnés de phénomènes orageux, ont contribué à l'excédent du

⁹⁰ <http://www.meteofrance.fr>.

cumul de pluie sur ce mois, notamment dans les Alpes. Ainsi, les précipitations ont été 1,5 à 2 fois plus importantes que la normale des Préalpes aux massifs intérieurs.

La première décennie de janvier est sous l'influence de conditions anticycloniques mais au cours de la 2^{ème} décennie, un courant océanique doux très perturbé frappe le département. Enfin, la 3^{ème} décennie est caractérisée par la présence d'un courant de nord froid et neigeux. La station de la Grande Chartreuse a enregistré ces différentes périodes (Figure 76). Au vu de la courbe thermique de La Plagne, il semblerait que le phénomène ait été identique à 1647 m (Figure 77). Les 28 et 29 janvier, il est tombé 60 à 80 cm en Chartreuse (1320 m, Col de Porte, Météo-France, 2004). Le mois de février est plus chaud et certainement moins neigeux, au moins au cours des deux premières décennies (Figures 76 et 77). Une puissante anticyclone règne sur toute la 1^{ère} décennie et jusqu'au 17 février, la douceur est quasi-printanière. La 3^{ème} décennie est la plus arrosée et connaît un épisode pluvio-neigeux important dans la nuit du 22 au 23, prolongé en matinée du 23. Météo-France a relevé 15 à 20 cm de neige à 1500 m. Au printemps, le total pluviométrique est légèrement déficitaire par rapport à la saison 2002-2003 (207,4 mm contre 246,7 mm). Le début de saison est pluvieux mais relativement doux au cours de la 2^{ème} décennie du mois de mars. La température moyenne décennale devient supérieure à 5°C (Figure 77). Douceur et fraîcheur alternent jusqu'au 24 (3^{ème} décennie de mars) où un courant de nord ouest, froid, provoque quelques chutes de neige dès 600 m. La Plagne reçoit seulement 13,6 mm de précipitations pluvieuses et neigeuses, certainement sous-estimées même si le site est en situation de petit adret (équivalent eau). Le mois d'avril est marqué par deux offensives hivernales au cours des deux premières décennies. D'après Météo-France (2004), la neige est descendue vers 500/600 m les 6 et 7 et les pentes ont été blanchies au-dessus de 800 m, les 18 et 19. La Plagne a reçu 49,8 mm de précipitations pluvieuses et neigeuses (équivalent eau). La fin du mois est plus sèche (Figure 77). Comme à 945 m, un ultime refroidissement accompagné de giboulées sévit au cours de la 1^{ère} décennie de mai qui est très arrosée (64,8 mm de pluie et de neige). Météo-France (2004) note que l'Isère a vu un retour de la neige du 5 au 9 mai, qui a formé une couche continue à partir de 1000 m, mais amené des flocons jusque vers 600 m. A 1500 m, l'épaisseur de neige atteignait 10 à 20 cm en Chartreuse. La fin du mois est sous régime anticyclonique et la chaleur presque estivale. Au mois de juin, la sécheresse se confirme mais la chaleur est assez irrégulière. Un passage perturbé du nord-ouest touche la 1^{ère} décennie (44 mm) et quelques passages orageux les décennies suivantes (Figure 77). Le mois de juin est excédentaire et enregistre 78 mm de précipitations, contre 42,51 mm pour la saison précédente (Figure 75).

En dépit du fait que l'année 2003 ait été particulièrement chaude et sèche, le site de La Plagne, de part son exposition et sa position au sein du massif de la Chartreuse (position interne à l'extrémité nord) est moins arrosé. Une étude menée par VETTER (2004)⁹¹ montre clairement, dans les Alpes du Nord et notamment en Chartreuse, une répartition des précipitations influencée par le relief. La moyenne sur la période 1987-1995 des cumuls pluviométriques sur 24 h, reportée sur le relief, montre une brusque augmentation des cumuls au niveau des contreforts de la Chartreuse, avec des maxima aux postes d'Orcière et de la Diat (Figure 78). Les moyennes chutent au cœur du massif, avec un minimum au poste des Essarts puis remontent pour atteindre un maximum à mi-versant sur le rebord Est du massif, à Saint Michel du Touvet. Pour l'année 2003 à La Plagne, la

⁹¹ Depuis une vingtaine d'années, le Cemagref de Lyon s'intéresse à la thématique de l'aléa pluviométrique en montagne. Dans cette idée, il a été décidé d'implanter un réseau unidirectionnel de pluviographes dans les Alpes du Nord, afin de mesurer les précipitations liquides. Fin 1991, le TPG (Transect de Pluviographes pour l'analyse et la modélisation de Gradients d'intensité en altitude) disposait de 23 postes opérationnels. Dans sa configuration initiale, le transect s'étendait sur les départements du Rhône et de l'Isère sur une distance de 100 km, le long d'un axe orienté du nord-ouest au sud-est, reliant Lyon à Fond-de-France. Cette orientation correspond à la direction de propagation des perturbations en provenance du nord-ouest, supposées au moment de l'implantation contribuer le plus significativement aux pluies. Le TPG traversait perpendiculairement les trois massifs d'altitude croissante que sont le Bas-Dauphiné (900 m), la Chartreuse (2000 m), et Belledonne (3000 m).

moyenne des cumuls sur 24 h est de 3,3 mm. A titre indicatif, nous avons localisé notre station sur le TPG (en noir).

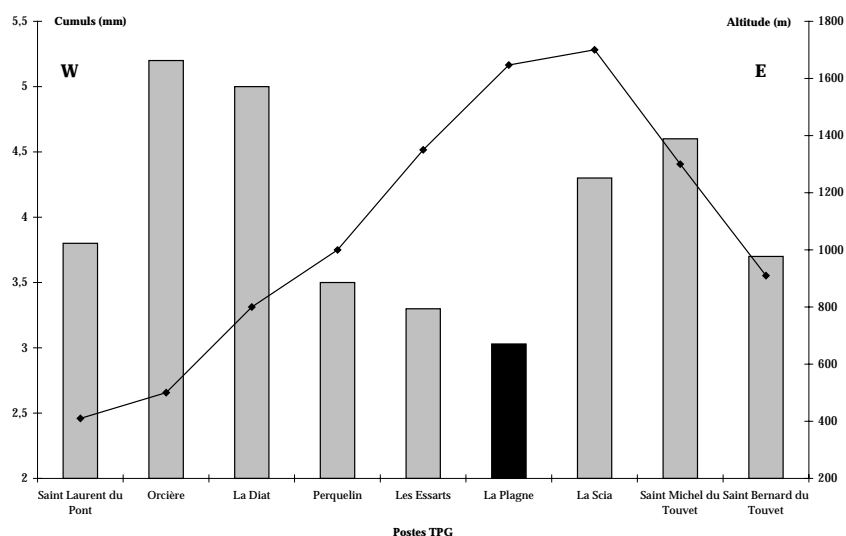
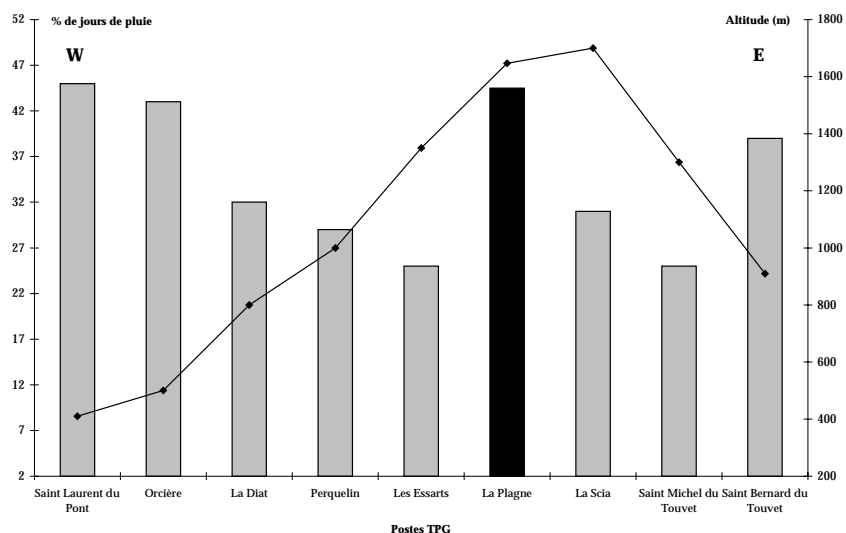


Figure 78 : Moyennes des cumuls sur 24 h pour chaque station (1987-1995). D'après VETTER (2004).

En considérant les données du poste de la Grande Chartreuse, sur les 9 années étudiées par VETTER (2004), 6 sont excédentaires par rapport à la normale 1961-1990 (1987, 1988, 1992, 1993, 1994 et 1995). L'année 2003 est déficitaire. Lorsque l'on s'intéresse aux pourcentages de jours pluvieux ($p \geq 0,2$ mm), on constate qu'il y a en moyenne, sur la période 1987-1995, 33,6% de journées avec pluie. En 2003, La Plagne totalise 44,5% de journées pluvieuses (Figure 79).

Figure 79 : Pourcentage du nombre de jours pluvieux (1987-1995). D'après VETTER (2004)



Si l'on fait abstraction de La Plagne et en ne considérant que la période 1987-1995, on constate que le cœur de la Chartreuse est moins arrosé. Les postes de la Diat et de Saint Michel du Touvet sont des postes où il ne pleut pas souvent, alors que les cumuls sont en moyenne parmi les plus forts. D'après VETTER (2004), les pluies y sont donc peu fréquentes mais avec de fortes intensités. Les postes de Saint Laurent du Pont et de Saint Bernard du Touvet bénéficient de plus de journées pluvieuses mais comme les cumuls sont en moyenne les moins importants, les pluies sont certes fréquentes mais les intensités sont faibles. Pour l'année 2003, le poste de La Plagne correspondrait

à ce dernier cas (Figures 78 et 79). Les cumuls sur 24 h sont faibles, les pluies fréquentes mais de faibles intensités.

1.2.3. L'intensité des pluies

Pour la station de La Plagne, nous nous sommes intéressés à l'intensité des pluies sur l'ensemble de la période 2002-2004. Cet aspect sera essentiellement développé pour La Plagne car les données horaires du poste de la Grande Chartreuse étaient trop coûteuses. En revanche, nous avons utilisé pour les décades les plus pluvieuses⁹² (Figure 76), celles du poste de Saint-Pierre-de-Chartreuse (895 m, bourg, Météo-France).

1.2.3.1. L'année 2002-2003

A. L'été

Du 1^{er} juillet 2002 au 31 août 2002, on relève trois journées où les précipitations ont été supérieures à 20 mm/24 h :

- le 17/07/02 : 24,2 mm en 24 heures dont 24 mm en continu pendant 19 heures soit 1,2 mm/h.
- le 6/08/02 : 26,4 mm dont une pointe de 25 mm en continu pendant 9 heures soit 2,7 mm/h;
- le 10/08/02 : 24 mm dont 19,6 mm en continu pendant 9 heures soit 2,1 mm/h.

Des intensités sensiblement similaires s'observent sur des épisodes de 6 heures. Nous avons comptabilisé 5 jours où le total pluviométrique est supérieur ou égal à 10 mm/6 h :

- le 10/07/02 : 10 mm en continu sur 6 heures (1,6 mm/h) dont une pointe à 4,8 mm pendant 1 heure;
- le 15/07/02 : 11,4 mm durant 6 heures (1,9 mm/h) avec une pointe à 5,4 mm pendant 1 heure;
- le 17/07/02 : 13 mm en continu pendant 6 heures (2,1 mm/h) avec une pointe à 3,4 mm pendant 1 heure;
- le 6/08/02 : 12,2 mm en 6 heures (2 mm/h) avec une pointe à 5,4 mm durant 1 heure;
- 19,8 mm en continu durant 6 heures (3,3 mm/h) dans la nuit du 8/08/02 (20 h TU) au 9/08/02 (1 h TU) avec une pointe à 7,4 mm pendant 1 heure.

Au cours de la saison estivale, les intensités les plus significatives s'observent sur des épisodes plus courts. Des intensités oscillant entre 2 et 4,4 mm/h sur 2 à 4 heures ont été enregistrées à 2 reprises. Les intensités les plus importantes sont isolées et, en général, horaires. Des intensités de 3,6 à 5,4 mm/h durant 1 heure ont été comptabilisées à 12 reprises. Deux séquences de plus fortes intensités ont atteint 7,4 et 7,6 mm/h durant 1 heure. La plus forte intensité a été enregistrée lors d'un orage isolé le 24 août 2002 à 20 h TU avec 11,8 mm en 1 heure.

⁹² En Chartreuse, les séquences pluvieuses intensives (sur 24 h) correspondent souvent à des décades ou des mois où les totaux pluviométriques sont importants.

A titre de comparaison, le 8 août 2002, à Saint-Pierre-de-Chartreuse, 49,6 mm ont été recueillis en une heure (19h TU). A la même heure, La Plagne recevait 1 mm. Au cours de la 1^{ère} décade d'août, la plus arrosée de la saison estivale, on relève 4 journées où les totaux pluviométriques ont été supérieurs à 20 mm/24 h : le 3/08/02 (26,2 mm), le 6/08/02 (30,2 mm), le 8/08/02 (73,6 mm) et le 10/08/02 (22,2 mm). Sur des épisodes plus courts, notamment horaires, les intensités sont sensiblement similaires : des intensités de 3 à 5,6 mm/h durant 1 heure ont été enregistrées à 12 reprises. Quatre séquences de plus fortes intensités ont atteint 7, 7,2, 7,8 et 10,8 mm/h pendant 1 heure.

B. L'automne

D'après nos enregistrements, du 1^{er} septembre 2002 au 30 novembre 2002, les séquences de plus forte intensité journalière ont été :

- en septembre : 28,8 mm en 24 heures, le 9/09/02 dont 25,6 mm en continu pendant 11 heures soit 2,3 mm/h.
- en octobre : 27 mm en 24 h, le 16/10/02 dont une pointe à 19 mm pendant 6 heures soit (3,16 mm/h). 35,8 mm en continu et régulièrement pendant 12 heures, le 17/10/02 soit 2,9 mm/h.
- en novembre : 37 mm en continu pendant 16 heures, le 9 novembre 2002 dont une pointe de 23 mm en 9 heures soit 2,5 mm/h. 35 mm pendant 24 heures, le 14 novembre 2002 dont une pointe de 26,6 mm en 12 heures soit 2,2 mm/h. 20,4 mm durant 24 heures, le 16 novembre dont 14 mm en continu pendant 13 heures soit 1 mm/h.

En novembre 2002, et uniquement sur la 1^{ère} décade, la station de Saint-Pierre-de-Chartreuse (895 m) a enregistré 4 journées où les intensités ont été supérieures à 25 mm/24 h :

- le 3/11/02 : 40,4 mm pendant 24 heures dont une pointe à 31,4 mm en 11 heures soit 2,85 mm/h;
- le 4/11/02 : 37,8 mm pendant 24 heures dont une pointe à 27,4 mm durant 12 heures soit 2,3 mm/h;
- le 7/11/02 : 29,6 mm sur 24 heures avec une pointe à 25,4 mm pendant 17 heures soit 1,4 mm/h;
- le 9/11/02 : 59 mm en continu et régulièrement pendant 21 heures soit 2,8 mm/h.

Des intensités plus importantes s'observent sur des épisodes plus courts. Au cours de cette décade, nous avons comptabilisé deux séquences où les cumuls pluviométriques ont été supérieurs à 25 mm/6 h : 29,2 mm en continu et régulièrement pendant 6 heures, le 3/11/02 soit 4,8 mm/h et 31,4 mm en continu pendant 6 heures, le 9/11/02 soit 5,2 mm/h. Nous avons aussi relevé des intensités de 3 à 6,2 mm/h durant 1 heure à 16 reprises, des intensités de 7,2 mm/h pendant une heure à 2 reprises et 8,4 mm/h sur 1 heure à 1 reprise.

En automne, le nombre de journées où les précipitations ont été supérieures à 20 mm/24 heures sont plus nombreuses : 6 contre 2 en été. De plus, les précipitations sont plus abondantes et on relève 3 journées où elles ont été supérieures à 30 mm/24 h. En revanche, les intensités horaires sont assez proches.

A La Plagne, sur des épisodes plus courts, des intensités de 2,8 et 3,4 mm/h durant 2 heures ont été enregistrées à 4 reprises (sur 3 mois d'automne), de 3 à 3,6 mm/h sur 2 heures à 2 reprises. Comme en été, les plus fortes intensités sont horaires. Des intensités de 3,6 à 6,8 mm/h pendant 1 heure ont été enregistrées à 8 reprises.

Deux séquences de plus fortes intensités ont atteint 7,6 et 7,8 mm/h durant 1 heure. L'intensité la plus forte a été enregistrée le 17 octobre 2002 à 19 h TU (8,4 mm/h sur 1 heure).

C. L'hiver

Sur les mois de décembre et de janvier, seul le mois de janvier a connu deux épisodes où les intensités journalières ont été supérieures à 20 mm/24 h :

- le 1/01/03 : 25,4 mm de pluie et de neige en continu et régulièrement pendant 13 heures soit 1,9 mm/h ;
- le 2/01/03 : 23,8 mm de pluie et de neige en continu pendant 11 heures soit 2 mm/h.

D. Le printemps

Les mois de mars et avril 2003 sont plutôt calmes et enregistrent deux journées où les lames d'eau ont été supérieures à 20 mm/24 h comme le 5/03/03 : 28,2 mm de pluie et de neige en 14 heures soit 2,01 mm/h et le 8/04/2003 où la station a reçu 20,2 mm en 8 heures soit 2,5 mm/h. Le mois de mai connaît quelques perturbations pluvio-orageuses mais les intensités journalières ne dépassent pas 20 mm/24 h. L'intensité la plus forte a été enregistrée le 21/05/03 : 16,4 mm en 24 heures dont une pointe à 15,4 mm durant 13 heures soit 1,2 mm/h.

1.2.3.2. L'année 2003-2004

A. L'été

Du 1^{er} juin 2003 au 31 août 2003, on comptabilise deux journées où les précipitations ont été supérieures à 25 mm/24 h. Il s'agit d'épisodes de courte durée. Les séquences de plus forte intensité journalière ont été : 26,4 mm en continu et régulièrement pendant 3 heures (8,8 mm/h), le 5/06/03 dont une pointe de 17,2 mm en 1 heure. 30 mm en 24 heures, le 14/08/03 dont une pointe de 29,8 mm pendant 1 heure.

Il s'agit des plus fortes intensités, de courte durée, enregistrées au cours des deux années de mesure. En réponse à la canicule, des orages violents de fin de journée se sont abattus sur le tablier d'éboulis de La Plagne.

B. L'automne

Du 1^{er} septembre 2003 au 30 novembre 2003, cinq séquences de fortes et durables intensités ont été observées :

- 20, 4 mm en 24 heures, le 29/09/03 avec une pointe de 20,2 mm pendant 11 heures soit 1,8 mm/h;
- 25,8 mm en 24 heures, le 6/10/03 dont une pointe de 25,6 mm durant 8 heures soit 3,2 mm/h;

- 38,8 mm en 24 heures, le 7/10/03 avec une pointe de 36,4 mm pendant 12 heures soit 3 mm/h;
- 26,4 mm en 24 heures, le 20/10/03 dont une pointe de 14 mm durant 5 heures soit 2,8 mm/h;
- 35,8 mm en 24 heures, le 1/11/03 dont une pointe de 35,6 mm pendant 12 heures soit 2,9 mm/h.

Les séquences pluvio-orageuses sont moins nombreuses que pour l'automne précédent (5 contre 6) mais les durées sont sensiblement similaires. En revanche, les séquences sont plus intenses.

Des intensités plus importantes s'observent sur des épisodes plus courts. Des intensités de 3 et 3,4 mm/h durant 1 heure ont été enregistrées à 8 reprises (sur 3 mois), de 4,2 à 6,2 mm/h durant 1 heure à 13 reprises. Des séquences plus intenses mais sur une heure ont eu lieu à 2 reprises : 7,2 et 7,4 mm/h. L'intensité la plus forte a été enregistrée le 1/11/03 où la station a reçu 9,2 mm/h pendant 2 heures (11 h et 12 h TU).

En octobre 2003, et uniquement sur la 1^{ère} décade, la station de Saint-Pierre-de-Chartreuse (895 m) a enregistré 4 journées où les intensités ont été supérieures à 20 mm/24 h : 30,6 mm en 24 heures, le 3/10/03 avec une pointe de 30 mm en 6 heures soit 5 mm/h. 21 mm/24 h, le 4/10/03 avec une petite pointe de 10,2 mm pendant 7 heures soit 1,45 mm/h. 57,4 mm en continu pendant 20 heures, le 5/10/03 dont une pointe de 34,8 mm en 10 heures soit 3,48 mm/h et 23,4 mm en 24 heures, le 7/10/03 avec une pointe 20 mm en 9 heures soit 2,22 mm/h. En ce qui concerne les intensités sur des épisodes plus courts, des intensités de 3,8 mm/h durant 3 heures ont été enregistrées à 1 reprise, de 3,2 à 5,4 mm/h pendant 1 heure à 11 reprises. Les intensités les plus fortes ont été enregistrées le 3/10/03 à 7 h TU (14,4 mm/h) et 8 h TU (12,8 mm/h).

C. L'hiver

Nous ne disposons pas de donnée pour les mois de janvier et février 2004 et le mois de décembre 2003 n'enregistre pas de séquences pluvieuses à intensités significatives sur de longues périodes. Signalons tout au plus quelques séquences assez courtes dans la 3^{ème} décade du mois : des intensités de 1,4 à 2,8 mm/h durant 4 heures (1 reprise), de 2,2 mm/h sur 3 heures (1 reprise) et une séquence plus intense sur 1 heure avec 4 mm.

D. Le printemps

Comme pour le printemps 2003, les mois de mars et avril 2004 sont assez calmes. Nous avons enregistré une seule journée où la lame d'eau a été supérieure à 20 mm/24 h : 20,8 mm de pluie et de neige en continu et régulièrement pendant 15 heures, le 14/03/04 soit 1,38 mm/h. L'intensité la plus forte mesurée au cours de ces 2 mois est de 3,2 mm en 1 heure (27/03/04 à 13 h TU). Le mois de mai enregistre quelques giboulées au cours de la 1^{ère} décade qui est, par ailleurs, très arrosée (64,8 mm de pluie et de neige) mais les intensités journalières ne dépassent pas 20 mm/24 h. L'intensité la plus forte a été enregistrée le 6/05/04 : 18,2 mm en continu pendant 7 heures soit 2,6 mm/h.

E. Le début de l'été 2004

Pour le seul mois de juin 2004, nous avons comptabilisé trois journées où les précipitations ont été supérieures à 20 mm/24 h : 20,8 mm en 24 h, le 1/06/04 dont une pointe de 14,2 mm en 7 heures soit 2,02 mm/h. 20 mm en continu pendant 13 heures, le 2/06/04 soit 1,53 mm/h et 23,4 mm en 24 heures, le 23/06/04 dont une pointe de 14,4 mm durant 2 heures soit 7,2 mm/h.

Finalement, pour les décades les plus pluvieuses (précipitations liquides), les séquences où les précipitations ont été supérieures à 20 mm/24h sont plus nombreuses à Saint-Pierre-de-Chartreuse (895 m) et il est fort probable que ce soit aussi le cas sur l'ensemble d'une année, à l'exception peut être de l'été (mais sur des épisodes plus courts). D'autre part, les cumuls pluviométriques sur 24 h sont en général plus élevés. En revanche, les valeurs des intensités sur 24 h ou en fonction de la durée des pointes, ne montrent pas de différences marquées. Sur des épisodes de courte durée (6h, 1 h), le constat est identique mais les séquences sont plus nombreuses à basse altitude. A La Plagne, sur l'ensemble de la période étudiée (juillet 2002-juillet 2004), on observe une diminution de l'intensité des pluies avec l'allongement de la durée des séquences pluvieuses. Les précipitations sont soit courtes et intenses (une à quelques heures), associées à des orages, soit moins intenses mais d'une durée plus longue. Les étés sont caractérisés par de très fortes intensités qui se produisent lors de séquences pluvieuses assez courtes (averses courtes) et qui ont lieu en fin de journée. Les automnes et les printemps enregistrent des intensités moyennes à fortes mais sur de plus longues périodes (24 h, 6h parfois). En général, les séquences pluvieuses sont plus nombreuses. Les hivers seraient assez proches de ces deux saisons.

Nous n'avons pas réellement la possibilité de pouvoir comparer efficacement nos résultats. Difficulté accrue en raison notamment du manque de données et de l'importance de la variabilité inter-annuelle et inter-décadaire. De plus, l'année 2003⁹³ a été particulièrement chaude et sèche et nous avons enregistré un déficit de 495,6 mm par rapport à la normale 1961-1990 pour le poste de la Grande Chartreuse. Signalons toutefois, que les valeurs des intensités observées sur des séquences pluvieuses où les précipitations ont été supérieures à 20 mm/24h, sont souvent inférieures à celles mentionnées par POULIN (1994) sur l'année 93/94 au Col de Porte (1320 m). Les cumuls sur 24 heures (> 25 mm/24h mais surtout souvent > 30 mm/24h) ou sur des épisodes plus courts (5h et 6h par exemple) sont plus importants et les intensités élevées (rarement < 3mm/h). De plus, les séquences sont plus nombreuses. Les séquences intensives, tant sur le plan de la durée que sur le plan de la lame d'eau, se ressemblent plus entre le Col de Porte et Saint-Pierre-de-Chartreuse. Le site de La Plagne, de part son exposition et sa position au sein du massif (extrémité nord) est moins arrosé. D'autre part, la variabilité annuelle des précipitations explique au moins en partie les différences observées. Ainsi, par rapport à la normale 1961-1990, les années 1993 et 1994 ont enregistré des excédents pluviométriques respectifs de 117,1 mm et 261,4 mm (poste de la Grande Chartreuse). Ces excédents ont certainement été enregistrés au Col de Porte à la même période car aux fortes intensités mesurées (par 24 h) par POULIN en 1994, correspondent des mois qui enregistrent, au poste de la Grande Chartreuse, des excédents pluviométriques atteignant parfois 240,9 mm par rapport à la normale 1961-1990 :

- septembre 1993 : +169 mm. POULIN (1994) relève de fortes intensités en 6 heures (8 mm/h), 9 heures (4,8 mm/h) et 5 heures (5,7 mm/h). 8 journées avec un total supérieur à 20 mm/24 h;
- octobre 1993 : +90,5 mm. 5 journées affichent plus de 20 mm/24 h. Intensités de 4 mm/h durant 7 heures;
- novembre 1993 : déficit de -125,5 mm. Pas de séquence;
- décembre 1993 : +197,3 mm. 5 jours où le total pluviométrique dépasse les 35 mm/24 h : 50 mm en 12 heures soit 4 mm/h;
- janvier 1994 : +66,4 mm. Intensités de 3 à 3,3 mm/h sur 16 et 14 heures;
- février 1994 : déficit de -107,6 mm. Une journée où les totaux pluviométriques ont dépassé 20 mm/24h (1,9 mm/h durant 15 heures);
- mars 1994 : déficit de -102,4 mm. Pas de séquence;
- avril 1994 : +240,9 mm. Intensités de 2,3 à 3,1 mm/h sur 14, 16 et 18 heures.

⁹³ Année météorologique (janvier à décembre).

Cela nous conforte dans l'idée que les séquences pluvieuses intensives (au moins par 24 h) correspondent souvent à des décades ou des mois où les totaux pluviométriques sont importants.

ROVERA (1990) soulignait, d'après ses observations et mesures dans les dépôts fluvio-glaciaires ravinés du Combarcin (à proximité de Granier, Moyenne Tarentaise), que les épisodes de forte intensité durant moins de 4 à 5 heures n'avaient pas d'effet morphogénétique. Par contre, des rigoles pluricentimétriques et des déplacements de matière sur plusieurs mètres avaient été provoqués par les épisodes du 23 septembre 1984 (38,5 mm en continu pendant 21 heures dont pointe de 28 mm en 10 heures soit 2,8 mm/h) et du 8 avril 1985 (34 mm en continu et régulièrement pendant 20 heures soit 1,7 mm/h). Ces observations sont confirmées par TURC (1998) et COMBE (2002) dans les schistes de la Combe de Mizoën (Vallée de la Romanche, Isère). Il est généralement admis que lorsque l'intensité des précipitations se rapproche de 30-35 mm/24h, il se produit une augmentation du pouvoir érosif de la pluie. Sur les deux années de mesures, nous avons enregistré ces valeurs uniquement à 5 reprises.

En terme d'efficacité sur la géodynamique de surface du tablier d'éboulis de La Plagne, les effets sont actuellement limités et particulièrement en raison de la nature granulométrique grossière du substrat et de la densité végétale. En ce qui concerne le ruissellement épidermique, nous nous rangeons à l'avis de ROVERA (1990), les épisodes de forte intensité sur une courte durée sont moins efficaces que des épisodes à intensité moyenne sur de plus longues périodes. D'autre part, le ruissellement est surtout efficace dans les portions à fines rhexistasiques et parfois hétérostasiques du tablier d'éboulis (peu nombreuses en fin de compte). Il favorise aussi le transfert des sédiments des bombements apicaux herbeux vers le tablier d'éboulis. En revanche, les impacts directs des gouttes d'eau sur le substrat (érosion de rejaillissement) peuvent être importants lors de séquences pluvieuses intensives de courte durée. En ce qui concerne les phénomènes d'érosion en corniche, ROVERA (1990) souligne qu'ils apparaissent au cours d'intensités proches de 3,5 mm/h sur de courtes ou de longues périodes. Cet aspect est notamment intéressant pour les facettes de l'escarpement secondaire du tablier de La Plagne soumises au processus d'haloclastie. Nous reviendrons sur ces différents aspects dans le paragraphe III de ce chapitre.

Comme nous l'avons souligné dans le Chapitre 1 (3.1), en Chartreuse et dans le contexte climatique actuel, les précipitations annuelles n'enregistrent pas de changements notables depuis les années 60, sinon une légère augmentation à partir des années 90. Ce sont surtout les mois de septembre et octobre qui enregistrent une augmentation significative sur 40 ans (1961-2003, station de la Grande Chartreuse, 945 m). Les précipitations ont aussi augmenté au mois de novembre mais de manière moins prononcée. Le site de La Plagne a certainement connu la même évolution et c'est justement en automne que les intensités sont les plus fortes sur 24 h. C'est également au cours de cette saison que les cumuls pluviométriques sont les plus importants (régime pluviométrique AHPE). Si, comme nous l'avons supposé plus haut, il existe une corrélation entre les mois à forts totaux pluviométriques et les jours à forte intensité (au moins aux 24h), alors il est probable que le nombre de séquences quotidiennes à forte intensité (> 20 mm/24 h) ait augmenté en automne depuis 1961. Il ne s'agit là que d'une hypothèse que nous ne sommes pas en mesure de confirmer.

Les précipitations dans les Alpes varient fortement d'une année sur l'autre. Suivant la saison et la région, les années humides et sèches diffèrent d'un facteur de 2 à 4 (FREI *et al.*, 2003). Des observations indiquent qu'au 20^{ème} siècle, les précipitations moyennes ont augmenté en hiver de 20-30% dans les Alpes septentrionales et occidentales. FREI *et al* (2003) soulignent qu'en Suisse, la plupart des stations à long terme du Plateau et de la bordure nord des Alpes ont enregistré une augmentation des précipitations journalières intenses (temps de retour de 30 jours) en hiver et en automne (1901-1994). Cette tendance est significative pour environ 30% des stations (total de 110 stations pluviométriques). Les augmentations se situent dans une fourchette de 20 à 80 % en 100 ans. Les auteurs ajoutent que des tendances similaires ont été décelées pour des précipitations

intenses d'une durée de 2 à 5 jours. Les précipitations journalières intenses d'été ne font pas apparaître de changements systématiques.

D'après FREI *et al* (2003), la majorité des modèles prévoit que l'intensité moyenne des précipitations et la fréquence des précipitations journalières intenses augmenteront encore à l'avenir. Cette tendance est confirmée en Europe par les analyses basées sur des modèles régionaux⁹⁴. Ceux-ci indiquent une augmentation du maximum annuel de précipitation journalière de 10-25 %, ainsi qu'un accroissement d'un facteur 2 et plus de la fréquence, celle-ci dépassant les extrêmes annuel et cinquantennal actuels des précipitations (DURMAN *et al.*, 2001 in FREI *et al.*, 2003). En cas d'intensification du cycle de l'eau, les fortes précipitations de longue durée pourraient augmenter avant tout dans les Alpes.

II. Les caractéristiques des régimes thermiques à 20 cm et - 10 cm le long du gradient biorhexistasique : approches bioclimatique et morphoclimatique

Cette étude a pour objectifs de déterminer la place des facteurs microclimatiques intervenant sur les processus morphogéniques de surface et de cerner les conditions bioclimatiques auxquelles sont soumis les végétaux, le long du gradient biorhexistasique. Elle nous permettra de cerner plus précisément :

- **pour l'activité morphogénique** : les épisodes climatiques importants sur le plan morphogénique susceptibles d'influencer la géodynamique de surface et tout particulièrement dans les portions rhexistasiques et hétérostasiques du tablier d'éboulis. Ces données seront ensuite mises en relation avec le suivi saisonnier de la géodynamique de surface (paragraphe III de ce chapitre);
- **pour les végétaux** : les conditions thermiques dans le sol (-10 cm) et dans la canopée des plantes basses (+ 20 cm) ainsi que la durée de la période végétative. Nous nous attacherons à confirmer ou infirmer l'existence d'un gradient bioclimatique biorhexistasique sur talus d'éboulis. Les données thermiques de l'air feront ensuite l'objet d'une reconstitution climatique sur une période plus longue (paragraphe IV de ce chapitre).

Contrairement à la sonde air (1,50 m), la plupart des capteurs thermiques et hygrométriques ont connu des défaillances et tout particulièrement au cours de l'année 2004. Malgré les données manquantes, l'essentiel des régimes thermiques a été cerné. Cependant, les données hygrométriques n'ont pu être exploitées.

Les principales phases thermiques atmosphériques, relevées à 1,50 m en condition d'abri, se retrouvent dans l'air à 20 cm et dans le sol à -10 cm mais des différences apparaissent en fonction du gradient biorhexistasique et de la saison considérée. Comme pour le régime thermique de l'air (1.1 de ce chapitre), les températures sont exprimées par décades et l'approche est intra-annuelle.

2.1. L'année 2002-2003

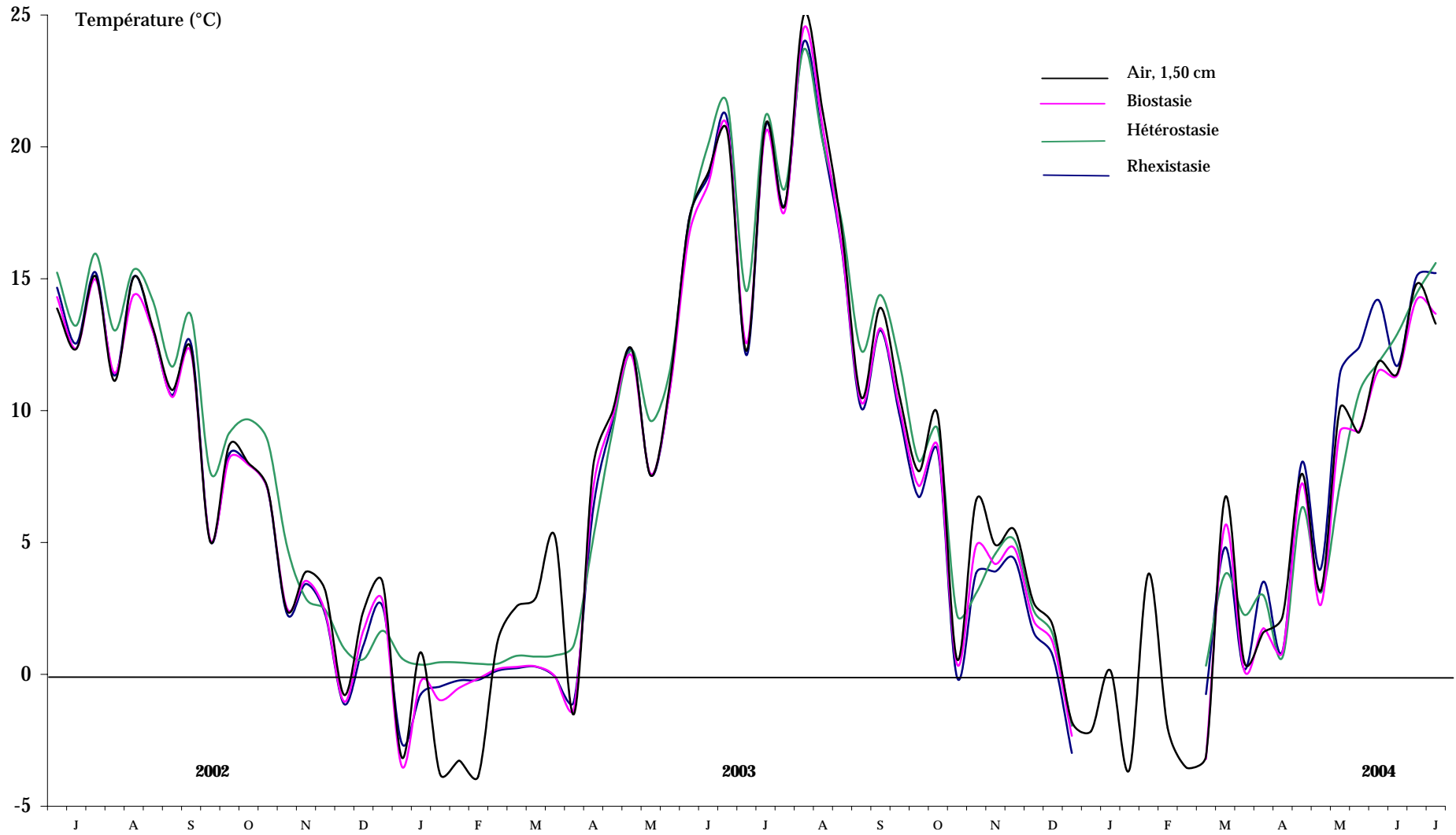
2.1.1. La saison estivale dans l'air à 20 cm

Au cours de l'été 2002, les régimes thermiques de l'air à 20 cm, en biostasie et rhexistasie, sont sensiblement similaires à celui observé à 1,50 m (Figure 80). Au contraire, la zone hétérostasique se révèle être plus chaude⁹⁵.

⁹⁴ ARPEGE, CHRM, HadRM, HIRHAM, REMO (FREI *et al.*, 2003).

⁹⁵ Pour rappel, la zone biostasique est constituée par une pelouse dense à *Carex sempervirens* et *Sesleria varia*, la zone hétérostasique par de petites terrassettes à fines, colonisées par *Thymus praecox* et la zone rhexistasique par une absence de végétaux et une granulométrie moyenne (L = 15-20 cm).

Figure 80 : Régime thermique de l'air à 20 cm en fonction du gradient biorhexistasique (juillet 2002-juin 2004).
Températures moyennes décadaires, tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).



Il semblerait que l'échauffement de surface et la réflectivité des matériaux soient moins prononcés qu'en rhexistase. En témoignent les valeurs des températures minimales qui sont en moyenne plus élevées ($> 10\text{ °C}$ en moyenne) (Annexe Q, figures 1 et 2). L'été est assez frais mais, comme dans l'air à 1,5 m, les amplitudes thermiques sont très marquées et les maxima décadaires oscillent entre 20 et 25 °C (Annexe Q, figures 3, 4 et 5). Même si des différences notables existent au niveau des minima et des maxima (Annexe Q, figure 1 et 2), les régimes thermiques estivaux sont assez proches et les oscillations décadaires identiques.

Ces oscillations, qui correspondent à la succession des types de temps, sont aussi franchement visibles dans le sol.

2.1.2. La saison estivale dans le sol à -10 cm

A -10 cm , les températures moyennes décadaires en rhexistase et hétérostase sont en général moins élevées que dans l'air à $1,50\text{ m}$ et 20 cm (Figure 81, annexe Q, figures 6, 7 et 8). En biostase, le sol est plus chaud et l'effet tampon de la végétation apparaît nettement au niveau des courbes thermiques (Figure 81 et annexe Q, figure 6). La pelouse dense biostasique et la lande à *Arctostaphylos uva-ursi* emmagasinent beaucoup de chaleur et on retrouve ici le rôle d'amortisseur de la végétation sur les amplitudes thermiques (Annexe Q, figures 9 et 10). En biostase, les écarts thermiques entre les minima et les maxima sont moins marqués et les températures minimales sont plus élevées de 3 à 4 °C en moyenne, à l'exception de la saison hivernale. Au contraire, les températures maximales sont plus faibles en été (Annexe Q, figures 13 et 14). En rhexistase, le sol est légèrement plus frais et les températures de surface dépassent celles enregistrées en profondeur (Annexe Q, figure 8). La granulométrie grossière des matériaux constitue un isolant qui permet de retenir un peu de fraîcheur en période estivale. Le régime thermique du sol constitue un intermédiaire entre la biostase et l'hétérostase mais les amplitudes thermiques sont les plus fortes (Figure 81 et annexe Q, figure 12). Les maxima sont les plus élevés et les minima ne dépassent pas les 9 °C (Annexe Q, figures 13 et 14). En hétérostase, le sol est le plus frais en raison notamment de l'infiltration rapide des précipitations et surtout grâce à la présence d'une granulométrie fine, mélangée à de la matière organique, qui procurent une humidité et une fraîcheur durables (Figure 81). Les écarts thermiques entre le sol et l'air sont les plus marqués (Annexe Q, figure 7). Le sol ne bénéficie pas d'une protection aussi efficace que celles existant en biostase et rhexistase (végétation dense ou granulométrie grossière), il est donc plus sensible aux variations thermiques journalières.

En hétérostase, les amplitudes thermiques sont aussi très marquées (Annexe Q, figure 11). Comme en rhexistase, les maxima sont élevés et avoisinent régulièrement les 20 °C mais les minima sont les plus bas et dépassent rarement les 6 °C (Annexe Q, figures 13 et 14).

Figure 81 : Régime thermique du sol à -10 cm en fonction du gradient biorhexistasique (juillet 2002-juin 2004).
Températures moyennes décadaires, tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).

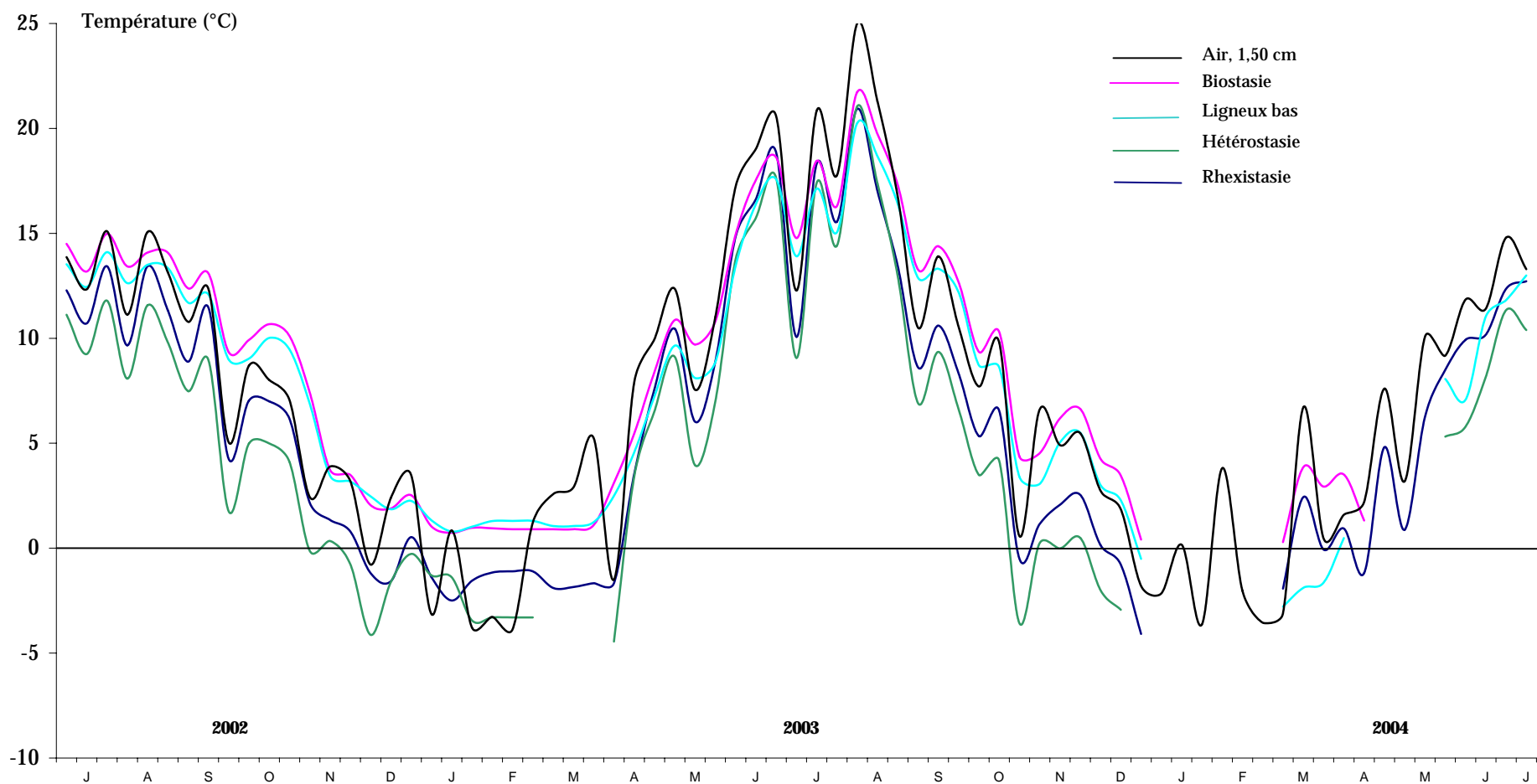


Tableau 61 : Valeurs remarquables de l'été 2002

Sonde	Maximum absolu (°C)	Nombre de jours T < 5 °C (Température moyenne)	Nombre de jours chauds > 15 °C (Température moyenne)
Air 1,5 cm	30,8	0	18
Biostasie, 20 cm	32,2	0	15
Hétérostasie, 20 cm	30,9	0	23
Rhexistasie, 20 cm	33,2	0	20
Biostasie, -10 cm	20,8	0	13
Ligneux bas, -10 cm	21,9	0	6
Hétérostasie, -10 cm	29,9	2	7
Rhexistasie, -10 cm	31,9	1	11

2.1.3. L'automne dans l'air à 20 cm

Au début de la période, les températures sont relativement clémentes. Mais, comme dans l'air à 1,5 m, à partir de la 3^{ème} décennie de septembre, elles amorcent leur déclin (Figure 80). Les premiers gels apparaissent dès le 24 septembre (Tableau 62). Comme en été, le régime thermique en hétérostasie est plus chaud et les températures moyennes, minimales et maximales décennales ne descendront jamais en dessous de 0 °C (Figure 80 et annexe Q, figures 1, 2 et 4). La fin de l'automne est plus fraîche, les températures minimales décennales sont proches de 0 °C (Annexe Q, figure 1) et la température moyenne ne franchira plus la barre des 5 °C (Figure 80). Les amplitudes thermiques se réduisent progressivement et le refroidissement de la 1^{ère} décennie de décembre marque l'entrée dans l'hiver (Figure 80 et annexe Q, figures 3,4 et 5).

Tableau 62 : Valeurs remarquables de l'automne 2002

Sonde	Maximum absolu (°C)	Nombre de jours T < 5 °C (moyenne)	Nombre de jours chauds > 15 °C	Date de déclin des températures moyennes	Date du 1 ^{er} gel
Air 1,5 cm	26,6	39	1	23/09/02	24/09/02
Biostasie, 20 cm	27,1	44	2	23/09/02	25/09/02
Hétérostasie, 20 cm	26,6	43	5	23/09/02	7/04/03 (T mini)
Rhexistasie, 20 cm	28,2	45	3	23/09/02	24/09/02
Biostasie, -10 cm	18,3	32	1	24/09/02	Aucun
Ligneux bas, -10 cm	17,5	30	0	23/09/02	Aucun
Hétérostasie, -10 cm	23,4	57	0	22/09/02	23/09/02
Rhexistasie, -10 cm	27,2	52	0	23/09/02	24/09/02

2.1.4. L'automne dans le sol à -10 cm

Le schéma évoqué en période estivale se poursuit jusqu'à la 2^{ème} décennie de novembre. Le régime thermique dans le sol présente des oscillations similaires à celles enregistrées en surface et le déclin des températures a pratiquement lieu au même moment (Figure 81, tableau 62 et annexe Q). Nous ne notons pas, au cours de la saison automnale, un rôle prééminent de l'insolation et du rayonnement dans la régulation de la température du sol (ETLICHER *et al.*, 1993). Les températures moyennes décennales en rhexistasie et hétérostasie sont les plus basses (Figure 81 et annexe Q, figures 7 et 8) alors qu'en biostasie, elles sont toujours plus chaudes et l'écart thermique tend même à s'accroître (Figure 81 et annexe Q, figure 6). Le déclin des températures en hétérostasie est plus précoce et les premiers gels ont lieu à la fin du mois de septembre. Les minima franchissent la barre des 0 °C à la même période et les températures moyennes décennales deviennent négatives dès la 1^{ère} décennie de novembre (Figure 81 et annexe Q, figure 13). Il semblerait que les précipitations automnales tendent à refroidir plus rapidement le sol en milieu hétérostasique. Contrairement à l'hétérostasie, en biostasie et rhexistasie la densité végétale et la

granulométrie grossière continuent de jouer leur rôle d'isolant thermique. Cet effet tampon limite la déperdition de chaleur, entraîne une décroissance des températures moins brutale et constitue un facteur limitant à la pénétration de l'onde de gel. Cet aspect se vérifiera notamment en biostasie sur l'ensemble de la période hivernale (Figure 81 et annexe Q, figures 9, 19, 13 et 14). En rhexistasie, il faut attendre le début de l'hiver pour voir les températures moyennes, minimales et maximales décadaires s'abaisser durablement au dessous de 0 °C (Figure 81 et annexe Q, figure 12).

2.1.5. La saison hivernale dans l'air à 20 cm

L'analyse des températures moyennes quotidiennes montre que la neige a fait son apparition dès le début du mois de décembre mais l'enneigement n'a pas été suffisant pour masquer les oscillations diurnes, à l'exception de la zone hétérostasique. En hétérostasie, les températures moyennes décadaires semblent se stabiliser au cours des deux dernières décades du mois de décembre (Figure 80). L'engel du sol a favorisé la persistance du manteau neigeux et la sonde située à 20 cm a été recouverte par la neige. Cet aspect est confirmé par l'absence d'oscillation marquée dans le régime thermique des minima et maxima décadaires (Annexe Q, figures 1, 2 et 4). En biostasie et rhexistasie, les régimes thermiques sont plus froids (Figure 80). Comme dans l'air à 1,50 m, les températures moyennes décadaires ne sont jamais descendues en dessous de -5 °C et les maxima décadaires moyens sont presque supérieurs à 0 °C pendant tout l'hiver (Figure 80 et annexe Q, figure 2). En biostasie, les températures maximales sont les plus élevées et les températures minimales les plus froides (Annexe Q, figures 1 et 2). Au cœur de l'hiver, l'enneigement fait disparaître les amplitudes thermiques et les températures se stabilisent (Figure 80, annexe Q).

A 20 cm, les conditions périglaciaires sont beaucoup moins sévères que celles enregistrées à 1,50 m (Tableau 63). En hétérostasie, elles sont absentes en raison de la persistance de la première couche de neige. En biostasie et rhexistasie, le nombre d'alternances gel/dégel est assez proche de celui enregistré à 1,50 m. Les périodes sans dégel et l'intensité du gel⁸⁶ n'ont certainement pas les mêmes conséquences sur les processus périglaciaires car l'enneigement biaise quelque peu les valeurs enregistrées. Les sous-couches gelées ont maintenu les sondes à une température stable mais négative (proches de 0 °C, ce qui explique le nombre de gels faibles) pendant une partie de l'hiver (Figure 80, annexe Q).

Tableau 63 : Valeurs remarquables de l'hiver 2002-2003⁸⁷

Sonde	Minimum absolu (°C)	Gel/dégel (jours)	Gel continu (jours)	Gel faible (jours)	Gel moyen (jours)	Gel fort (jours)	1 ^{ère} nuit sans gel
Air 1,5 cm	-17,4 (fev.)	100	24	79	28	17	13/04/03
Biostasie (20 cm)	-14 (janv.)	95	47	119	14	7	13/04/03
Hétérostasie (20 cm)	-1,5 (avril 03)	0	0	0	0	0	Aucune nuit avec gel
Rhexistasie (20 cm)	-10,1 (janv.)	85	45	117	12	1	14/04/03
Biostasie (-10 cm)	0 (janv.)	3	0	3	0	0	Aucune nuit avec gel
Ligneux bas (-10 cm)	0,4 (janv.)	0	0	0	0	0	Aucune nuit avec gel
Hétérostasie (-10 cm)	-12,3 (janv.)	94	62	112	43	1	15/04/03
Rhexistasie (-10 cm)	-8,3 (avril 03)	53	85	134	4	0	17/04/03

⁸⁶ Pour rappel : gels faibles (0 °C ≥ T_{min} > -5 °C), gels moyens (-5 °C ≥ T_{min} > -10 °C) et gels forts (T_{min} ≤ -10 °C).

⁸⁷ Comme pour l'air à 1,50 m, nous avons aussi pris en compte l'activité du gel au cours de l'automne et du printemps.

A 20 cm, en période hivernale, les températures sont fortement influencées par l'épaisseur et la durée du manteau neigeux. De plus, l'enneigement masque les oscillations diurnes.

La durée de l'enneigement est estimée, de manière continue, à deux mois et demi soit, de la 2^{ème} décennie de janvier 2003 à la 3^{ème} décennie de mars 2003 (Figure 80 et annexe Q, figures 6, 7 et 8). Des chutes de neige ont eu lieu au mois de décembre mais le manteau neigeux semble n'avoir persisté qu'en hétérostasie (Figure 80 et annexe Q, figure 7). Pour conclure, le tablier d'éboulis de La Plagne a été enneigé, au moins partiellement, de la 1^{ère} décennie de décembre 2002 à la 3^{ème} décennie de mars 2003 soit, quatre mois. L'épaisseur de neige au sol a été au moins supérieur ou égale à 20 cm.

2.1.6. La saison hivernale dans le sol à -10 cm

Comme pour les saisons précédentes, les températures du sol sont plus froides que celles relevées dans l'air et notamment en rhexistasie et hétérostasie (Annexe Q, figures 6, 7 et 8). En biostasie, les températures moyennes, minimales et maximales décennales ne seront jamais inférieures à 0 °C (Figure 81 et annexe Q, figures 9, 10, 13 et 14). Par conséquent, les conditions périglaciaires sont pratiquement inexistantes et l'effet tampon de la végétation est extrêmement efficace (Tableau 63). Comme dans l'air à 20 cm, la saison hivernale peut se décomposer en deux périodes. Le début de saison (novembre-2^{ème} décennie de janvier) est caractérisé par une entrée dans l'hiver assez rapide puisque la chute thermique est particulièrement marquée au cours de la 2^{ème} décennie de novembre (Figure 81 et annexe Q). Les maxima proches de 10 °C jusqu'à la 1^{ère} décennie de novembre, chutent à des valeurs hivernales entre 0 °C et 5 °C qu'ils ne dépasseront plus qu'occasionnellement (en hétérostasie, annexe Q, figure 14).

L'enneigement tardif a permis à l'onde de gel de s'installer dans le sol durablement en rhexistasie et en hétérostasie dès la 1^{ère} décennie de décembre (Figure 81 et annexe Q, figures 11, 12 et 13). Le dégel n'aura lieu qu'au cours de la 2^{ème} décennie d'avril 2003. En hétérostasie, les températures moyennes et minimales décennales sont assez basses et le gel a pénétré en profondeur dès la 1^{ère} décennie de novembre (Figure 81 et annexe Q, figure 13). Les minima décennales descendent à -7 °C à deux reprises, début décembre (-7,2 °C) et début avril (-7,7 °C). Au cours de cette première phase hivernale, les amplitudes thermiques se réduisent progressivement (Annexe Q, figures 9 à 12). La situation hivernale change à partir de la 2^{ème} décennie de janvier où les oscillations diurnes s'effacent, traduisant une phase d'enneigement continu. Cet état va durer jusqu'à la 3^{ème} décennie de mars 2003 en biostasie et jusqu'à la 1^{ère} décennie d'avril, en hétérostasie et rhexistasie (Figure 81 et annexe Q).

Dans le sol, d'une manière générale, l'hiver est plus long et surtout en rhexistasie et en hétérostasie où la température moyenne décennale passe durablement au-dessous de 0 °C de la 3^{ème} décennie de novembre 2002 à la 1^{ère} décennie d'avril 2003 soit, quatre mois et 10 jours (Figures 80, 81 et annexe Q, figures 6, 7 et 8). En rhexistasie, mais surtout en hétérostasie, les cycles à alternances gel-dégel sont nombreux dans toutes les décennales, de novembre à janvier puis de la fin mars à la mi-avril (Tableau 63). La période à gel-dégel prévernale est assez courte, elle a lieu au courant du mois d'avril mais sévit essentiellement au cours des deux premières décennales sauf en hétérostasie où quelques cycles s'observent encore au mois de mai (Annexe Q, figure 13). Les températures minimales deviennent positives en rhexistasie dès la 3^{ème} décennie d'avril au moment où les minima en biostasie franchissent le seuil des 5 °C (Annexe Q, figure 13). En rhexistasie et en hétérostasie, à cause des coups de gel précoces et de la durée de l'enneigement, la période sans dégel est plus longue mais l'intensité du gel est faible (Tableau 63). C'est en hétérostasie que les conditions périglaciaires ont été les plus sévères (Tableau 63).

En l'absence du manteau neigeux et notamment en début et en fin de période hivernale, lorsque les amplitudes thermiques journalières et décennales sont marquées, les conditions périglaciaires ont certainement provoqué des micromouvements superficiels, liés au gonflement et au

dégonflement de la surface et tout particulièrement en hétérostasie. Nous reviendrons sur cet aspect dans le paragraphe III de ce chapitre.

2.1.7. Le printemps dans l'air à 20 cm

Le déneigement se produit au cours de la 3^{ème} décade du mois de mars (Figure 80 et annexe Q). Il est assez rapide. Quelques giboulées séviront au mois d'avril mais l'enneigement sera de courte durée en raison de l'exposition favorable du tablier et des effets de l'insolation et du rayonnement. Le « décollage » des températures est précoce en hétérostasie (Figure 80, annexe Q, figures 1, 2 et 4). Il débute dès la 1^{ère} décade d'avril alors qu'en biostasie et rhexistasie, il faudra attendre la 2^{ème} décade du mois (Figure 80, annexe Q, figures 1, 2, 3 et 5). Entre le 13 avril et le 15 avril 2003, les températures moyennes quotidiennes de l'air, à 20 cm, dépasseront le seuil des 5 °C (Tableau 64).

Tableau 64 : Démarrage de la période végétative (printemps 2003)

Sonde	T moyenne journalière > 5 °C (en continu)	T mini journalière > 5 °C (en continu)	T maxi journalière > 5 °C (en continu)
Air 1,5 cm	13/04/03	27/05/03	4/04/03
Biostasie, 20 cm	13/04/03	27/05/03	10/04/03
Hétérostasie, 20 cm	15/04/03	23/05/03	15/04/03
Rhexistasie, 20 cm	14/04/03	27/05/03	13/04/03
Biostasie, -10 cm	15/04/03	17/04/03	14/04/03
Ligneux bas, -10 cm	15/04/03	24/04/03	15/04/03
Hétérostasie, -10 cm	23/04/03	29/05/03	13/04/03
Rhexistasie, -10 cm	22/04/03	28/05/03	14/04/03

A la faveur de l'insolation et du rayonnement, l'augmentation des températures maximales est légèrement plus précoce mais les minima deviennent supérieurs à 5 °C assez tardivement (Tableau 64 et annexe Q, figures 3, 4 et 5). Comme dans l'air à 1,50 m, le printemps est marqué par un accroissement rapide des températures, exceptionnellement chaudes dès la 2^{ème} décade d'avril, et par de fortes amplitudes thermiques (Figure 80 et annexe Q, figures 3, 4 et 5). Les maxima décadaires moyens approchent régulièrement les 20°C en biostasie et en hétérostasie mais sont proches de 25 °C en rhexistasie (Annexe Q, figures 3, 4 et 5). Le mois de mai est le plus chaud, la sécheresse s'installe durablement et annonce déjà l'exceptionnelle canicule de l'été 2003. Les régimes thermiques en biostasie, hétérostasie et rhexistasie se calent pratiquement sur le régime thermique de l'air à 1,50 m (Figure 80). Les premiers processus de remaniement de surface affecteront le tablier d'éboulis dès la 3^{ème} décade de mars et l'action morphogénique de la neige (reptation puis fonte) est probablement maximale à partir du début du mois d'avril.

2.1.8. Le printemps dans le sol à -10 cm

L'ascension des températures a lieu pratiquement en même temps que dans l'air (Figure 81). En biostasie, il est précoce et débute au cours de la 1^{ère} décade d'avril mais il faut attendre le 15 avril pour voir les températures moyennes quotidiennes dépasser le seuil des 5 °C (Tableau 64 et annexe Q, figure 6). En rhexistasie et en hétérostasie, le dégel du sol commence au cours de la 2^{ème} décade du mois (Annexe Q, figures 7 et 8). Les températures moyennes journalières franchissent le seuil des 5 °C respectivement les 22 et 23 avril 2003 (Tableau 64). Comme dans l'air, les régimes thermiques sont marqués par une augmentation brutale des températures dès la 2^{ème} décade du mois d'avril (Figure 81 et annexe Q, figures 6 à 14). Jusqu'à la fin de l'été, à l'exception de quelques oscillations dues à des perturbations orageuses, les régimes thermiques en rhexistasie et en hétérostasie sont similaires et assez proches de ceux enregistrés en biostasie (Figure 81). En biostasie, pour la première fois, le sol est plus frais que l'air à 20 cm et le restera jusqu'à la fin de l'été (Annexe Q, figure 6). Les amplitudes thermiques sont aussi les moins marquées (Annexe Q, figures 9 à 12).

L'examen du tableau des degrés-heures positifs, à partir de la date du début du dégel du sol, montre que la saison est certainement à classer parmi les saisons printanières les plus chaudes (Tableau 65). Nous le verrons plus loin, le printemps 2004 est bien différent (Tableau 69).

Tableau 65 : Degrés-heures positifs au printemps 2003 et période végétative

Date	Air (1,50 cm)	Bios. (20 cm)	Hétéros. (20 cm)	Rhexis. (20 cm)	Bios. (-10 cm)	Lign. bas (-10 cm)	Hétéros. (-10 cm)	Rhexis. (-10 cm)
15 avril	4592	4368	3701	4076	3998	3367	2793	2835
1 ^{er} mai	4766	4524	3875	4228	4182	3529	2876	2929
8 mai	7109	6823	6095	6587	6068	5204	4687	4935
16 mai	8608	8341	7997	8109	7986	6846	5651	6222
22 mai	9670	9405	9310	9150	9333	7892	6229	7023
31 mai	12306	11977	11995	11756	11787	9969	8038	9202
7 juin	15099	14653	14693	14509	14192	12116	10226	11531
15 juin	18972	18363	18608	18374	17518	15209	13438	14945
30 juin	25946	25412	26091	25472	24050	21348	19349	21283

Au début de la saison végétative, par suite d'un démarrage précoce, les valeurs sont élevées tant en surface (20 cm et 1,50 m) qu'en profondeur (-10 cm). Les écarts sont importants par rapport au printemps 2004. Par exemple, les degrés-heures positifs du 8 mai 2003 représentent presque une quantité de chaleur double par rapport au 8 mai 2004. En rhexistase, à -10 cm, la quantité de chaleur est ici deux fois plus importante (Tableaux 65 et 69). L'écart s'amenuise légèrement au cours du mois de mai mais avec la canicule du mois de juin, les valeurs élevées reprennent rapidement l'avantage. Par conséquent au 30 juin, tant en surface qu'à -10 cm, la chaleur reçue est très importante. Ces conditions thermiques sont extrêmement favorables au développement végétal et particulièrement en biostase et en hétérostase.

2.2. L'année 2003-2004

2.2.1. La saison estivale dans l'air à 20 cm

Au cours de l'été 2003, les températures moyennes décadaires à 20 cm montrent un régime thermique presque identique à celui enregistré à 1,50 m (Figure 80). Comme pour l'été précédent, en hétérostase, il est légèrement plus chaud (surtout en juillet) mais les écarts thermiques ont fortement diminué (Figure 80). Les températures moyennes de la 1^{ère} décade d'août sont toutes supérieures à 23 °C : 24,5 °C en biostase, 23, 7 °C en hétérostase et 24 °C en rhexistase (Figure 80). Les températures minimales en biostase et rhexistase avoisinent 14°C et dépassent les 15°C en hétérostase (Annexe Q, figure 1). Les températures maximales sont extrêmement élevées soit respectivement selon le gradient biorhexistatique, 38,3 °C, 34,6 °C et 36,3 °C (Annexe Q, figure 2). Les maximums absolus sont proches de 40°C (Tableau 66) et les amplitudes thermiques sont très marquées (Annexe Q, figures 3, 4 et 5). Le contraste avec l'été 2002 est saisissant.

Tableau 66 : Valeurs remarquables de l'été 2003

Sonde	Maximum absolu (°C)	Nombre de jours T < 5 °C (moyenne)	Nombre de jours chauds > 15 °C
Air 1,5 cm	39,6	0	79
Biostase, 20 cm	39,5	0	78
Hétérostase, 20 cm	38,6	0	81
Rhexistase, 20 cm	39,3	0	79
Biostase, -10 cm	29,6	0	79
Ligneux bas, -10 cm	26,2	0	72
Hétérostase, -10 cm	36,5	0	61
Rhexistase, -10 cm	35,2	0	64

2.2.1. La saison estivale dans le sol à -10 cm

La canicule de l'été 2003 n'a pas épargné le sol (figure 81). Même si les écarts thermiques avec l'air (20 cm) se maintiennent (Annexe Q, figures 6, 7 et 8), les températures moyennes, minimales et maximales décadaires ont connu une augmentation similaire (Figure 81 et annexe Q, figures 9 à 14). Contrairement à l'ensemble de l'année 2002-2003, en biostasie, les températures moyennes décadaires du sol sont inférieures à celles de l'air pendant toute la période estivale (Annexe Q, figure 6). Comme dans l'air à 20 cm, les températures moyennes de la 1^{ère} décade d'août sont exceptionnellement élevées et dépassent 20 °C (Figure 81). Conformément au schéma général évoqué plus haut, le sol en biostasie et particulièrement en pelouse dense, est le plus chaud (Figure 81). Les températures minimales en biostasie sont aussi les plus élevées et avoisinent 18 °C (Annexe Q, figure 13). En rhexistasie et en hétérostasie elles sont plus basses d'environ 4 à 5 °C. Les températures maximales sont aussi exceptionnellement élevées et particulièrement en hétérostasie et en rhexistasie (Annexe Q, figure 14). Elles atteignent respectivement 27,7 °C en pelouse dense et 24,5 °C dans la lande à *Arctostaphylos uva-ursi* mais sont surtout supérieures à 30 °C en rhexistasie (33 °C) et en hétérostasie (34,2 °C).

En cas de canicule, les écarts dans les régimes thermiques (selon le gradient biorhexistasiq) de l'air et du le sol tendent à s'amenuiser (Figures 80 et 81). Même si comme DAHL (1951 *in* GUIBAN *et al.*, 1995) nous considérons que ce sont surtout les températures d'été, et non celles d'hiver, qui contrôlent la distribution des plantes (protection du manteau neigeux), le stress hydrique et la chaleur estivale n'ont certainement pas été favorables ni dans la canopée, ni dans le sol au voisinage des appareils racinaires. En revanche, les conditions printanières sont idéales.

2.2.3. L'automne dans l'air à 20 cm

Une décroissance rapide des températures dès la 1^{ère} décade de septembre marque la fin de l'été (Figure 80). Comme dans l'air à 1,50 m, le début d'automne est assez doux et plus chaud que celui de la saison 2002-2003 mais le mois d'octobre, pluvieux, entraîne une décroissance rapide des températures (Figure 80). Les amplitudes thermiques sont encore très marquées et les minima élevés, notamment en hétérostasie (Annexe Q, figures 1, 3, 4 et 5). Les régimes thermiques enregistrent les mêmes oscillations et sont assez proches, particulièrement au niveau des températures moyennes et maximales décadaires (Figure 80 et annexe Q, figures 1 et 2). Les premières alternances gel-dégel automnales commencent plus tardivement (1^{ère} décade d'octobre, tableau 67) mais deviennent nombreuses dès la 3^{ème} décade du mois en biostasie et en rhexistasie (Annexe Q, figures 1, 3, 4 et 5). A la fin du mois d'octobre, la situation est presque hivernale mais une période plus clémente s'installe au mois de novembre. La neige fait son apparition au cours de la 3^{ème} décade du mois mais sous un foehn modéré, au début du mois de décembre, la fonte sera rapide. L'entrée dans la période hivernale est plus régulière et l'hiver s'installe durablement dans la 3^{ème} décade de décembre (Figure 80).

Tableau 67 : Valeurs remarquables de l'automne 2003

Sonde	Maximum absolu (°C)	Nombre de jours T < 5°C (moyenne)	Nombre de jours chauds > 15°C	Date de déclin des températures moyennes	Date du 1 ^{er} gel
Air 1,5 cm	33	39	8	4/10/03	5/10/03
Biostasie, 20 cm	30,4	37	6	4/10/03	5/10/03
Hétérostasie, 20 cm	28,9	40	6	5/10/03	Aucun
Rhexistasie, 20 cm	31,1	42	6	4/10/03	5/10/03
Biostasie, -10 cm	20,8	35	5	5/10/03	-
Ligneux bas, -10 cm	19	40	5	5/10/03	-
Hétérostasie, -10 cm	26,1	43	0	4/10/03	5/10/03
Rhexistasie, -10 cm	25,7	49	0	4/10/03	21/10/03

La durée de la période végétative est estimée à environ 5 mois et demi.

2.2.4. L'automne dans le sol à -10 cm

Les régimes thermiques dans le sol suivent, peu ou prou, ceux enregistrés dans l'air à 20 cm (Figure 81 et annexe Q, figures 6, 7 et 8). En biostasie, dès la fin de l'été les températures moyennes décadaires redeviennent supérieures à celles mesurées en surface (Figure 81 et annexe Q, figure 6). Grâce à l'effet tampon de la végétation, les conditions thermiques dans le sol sont moins contraignantes (Figure 81 et annexe Q, figures 9, 10, 13 et 14). Le refroidissement brutal de la 3^{ème} décennie d'octobre, essentiellement lié aux perturbations orageuses, affecte la zone hétérostasique et les minima décadaires chutent en dessous de -8 °C (Figure 81 et annexe Q, figures 11 et 13). En rhexistasie, grâce à l'effet isolant de la granulométrie grossière et à la chaleur emmagasinée au cours de l'été, les conditions thermiques sont moins rudes et le sol se refroidit moins rapidement (Figure 81). Comme dans l'air, les premières alternances gel-dégel ont lieu début octobre mais elles sont plus précoces en hétérostasie (Tableau 67 et annexe Q, figures 11 et 13). En rhexistasie, elles débutent en fin de mois (Tableau 67 et annexe Q, figure 12 et 13). En biostasie et notamment au sein de la lande à *Arctostaphylos uva-ursi*, il est probable qu'elles ont eu lieu en début et fin d'hiver (Figure 81 et annexe Q, figures 10 et 13). En pelouse dense, elles ont peut être légèrement franchi le seuil des 0 °C au cours des mêmes périodes (Figure 81). Au mois de novembre, les températures enregistrent une légère augmentation mais les conditions hivernales s'installent durablement, en hétérostasie et en rhexistasie, dès la 1^{ère} décennie de décembre (Figure 81). En rhexistasie et en hétérostasie, les minima sont restés à peu près négatifs depuis la fin du mois d'octobre (Annexe Q, figure 13) et les maxima franchiront peut être le seuil des 0 °C au cœur de l'hiver.

2.2.5. L'hiver dans l'air (20 cm) et dans le sol (-10 cm)

Une interruption technique, que nous attribuons à une mauvaise manipulation lors de l'arrêt du pluviographe, a entraîné la perte des données hivernales (à l'exception de la sonde air à 1,50 m). Certaines sondes ont aussi connu quelques défaillances au printemps (hétérostasie et biostasie). La saison hivernale s'installe durablement dans l'air (20 cm) et dans le sol (-10 cm) au cours de la 3^{ème} décennie de décembre (Figures 80 et 81). Dans le sol, l'enneigement tardif a permis à l'onde de gel de s'installer durablement en rhexistasie, hétérostasie et biostasie (lignes bas) et les températures moyennes décadaires resteront certainement négatives jusqu'à la fin de la saison (Figure 81). A partir du 22 décembre, Météo-France enregistre 20/30 cm d'épaisseur de neige à 1000 m et les sondes air sont certainement, à la même période à La Plagne, recouvertes de neige. La première décennie de janvier est sous l'influence de conditions anticycloniques plutôt froides qui favorisent la mise en place d'une sous couche de neige gelée. Le manteau neigeux se stabilisera au cours de la 3^{ème} décennie du mois, sous l'influence d'un courant de nord, froid et neigeux. Les températures du sol se sont certainement légèrement stabilisées de la 1^{ère} décennie de janvier 2004 à la 1^{ère} décennie de mars 2004 (Figure 81). Dans l'air, le régime anticyclonique des deux premières décennies de février a certainement provoqué des oscillations thermiques importantes à 20 cm et une réduction du manteau neigeux (Figure 80). La 3^{ème} décennie est la plus arrosée et connaît un épisode pluvio-neigeux important dans la nuit du 22 au 23, prolongé en matinée du 23. Météo-France a relevé 15 à 20 cm de neige à 1500 m.

Au cours de la saison hivernale, l'enneigement a été continu pendant deux mois mais contrairement à l'hiver précédent, le tablier d'éboulis a été enneigé, au moins partiellement, de décembre 2003 à mai 2004. En terme de remaniement de surface, les fontes répétitives ont un impact morphogénique marqué. Nous reviendrons sur cet aspect dans le paragraphe III de ce chapitre.

2.2.6. La saison printanière dans l'air à 20 cm

Un déneigement partiel se produit au cours de la 2^{ème} décennie de mars. Les températures moyennes décennales avoisinent 5 °C mais la clémence des conditions climatiques sera de courte durée (Figure 80). Les maxima franchissent aussi le seuil des 5 °C mais les minima restent inférieurs à 1 °C (Annexe Q, figures 1 et 2). En hétérostasie, ils demeureront toutefois positifs dès la 2^{ème} décennie de mars. Douceur et fraîcheur alternent jusqu'à la 3^{ème} décennie du mois où un courant de nord ouest froid provoque quelques chutes de neige (Figure 80). Deux nouvelles offensives hivernales auront lieu au cours des deux premières décennies d'avril, maintenant les températures moyennes décennales au-dessous de 4°C (Figure 80). Les maxima enregistrent une chute importante en hétérostasie et en rhexistasie mais les minima se stabilisent à la faveur du manteau neigeux (Annexe Q, figures 1 et 2). La fin du mois est plus sèche mais un ultime refroidissement accompagné de chutes de neige sévit au cours de la 1^{ère} décennie de mai 2004. A 1500 m, l'épaisseur de neige atteignait 10 à 20 cm en Chartreuse (Météo-France, 2004).

Le « décollage » des températures est tardif et il faut attendre la 2^{ème} décennie de mai pour voir s'élever les températures moyennes quotidiennes de l'air au-dessus de 5 °C (Tableau 68). Cela correspond à une différence d'environ un mois avec le printemps précédent. La fin du mois est sous régime anticyclonique et la chaleur presque estivale. Au mois de juin, la sécheresse se confirme mais la chaleur est assez irrégulière. Les températures moyennes et minimales décennales progressent lentement (Figure 80 et annexe Q, figure 1).

Tableau 68 : Début de la période végétative au printemps 2004

Sonde	T moyenne > 5 °C
Air 1,5 cm	10/05/04
Biostasie, 20 cm	2 ^{ème} décennie
Hétérostasie, 20 cm	15/05/04
Rhexistasie, 20 cm	12/05/04
Biostasie, -10 cm	-
Ligneux bas, -10 cm	19/05/04
Hétérostasie, -10 cm	-
Rhexistasie, -10 cm	15/05/04

Contrairement au printemps précédent, le régime thermique en rhexistasie est le plus chaud (Figure 80). Le « décollage » des températures est plus rapide, les amplitudes thermiques sont extrêmement marquées et les maxima décennales avoisinent 25 °C au cours de la 3^{ème} décennie du mois de mai (Annexe Q, figures 2 et 5). Après la fonte tardive du manteau neigeux, l'échauffement en surface est plus efficace qu'en biostasie et en hétérostasie où le sol est encore gorgé d'eau. Les écarts disparaîtront dès la 2^{ème} décennie du mois de juin (Figure 80).

2.2.7. Le printemps dans le sol à -10 cm

A -10 cm, les régimes thermiques printaniers présentent pratiquement la même évolution saccadée que dans l'air (Figure 81 et annexe Q, figures 6, 7 et 8). Le « décollage » des températures est aussi tardif et les températures moyennes quotidiennes du sol ne franchiront le seuil des 5 °C qu'au cours de la 2^{ème} décennie du mois de mai (Tableau 68 et figure 81). En rhexistasie, la dernière alternance gel-dégel a lieu le 25 mai 2004 (intensité faible). Conformément au schéma général évoqué précédemment, en zone biostasiq ue et rhexistasique, il est probable que les températures moyennes décennales aient été les plus élevées jusqu'au début du mois de juin (Figure 81). En rhexistasie, les maxima enregistrent une augmentation brutale et les amplitudes thermiques sont extrêmement marquées (Annexe Q, figures 9 à 14). Comme dans l'air, les écarts thermiques semblent se stabiliser à la fin du mois de juin (Figure 81).

L'examen du tableau des degrés-heures positifs montre que la saison printanière a été plutôt fraîche (Tableau 69). Dans un souci de comparaison, nous avons commencé le comptage des degrés-heures positifs à la même date que pour la saison printanière 2003 (Tableaux 65 et 69). L'analyse du tableau confirme le démarrage tardif de la période végétative.

Tableau 69 : Degrés-heures positifs au printemps 2004 et période végétative

Date	Air (1,50 cm)	Bios. (20 cm)	Hétéros. (20 cm)	Rhexis. (20 cm)	Bios. (-10 cm)	Lign. bas (-10 cm)	Hétéros. (-10 cm)	Rhexis. (-10 cm)
25 avril	3216	2701	2391	2999	-	-	-	1600
1 ^{er} mai	3319	2801	2536	3145	-	-	-	1686
8 mai	3901	-	3096	3855	-	-	-	1940
16 mai	5168	-	3677	5276	-	-	-	2364
22 mai	6875	-	5341	7286	-	-	-	3898
31 mai	8928	-	7672	9967	-	-	-	5814
7 juin	10470	-	9354	12196	-	-	-	7130
15 juin	13124	-	12020	14707	-	-	-	9380
30 juin	18059	-	17070	19800	-	-	-	13602

Les valeurs sont faibles, tant en surface qu'en profondeur. Au 16 mai 2004, date du dégel effectif du sol en rhexistase, les degrés-heures positifs représentent une quantité de chaleur presque deux fois et demie inférieure à celle enregistrée au 16 mai 2004. A 20 cm, pour chacune des dates considérées, les valeurs sont aussi largement inférieures et le retard se répercutera sur l'ensemble de la période végétative. Alors que l'année 2003 a été particulièrement chaude et sèche, le printemps 2004 présente une évolution qui correspond peut être plus à une situation « normale ».

Finalement, même si les températures du sol se révèlent être plus basses, les régimes thermiques moyens décennaux de l'air et du sol présentent les mêmes tendances et oscillations, à l'exception peut être au cours des périodes de transition hivernales (Annexe Q, figures 6, 7 et 8). Cependant, l'analyse des conditions thermiques dans le sol et dans la canopée des végétaux ne confirme pas *ipso facto* l'existence d'un gradient bioclimatique biorhexistatique bien individualisé. Il existe mais ne traduit pas une transition biorhexistatique au sens de la biostase vers la rhexistase (et inversement). Il a essentiellement une dimension structurelle, au sens de sa définition première (Chapitre 2, I), mais peu fonctionnelle vis à vis de notre approche bioclimatique. L'explication est simple et est en partie liée à la nature granulométrique grossière de la zone rhexistatique qui agit comme un isolant thermique au même titre que la couverture végétale en biostase. Il est aussi possible que l'approche décennale soit un peu trop « grossière » et il est peut être nécessaire de privilégier une approche bioclimatique quotidienne, pour bien cerner les petites différences.

Dans la canopée des végétaux bas (air, 20 cm), l'analyse des régimes thermiques montre que les températures moyennes décennales en hétérostase sont les plus élevées avec cependant quelques nuances au cours des périodes de transition hivernales (automne-hiver) et printanières (hiver-printemps) (Figure 80). Cet aspect est intéressant car c'est au sein des portions hétérostasiques du tablier d'éboulis que la dynamique de colonisation végétale, particulièrement herbacée, est (et a été) la plus rapide (Chapitre 6). Au contraire, en biostase et en rhexistase les régimes sont assez proches et plus frais. Comme nous l'avons souligné précédemment, l'échauffement de surface et la réflectivité des matériaux semblent être moins prononcés en hétérostase. La surface du sol étant moins poreuse lorsque la granulométrie est fine (moins de vides⁸⁸), le plan d'échauffement est donc plus homogène. Par conséquent, les minima sont plus élevés et les oscillations diurnes et nocturnes moins marquées car l'échauffement homogène de la surface (en durée et en intensité)

⁸⁸ Interstices entre les blocs.

permet aux températures de conserver une certaine constance. En rhexistasie, à cause de la patine claire des matériaux (comme pour la neige) la fraction de lumière réfléchiée est beaucoup plus importante (albédo) et l'échauffement moindre. La chaleur est attirée par les vides et s'enfonce en profondeur. En biostasie, la pelouse dense de couleur sombre emmagasine beaucoup de chaleur mais celle-ci reste dans le sol. En fin de journée, les maxima vont être plus élevés en biostasie et en rhexistasie car l'échauffement en surface est plus tardif mais cet effet va fortement s'atténuer au cours de la nuit (même si le sol reste chaud), ce qui explique que les minima soient plus faibles (Annexe Q, figures 1 et 2).

Dans le sol (-10 cm), les régimes thermiques enregistrent pratiquement les mêmes oscillations qu'en surface mais le modèle est légèrement différent en raison de l'effet isolant du sol. A - 10 cm, les conditions thermiques en hétérostasie sont les plus froides et en biostasie les plus chaudes. La zone rhexistasique présente un régime thermique intermédiaire (Figure 81 et annexe Q). Comme dans l'air à 20 cm, on observe toutefois quelques nuances au cours des périodes de transition hivernales et printanières. En biostasie et en rhexistasie, le sol est plus chaud et l'effet tampon de la végétation et de la granulométrie grossière apparaît clairement au niveau des courbes thermiques. La pelouse dense biostasique et la lande à *Arctostaphylos uva-ursi* emmagasinent beaucoup de chaleur et on retrouve ici le rôle modérateur de la végétation sur les amplitudes thermiques. Lorsqu'il fait chaud, la couverture végétale permet non seulement de fixer la chaleur dans le sol mais aussi de limiter sa déperdition. Lorsqu'il fait froid, elle entretient un microclimat tempéré en profondeur et limite la pénétration de l'onde de gel. Par conséquent, les écarts thermiques entre les minima et les maxima sont moins marqués et les températures minimales sont plus élevées de 3 à 4 °C en moyenne, à l'exception de la saison hivernale (enneigement). En été, les températures maximales sont moins élevées qu'en rhexistasie et en biostasie et ceci peut être dû, en partie, à l'excédent calorifique du sol. Le surplus qui n'est pas assimilé par le sol et les plantes, stagne peut être en surface, au niveau de la canopée. Ceci pourrait aussi expliquer l'échauffement tardif en surface à 20 cm (voir plus haut). En rhexistasie, le sol est légèrement plus frais car la granulométrie grossière des matériaux constitue un isolant qui permet de retenir un peu de fraîcheur en période estivale mais aussi un peu de chaleur en période hivernale. En hétérostasie, les conditions thermiques sont les plus froides en raison notamment de l'infiltration rapide des précipitations et surtout grâce à la présence d'une granulométrie fine, mélangée à de la matière organique, qui procurent une humidité et une fraîcheur durables. Les écarts thermiques entre le sol et l'air sont les plus marqués. Le sol ne bénéficie pas d'une protection aussi efficace que celle existant en biostasie et rhexistasie (végétation dense ou granulométrie grossière), il est donc plus sensible aux variations thermiques journalières et à la pénétration de l'onde de gel.

Dans l'étage nivéo-périglacière, les conditions thermiques dans l'air (20 cm et 1,50 m) et dans le sol sont moins contraignantes qu'à haute altitude. Elles le sont ici d'autant moins en raison de l'exposition favorable du site et de l'évolution climatique des dernières décennies. Comme dans l'air à 1,50 m, l'analyse des régimes thermiques en surface et en profondeur confirme effectivement que l'année 2002-2003 a été plutôt chaude et sèche et que l'année 2003-2004 (à l'exception de la saison estivale) a été plus fraîche et humide. Cependant, il n'en demeure pas moins que ces deux années font partie des années les plus chaudes depuis 1960 (Chapitre 1, 3.1.3).

En terme de processus nivaux (remaniement de surface), une saison hivernale comme celle qui caractérise l'hiver 2003 est moins favorable aux processus morphogéniques de surface, liés à la reptation et à la fonte nivales. Comme nous l'avons souligné précédemment, les fontes répétitives ont un impact morphogénique plus important et c'est plutôt ce qui caractérise l'hiver 2004. De plus, les conditions périglaciaires dans l'air et dans le sol sont beaucoup moins marquées au cours d'une saison de ce type (1.1.2 et paragraphes précédents).

Comme nous l'avons montré plus haut, les conditions thermiques particulièrement chaudes qui caractérisent le printemps et l'été 2003 ont eu des conséquences importantes sur la durée du

manteau neigeux et de la période végétative. La durée de l'enneigement a été moins longue et plus homogène dans le temps (pas de fontes répétitives comme en 2004). Cela a entraîné un démarrage précoce de la saison végétative ainsi qu'un allongement de sa durée. Les conditions thermiques ont été d'autant plus favorables pour les végétaux que ce décollage des températures s'est fait ressentir presque simultanément dans l'air et dans le sol. De plus, suite à la fonte précoce de la couverture nivale, les conditions périglaciaires n'ont pas été extrêmement sévères et le décollage des températures rapide ce qui constitue un facteur de stress moindre pour les végétaux. Cet aspect est tout aussi important que la durée du manteau neigeux car comme le soulignent KÖRNER (1992) et KÖRNER *et al.* (2003)⁸⁹ « *un des principaux facteurs de stress déterminant l'établissement et l'évolution de la végétation en région alpine est certainement la température minimale qui détermine le seuil de tolérance des plantes vis à vis du gel* ». Les auteurs ajoutent qu'il s'agit essentiellement des températures mesurées dans la canopée de la plante ou dans le sol.

Nous ne sommes pas en mesure d'estimer l'épaisseur du manteau neigeux qui a aussi des conséquences indirectes sur la croissance des végétaux car il assure leur alimentation en eau au printemps. A priori, en ce qui concerne le tablier d'éboulis de La Plagne, il ne s'agit pas d'un facteur de stress déterminant car, d'une part, en raison notamment de l'exposition du tablier, les communautés végétales mésophiles à mésoxérophiles supportent des conditions de sécheresse estivale, et d'autre part, la Chartreuse est le massif préalpin le plus humide et enfin, car de nombreux auteurs soulignent que ce sont les espèces qui vivent dans les zones humides (combes à neige, tourbières...) qui seront principalement affectées (OZENDA et BOREL, 1991). Nous insistons aussi sur le fait que la majorité des auteurs souligne que c'est la durée de la couverture neigeuse et notamment la réduction de la durée d'enneigement liée à la hausse des températures qui devrait avoir les incidences les plus sensibles sur la végétation (MYNENI *et al.*, 1997; KELLER et KÖRNER, 2003; KÖRNER *et al.*, 2003).

Selon BENISTON (2004a) et BENISTON et DIAZ (2004), la vague de chaleur qui a affecté une grande partie de l'Europe en 2003 annonce les conditions que l'on peut attendre pour la fin de ce siècle. Le réchauffement thermique est attesté en Chartreuse depuis le début des années 80 (Chapitre 1, 3.1.3), par conséquent, les années chaudes ont été plus nombreuses et il presque certain, au vu des conditions thermiques qui caractérisent l'année 2003, que la végétation ait déjà répondu. L'évolution devrait se poursuivre dans ce sens.

Ces analyses offrent un intérêt supplémentaire à partir du moment où nous les relierons à la géodynamique de surface afin de cerner les principaux épisodes morphogéniques de la période.

III. L'évolution morphodynamique des talus d'éboulis de La Plagne et de l'Aulp du Seuil : principales caractéristiques de la géodynamique de surface en relation avec le gradient biorhexistasique

De nombreux auteurs se sont intéressés à l'étude des mouvements superficiels sur talus d'éboulis et à la définition des principaux processus morphogéniques, en relation avec les facteurs microclimatiques (Chapitre 5, 1.2). La méthodologie utilisée est presque toujours identique (blocs peints et tubes PVC) et la présence végétale souvent occultée⁹⁰. Sur les talus d'éboulis cartusiens de l'étage infra-périglaciaire, la densité végétale est tellement importante qu'il est impossible de l'occulter. Notre approche est donc différente et s'inscrit dans une dynamique de taches (= unités phytomorphologiques) dont l'entrée est à la fois végétale et minérale. L'objectif principal de ce travail est de tenter d'affiner la typologie des mosaïques biorhexistasiques, présentée dans le

⁸⁹ Pour rappel.

⁹⁰ Nous ne faisons pas référence ici aux études dendro-géomorphologiques ou dendro-écologiques qui se sont multipliées depuis quelques années sur dépôts détritiques.

paragraphe II du chapitre 7, en intégrant ici une dimension géodynamique fonctionnelle. Nous précisons aussi la place des principaux épisodes climatiques intervenant sur les processus morphogéniques de surface, en relation avec le gradient biorhexistasique. Cependant, à cause de la lourdeur du protocole, nous avons privilégié une approche saisonnière.

En raison de l'équipement installé sur le site (station microclimatique et parcelles topomicrométrées), le suivi de la géodynamique de surface a été le plus rigoureux à La Plagne. Par conséquent, l'analyse sera plus fine. Pour les deux talus d'éboulis, la première série de marquages a été réalisée en novembre 2001 (état de référence) et la première passe en mars 2002. Comme la station microclimatique a été installée en juillet 2002, nous ne sommes pas en mesure de préciser les conditions climatiques de la période. Cependant, cette première passe permet d'avoir une première approche du fonctionnement géodynamique des phytomorphosystèmes. Les aspects méthodologiques sont développés dans le paragraphe 1.2 du chapitre 5 et le détail des données est présenté dans l'annexe E.

3.1. Fonctionnement géodynamique de surface et typologie morphodynamique de la mosaïque biorhexistasique de l'Aulp du Seuil

3.1.1. Les principaux résultats de l'étude de la géodynamique de surface

Pour rappel, 31 marquages ont été réalisés ce qui représente une surface de 15,7 m² (Figure 82). Deux séries de mesure ont été effectuées pour chacun des marquages : le 30 mars 2002 et le 20 mai 2003. La première série couvre une période de 4 mois (du 23 novembre 2001 au 30 mars 2002) et la deuxième série un peu plus d'une année (du 30 mars 2002 au 20 mai 2003). En raison de l'espacement des séries de mesure, il est difficile de préciser le rôle des principaux épisodes climatiques dans la géodynamique de surface. Cependant, nous sommes toutefois en mesure de définir ses principales caractéristiques et de spatialiser nos résultats.

3.1.1.1. La période du 23 novembre 2001 au 30 mars 2002

A l'issue de la saison hivernale, toutes les surfaces peintes ont connu une déstructuration plus ou moins marquée (Figure 83a). Cependant, tout comme les vitesses de déplacement (Figure 83b), les mouvements superficiels semblent être assez homogènes en intensité. La spatialisation des résultats permet de confirmer le fonctionnement polyphasé du cône d'éboulis (paragraphe 1.4, chapitre 6).

La zone apico-proximale rhexistasique est la plus active (Figure 83 a et b et annexe R, photo 1). La bande peinte ZAPBR1, située au sein du cône apical instable dans le prolongement du couloir d'alimentation, enregistre une déstructuration moyenne (J-5). La présence d'un arbuste, situé 2 mètres à l'aval, a contribué à limiter la déstructuration d'ensemble mais pas le déplacement des matériaux qui enregistre une vitesse moyenne de 22 cm sur la période (5,5 cm/mois). Dans le prolongement du cône apical, au contact de la zone médiale et du bombement central, les chenaux latéraux à matériaux mobiles enregistrent aussi des déstructurations moyennes à fortes (Figure 83a, I-4, J-5). Cependant, les vitesses de déplacement sont assez faibles et atteignent en moyenne 5,2 cm sur la période soit, 1,3 cm/mois (Figure 83b). En réalité, sous l'effet de la nivéo-reptation, les matériaux glissent lentement en masse homogène, ce qui confère une forme particulière aux surfaces peintes (forme en « boomerang », photo 2, annexe R). Dans cette portion du cône, les marquages « référentiels⁹¹ » subissent les déstructurations les plus importantes (Figure 83a, ZAPBJ1 et ZAPBJ2).

⁹¹ Pour rappel, certaines bandes peintes réalisées en rhexistasie constituent ce que nous avons appelé des « référentiels », c'est-à-dire des marquages dont la dynamique est supposée ne pas être influencée par la présence du végétal.

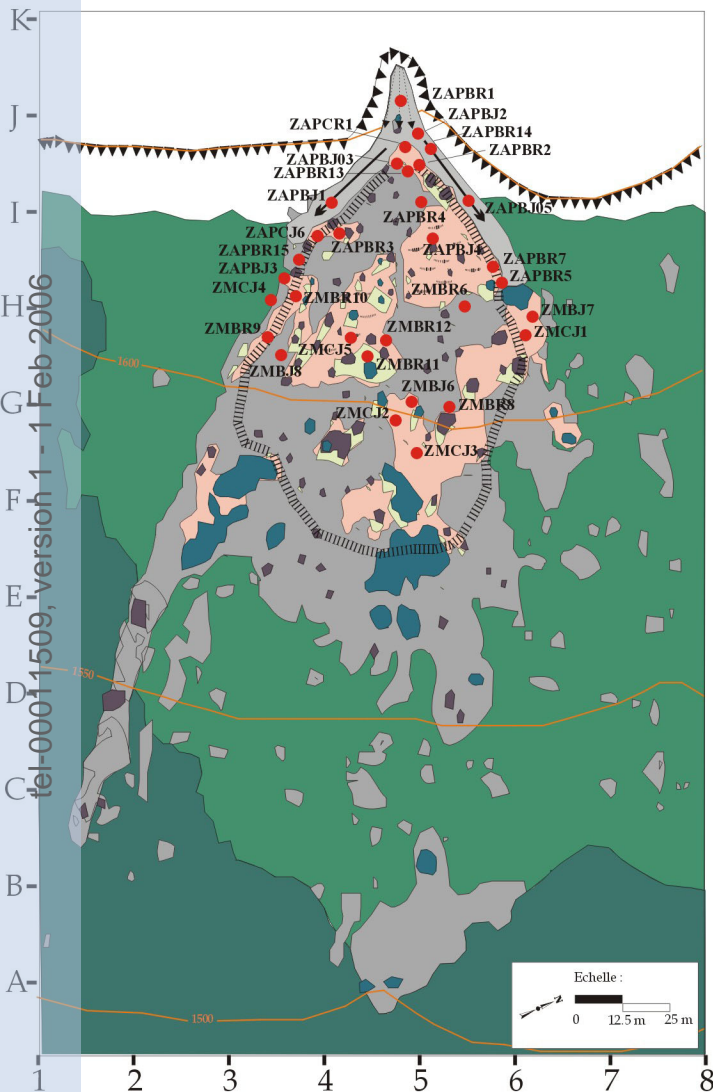
Légèrement plus bas, la zone de contact entre le cône apical (zone apico-proximale) et le bombement central (zone médiale) est également active (Figure 82, figures 83a et b et annexe R, photo 1). Située dans l'axe du couloir d'alimentation mais légèrement protégée par un nerprun, elle reçoit les matériaux issus de l'ébouilisation. A cause de sa forme légèrement ondulée par endroit, elle est sensible aux avalanches et à la nivéo-reptation. Ainsi, la couche de pierraille superficielle est redistribuée vers le bas dévoilant les plages colluviales à fines sous-jacentes (Annexe R, photo 1). Le carré ZAPCR1 semble avoir été épargné par l'activité des processus car sa déstructuration ainsi que les vitesses de déplacement sont faibles⁹² (I-J5). La bande ZAPBJ3 a aussi connu une déstructuration plus faible, en raison de la présence d'un petit îlot de ligneux situé à quelques centimètres en aval (à 50 cm, nerprun et pin à crochets). Les mouvements superficiels ont été plus importants un peu plus bas et sur la partie droite de la zone. La bande ZAPBR13 a été entièrement déstructurée et la vitesse moyenne de déplacement des matériaux est supérieure au mètre (Figures 83a et b).

Il s'agit d'un impact attribué à une ou plusieurs avalanches (avalanches de slush et splash avalancheux) (Annexe R, photo 3). La bande ZAPBR2 a connu le même sort mais d'une intensité moindre car la présence du nerprun a ralenti le déplacement des matériaux vers l'aval. Les chenaux latéraux se prolongent assez loin de part et d'autre du bombement central (Figure 82, I-3,5; I-6). Au niveau du chenal de droite, plus on s'éloigne de la zone d'accumulation et du cône apical, plus la mobilité des matériaux est ralentie (Figures 83a et b). La bande ZAPBJ5 (référentiel) illustre parfaitement ce phénomène. Toujours au sein du chenal, à quelques centimètres du marquage, ce ralentissement permet à quelques espèces lithophiles migratrices, comme *Centranthus angustifolius*, de s'installer et de participer par la suite au freinage géodynamique de surface (Chapitre 7, II). Ce processus confère aux surfaces peintes une forme caractéristique en « arc » (Annexe R, photos 4a, b et c). Le processus est identique au sein du chenal de gauche, sous la partie la plus active (Figure 82, I-H 3,5). En réalité, ce chenal est plus long et s'étend jusqu'à la moitié du bombement axial (Figure 82, H-G3). Il est sectionné en son milieu par la présence d'un chaos de blocs (plusieurs m³) mais en aval de ce dernier, il présente la même structure (Annexe R, photos 5 et 6). Comme le cône est légèrement déjeté vers la gauche, les mouvements superficiels ont tendance à suivre le pendage général du secteur ce qui explique que les marquages soient plus déstructurés à cet endroit (ZAPBR3, ZMBR10 et ZMBR9). ZAPBR15, ZAPBJ9 et ZMCJ4 bénéficient de la protection du chaos de blocs.

Au sein du bombement axial végétalisé, la géodynamique épidermique est fortement ralentie. Les déstructurations et les vitesses de déplacement sont faibles, quelque soit le type de marquage concerné (référentiels ou non) (Figures 83a et b).

⁹² Sa surface est aussi plus petite.

Figure 82 : Localisation des surfaces peintes.
Cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil (1650 m).



Types physiologiques et évolution diachronique :

Classes physiologiques et dynamiques


Formations présentes en 1956

Formation (s) ligneuse (s)

 Forêt


Formation (s) de transition

 Lande arborée

 Ilot arbustif sur formation végétale herbacée


 Ilot arbustif sur éboulis

Formation (s) non boisée (s)

 Piquetage herbacé


Formations développées entre 1956 et 2001

Formation (s) de transition

 Ilot arbustif sur formation végétale herbacée


 Ilot arbustif sur éboulis


Formation (s) non boisée (s)

 Piquetage herbacé

Données géomorphologiques :

 Corniche principale (calcaire urgonien)


 Cône apical actif (régulièrement alimenté et soumis à des processus avalancheux)

 Chenal à matériaux mobiles

 Bombement central stabilisé

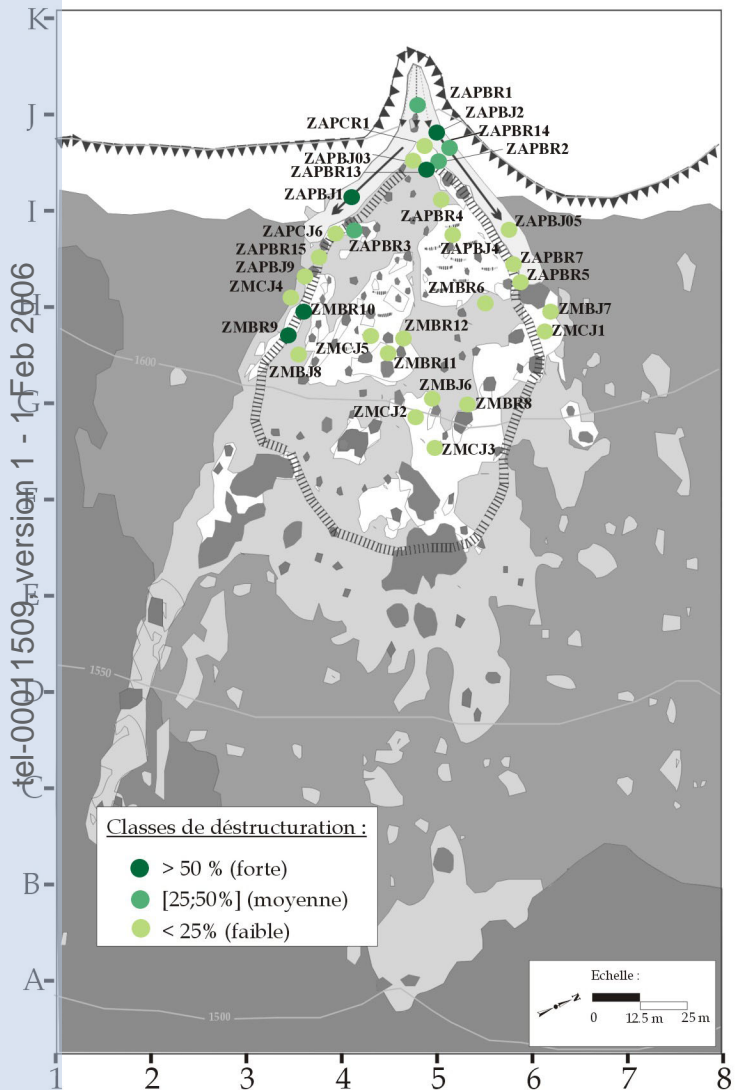
 Terrassette

 Secteur rhexistasique actif

 Secteur rhexistasique stabilisé

 Non cartographié

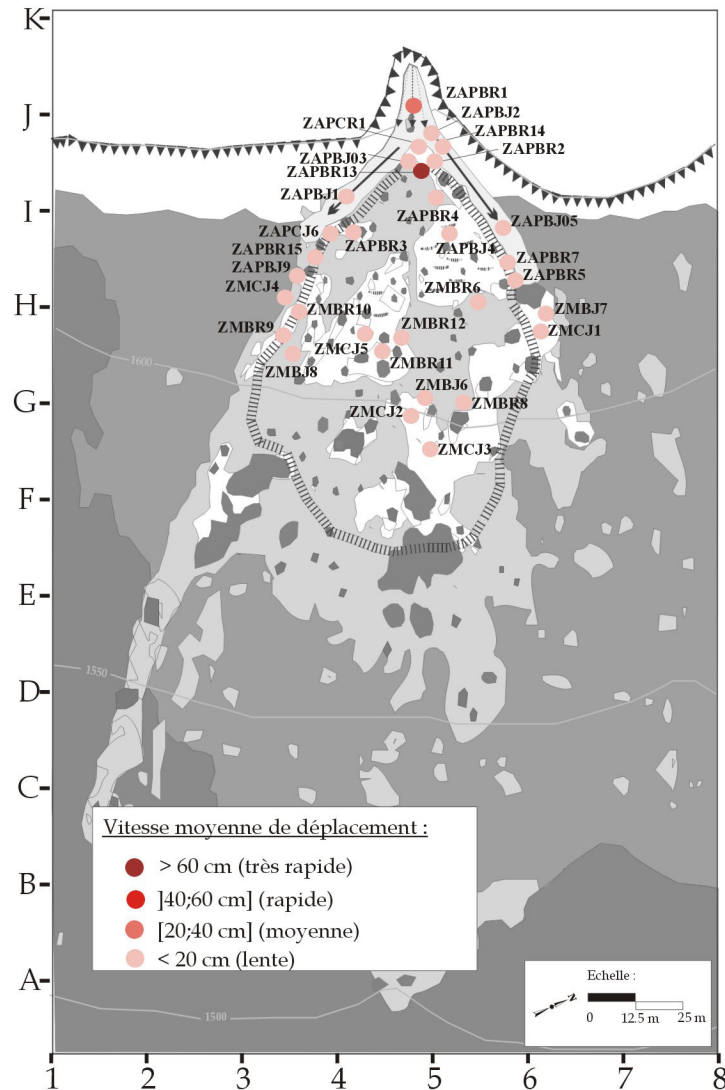
Figure 83a : Déstructuration des surfaces peintes.
Période du 23 novembre 2001 au 30 mars 2002.
Cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil (1650 m)



Source : ARQUES, 2003.

D'après fond de carte diachronique et carte phyto-morphologique.

Figure 83b : Vitesses moyennes de déplacement.
Période du 23 novembre 2001 au 30 mars 2002.
Cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil (1650 m)



Source : ARQUES, 2003.

D'après fond de carte diachronique et carte phyto-morphologique.

Outre l'influence directe de la densité végétale ligneuse et herbacée sur le ralentissement de la géodynamique de surface (hors période hivernale pour la plupart des herbacées), la présence de gros blocs tend à protéger et isoler les portions colluviales à fines toute l'année.

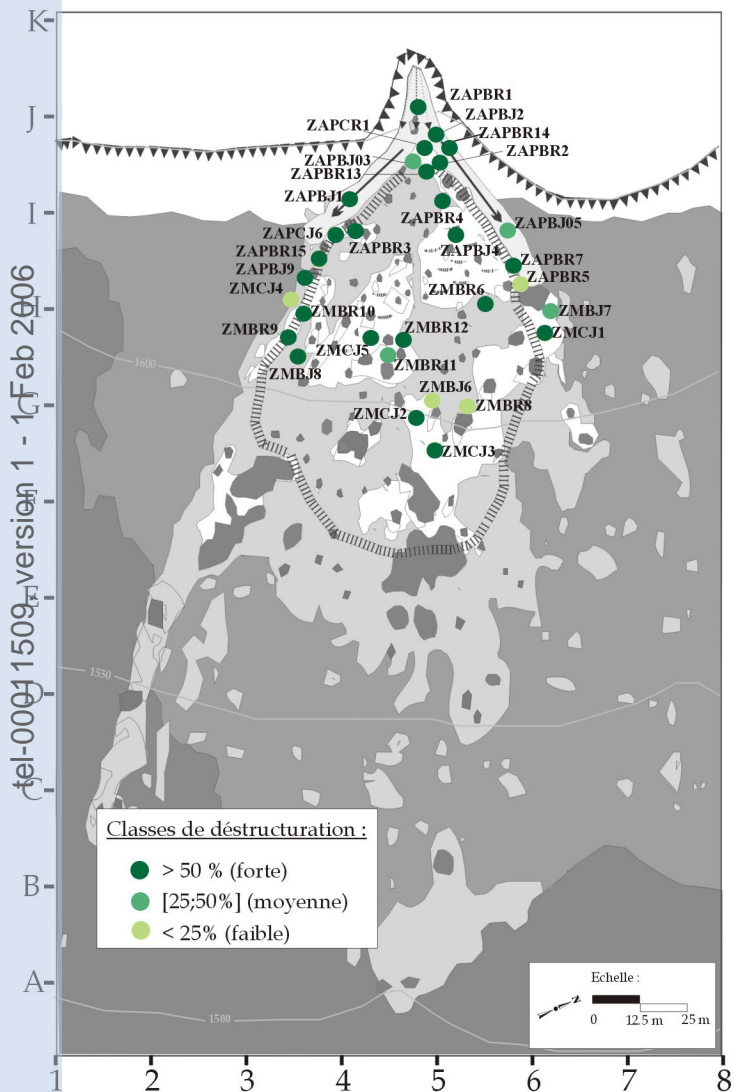
En terme d'efficacité du freinage géodynamique, le type biologique, l'état phénologique et la taille (hauteur et largeur) des végétaux sont des éléments déterminants et particulièrement au cours de la saison hivernale. Ainsi, les ligneux hauts (phanérophytes) ou bas (nanophanérophytes et chaméphytes) exercent un freinage géodynamique toute l'année. Celui-ci est encore plus efficace lorsque les individus se développent en bouquet ou en buisson ainsi qu'à l'issue de la foliation. En ce qui concerne les herbacées (hémicryptophytes, géophytes et thérophytes), la taille et la densité sont importantes. Par exemple, une hémicryptophyte comme *Centranthus angustifolius*, dont la taille d'une touffe est parfois supérieure à 1 m de haut et dont la largeur peut osciller entre 40 et 60 cm, exerce une influence plus importante sur la géodynamique de surface que des espèces telles que *Sideritis hyssopifolia* ou *Rumex scutatus*. Certes, en hiver, elle disparaît sous le manteau neigeux mais les rejets (morts) de l'année en cours persistent au moins jusqu'au printemps (Annexe R, photo 4). Le freinage géodynamique est moins efficace mais la présence des larges touffes influence le plan de glissement de la couverture nivale et le déplacement des matériaux.

3.1.1.2. La période du 30 mars 2002 au 20 mai 2003

La période se résume à un événement particulier. Le cône d'éboulis a été fortement perturbé par une avalanche lourde d'une intensité exceptionnelle, favorisée par la hausse brutale des températures au printemps 2003 (1.1.2.1 et 2.1.7 et 2.1.8). D'une manière générale à l'Aulp du Seuil, la fonte nivale précoce et l'instabilité du manteau neigeux sont favorisées par la position d'adret du site. Cette année là, l'instabilité de la couverture nivale a été amplifiée. Ce phénomène explique les fortes déstructurations et la rapidité des déplacements qui ont été enregistrées sur l'ensemble du dépôt (Figures 84a et b). La zone apico-proximale a été fortement touchée et l'avalanche a purgé la partie amont du chenal latéral de droite (Figure 84a et b et annexe R, photo 7a et b). La configuration actuelle du chenal révèle une structure sous-jacente qui confirme l'idée d'un fonctionnement torrentiel ancien (forte concavité, levée de berge). Le chenal situé à gauche a lui aussi été extrêmement perturbé mais si les déstructurations et les vitesses de déplacement des matériaux sont importantes, l'impact n'est pas comparable.

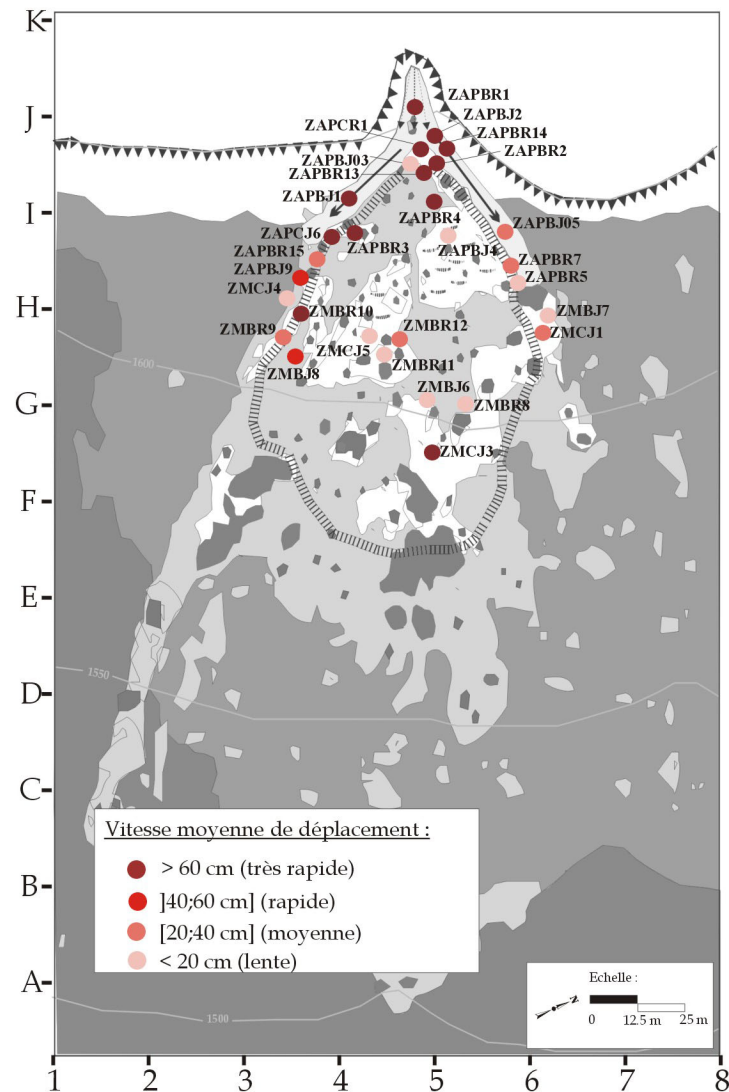
Finalement, cette analyse révèle deux types de fonctionnement géodynamique opposés mais elle confirme bien le découpage réalisé, lors de l'étude topo-sédimentologique et phyto-morphologique (Chapitre 6, 1.4). Le secteur est cartographié dans la Carte de Localisation Probable des Avalanches (CLPA), comme d'ailleurs la plupart des talus d'éboulis cartusiens. Nous savons que la zone apico-proximale (cône apical et chenaux latéraux) est régulièrement remaniée par des processus avalancheux mais en 7 années de recherche (depuis la maîtrise), c'est bien la première fois que nous observons une telle intensité. Par conséquent, en raison du caractère exceptionnel de cet événement, nous utiliserons les données de la première période, plus représentative de la géodynamique actuelle, pour affiner notre cartographie phytomorphodynamique de la mosaïque biorhexistatique pour l'Aulp du Seuil.

Figure 84a : Déstructuration des surfaces peintes.
Période du 30 mars 2002 au 20 mai 2003.
Cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil (1650 m)



Source : ARQUES, 2003.
D'après fond de carte diachronique et carte phyto-morphologique.

Figure 84b : Vitesses moyennes de déplacement.
Période du 30 mars 2002 au 20 mai 2003.
Cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil (1650 m)



Source : ARQUES, 2003.
D'après fond de carte diachronique et carte phyto-morphologique.

3.1.2. Découpage phyto-morphodynamique de la mosaïque biorhexistasique de l'Aulp du Seuil

7 unités phyto-morphodynamiques caractérisent la mosaïque de l'Aulp du Seuil (Carte 28).

- Les écosystèmes biostasiques : assez stables, ces formations végétales sont situées en périphérie du cône d'éboulis. Elles se développent sur des sols évolués à matrice fine et la végétation est continue :

- **la hêtraie-sapinière-pessière (*Fagus sylvatica*, *Picea abies* et *Abies alba*)** : principale formation ligneuse dense, elle présente un faciès mésophile, signe d'une adaptation aux conditions climatiques de ce rebord oriental du massif, qui bénéficie d'un ensoleillement important (position d'adret). Elle se développe essentiellement au sud, sud-ouest et à l'est du talus d'éboulis, de manière continue;

- **la lande arborée à *Laserpitium siler*** : formation de transition xérophile pionnière, elle constitue un groupement de substitution de la hêtraie mésoxérophile. En général, elle se développe sur des pentes à sols secs. A l'Aulp du Seuil, elle ceinture le cône d'éboulis et couvre la plus vaste surface. Formation stable, aérée et peu dense, elle accueille de nombreuses espèces ligneuses présentant pour certaines des phytofaciès franchement xérophiles : *Sorbus aria*, *Rhamnus alpinus*, *Arctostaphylos uva-ursi* et *Amelanchier ovalis* et pour d'autres, des phytofaciès plutôt mésoxérophiles : *Sorbus aucuparia*, *Fagus sylvatica* et *Pinus uncinata*.

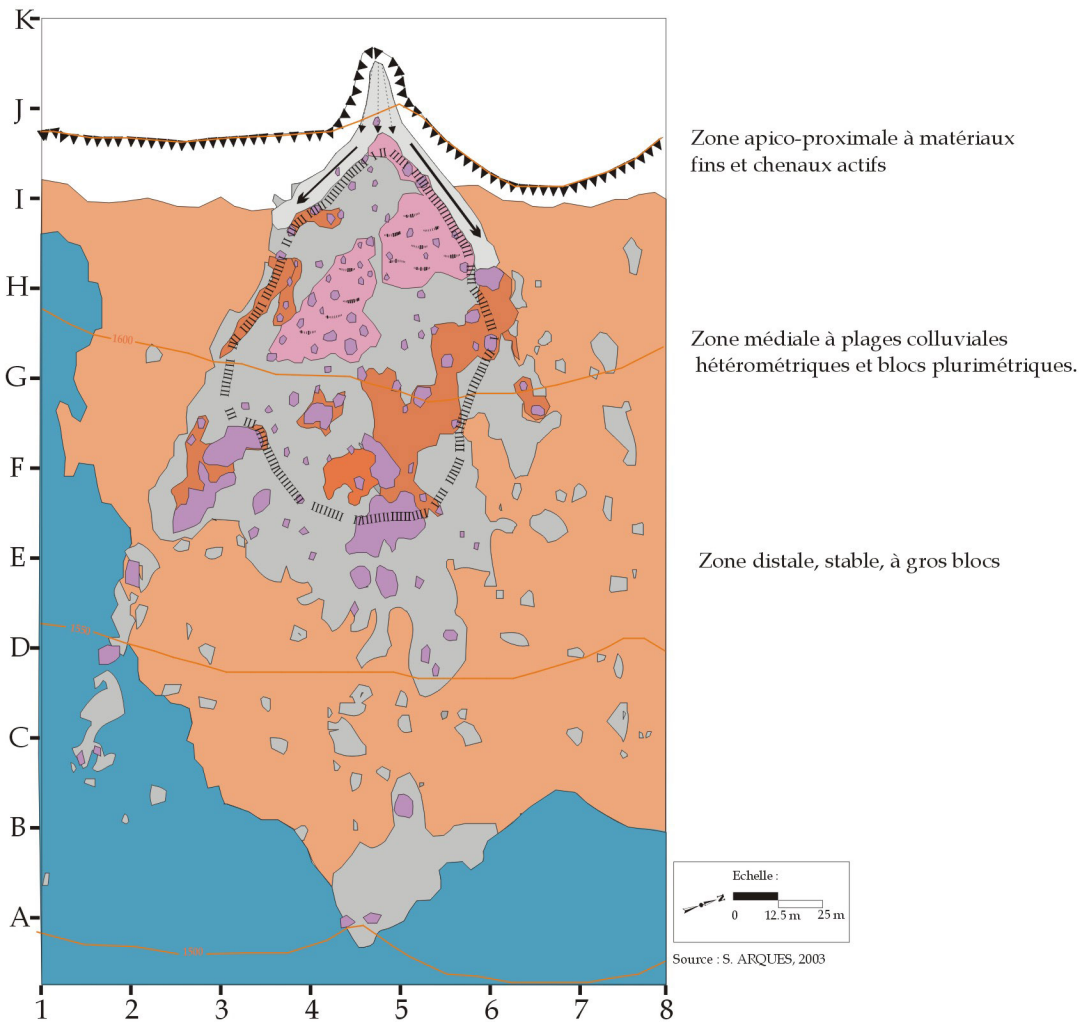
- Les phytomorphosystèmes hétérostasiques : pénestables à stables, ils sont caractérisés par une granulométrie hétérométrique et des sols moyennement évolués. La végétation se développe en tache, par piquetage plus ou moins dense. Ils sont colonisés par les espèces dites « sociales », à forte amplitude écologique, ainsi que par les espèces lithophiles (espèces spécialisées) :

- **le piquetage herbacé sur bombement axial à *Valeriana montana*** : phytomorphosystème à progression rapide entre 1956 et 2001, il est caractérisé par un fonctionnement géodynamique fortement ralenti par la présence de gros blocs erratiques et la densité végétale herbacée et ligneuse. Il a été principalement colonisé par des espèces lithophiles stabilisatrices (Chapitre 7, II), qui se développent au sein des plages colluviales peu mobiles, à matériaux hétérométriques. A cause de leur système racinaire sédentaire, elles sont incapables de suivre ou de subir le mouvement. La mobilité superficielle est, ici, particulièrement faible et elles profitent pleinement de la protection offerte par les gros blocs. *Valeriana montana* et *Silene vulgaris* appartiennent à cette catégorie des végétaux à système souterrain stabilisateur et affectionnent tout particulièrement les plages colluviales graveleuses. *Sideritis hyssopifolia* privilégie les secteurs à fines.

A ce premier groupe stabilisateur, s'ajoutent les espèces lithophiles migratrices « par allongement et régénération » (Chapitre 7, II) telles que *Rumex scutatus* et *Poa cenisia*. Elles ne participent pas réellement à la stabilisation du substrat (sauf si leur densité est importante) mais sont adaptées aux mouvements de faible ampleur;

- **les terrassettes à *Thymus praecox* et *Globularia cordifolia*** : phytomorphosystème assez stable d'un point de vue géodynamique, il montre une progression rapide entre 1956 et 2001. Contrairement au phytomorphosystème précédent, les terrassettes se sont développées dans un secteur du bombement central, proche de la zone apico-proximale active (H 4,5, H 5,5 et I-J 5). A cet endroit, lors de la fusion nivale, la fourniture en fines est plus importante et c'est par ailleurs ici que la convexité du bombement est la plus marquée. La présence de gros blocs, enfouis en profondeur dans le substrat, constitue une protection assez efficace contre la chute des fragments provenant de l'éboulisation de la corniche et les remaniements de surface provoqués par les avalanches.

Carte n° 28 : Mosaique biorhexistatique de l'Aulp du Seuil









tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2006

Légende :

- Ecosystèmes biostatiques :**
- Formation (s) ligneuse (s)
 - Hêtre-sapinière et pessière (faciès mésophile)
 - Formation (s) de transition
 - Lande arborée à *Laserpitium siler* : avec *Arctostaphylos uva-ursi*, *Carex sempervirens*, *Sesleria varia*, *Lotus corniculatus*, *Euphorbia cyparissias*, *Scabiosa columbaria*, *Globularia nudicaulis*, *Campanula rotundifolia*, *Helianthemum nummularium*, *Galium anisophyllum*, *Cirsium arvense*. **Formation stable entre 1956 et 2001.**

- Phytomorphosystème (s) hétérostatique (s)**
- Formation (s) non boisée (s)
 - Piquetage herbacé sur bombement axial à *Valeriana montana*, *Leucanthemum adustum*, *Silene vulgaris*, *Galium anisophyllum*, *Sideritis hyssopifolia*, *Poa cenisia*, *Erinus alpinus*, *Teucrium montanum*, *Rumex scutatus*. **Plages colluviales à matériaux hétérométriques. Présence de gros blocs. Formation à progression rapide entre 1956 et 2001.** Déstructuration faible et vitesses de déplacement lentes.
 - Terrassettes à *Thymus praecox* et *Globularia cordifolia* sur bombement axial : *Valeriana montana*, *Leucanthemum adustum*, *Silene vulgaris*, *Galium anisophyllum*, *Sideritis hyssopifolia*, *Poa cenisia*, *Erinus alpinus*, *Teucrium montanum* et *Rumex scutatus*. **Plages colluviales à graviers et fines. Présence de gros blocs. Formation à progression rapide entre 1956 et 2001.** Déstructuration faible et vitesses de déplacement lentes.
 - Ilot (s) arbustif (s) sur éboulis (non différencié (s)) : *Rhamnus alpina*, *Salix caprea*, *Sorbus aria*, *Amelanchier ovalis* et *Pinus uncinata*. **Plages colluviales à petits blocs, blocs moyens et gros blocs. Formation à progression rapide entre 1956 et 2001.** Déstructuration faible et vitesses de déplacement lentes.

- Phytomorphosystème (s) rhexistatique (s)**
- Secteur rhexistatique stabilisé à *Centranthus angustifolius*. **Plages colluviales à matériaux grossiers. Régression rapide entre 1956 et 2001.** Déstructuration faible et vitesses de déplacement lentes.
 - Secteur rhexistatique actif à *Centranthus angustifolius*. **Cône apical et chenaux à matériaux grossiers mobiles. Actifs entre 1956 et 2003.** Déstructuration moyenne à forte et vitesses de déplacement lentes à très rapides.

- Données géomorphologiques :**
-  Corniche principale (calcaire urgonien)
 -  Cône apical actif (régulièrement alimenté et soumis à des processus avalancheux)
 -  Chenal à matériaux mobiles
 -  Bombement central stabilisé
 -  Terrassette
 -  Non cartographié

Au sein des plages colluviales à fines, les terrassettes ont été principalement façonnées par les végétaux « recouvreurs⁸⁶ » tels que *Thymus praecox* et *Globularia cordifolia*. Fortes productrices de matière organique, ces espèces participent à l'édification et à la stabilisation du micro-modèle. Leur appareil végétatif aérien, très compact, emprisonne les particules fines et contribue au ralentissement des mouvements superficiels. Au sein de ces secteurs à fines, en raison de la densité de leur couverture végétale (structure peu aérée), ces deux espèces ne souffrent pas d'une concurrence accrue. Lorsque la matrice devient plus graveleuse, les espèces à système « souterrain » stabilisateur s'installent. Cela explique la présence de *Valeriana montana*, *Silene vulgaris* et *Sideritis hyssopifolia*. *Rumex scutatus*, *Poa cenisia* et *Galium anisophyllum* (lithophiles migratrices) s'installent au sein des portions les plus actives alors que *Erinus alpinus* et *Teucrium montanum* se développent de manière plus sporadique, en raison de la concurrence interspécifique;

- **les îlots arbustifs sur éboulis** : il s'agit d'arbres isolés ou d'îlots arbustifs dont la progression a été rapide entre 1956 et 2001. Au sein du bombement central, *Rhamnus alpina* cohabite avec les espèces herbacées et sous-arbustives des phytomorphosystèmes à terrassettes et piquetage herbacé. Il est parfois accompagné de *Salix caprea* et *Amelanchier ovalis*. La densité ligneuse est très importante et chaque individu contribue à la stabilisation du substrat, en fixant les colluvions. Dans la partie supérieure du bombement, il s'agit essentiellement d'arbres et d'arbustes isolés (G-I 5). Plus en aval, au contact de la zone distale stable à gros blocs (plusieurs m³), les îlots se sont multipliés et densifiés (F 3; E-G 5; D-E 5). Ils sont principalement constitués de *Rhamnus alpina* et *Salix caprea*. *Sorbus aria* privilégie la périphérie du cône, là où l'activité géodynamique est la plus réduite (F 3; G-F 6,5; E 2). *Pinus uncinata* est assez rare sur le cône et les quelques individus présents, occupent essentiellement les secteurs à gros blocs du bombement central. Si la granulométrie n'est pas, pour lui, un facteur limitant, la mobilité des matériaux empêche son installation.

• **Les phytomorphosystèmes rhexistasiques** : localement instables, ils sont caractérisés par une absence de sol (lithosol) et une matrice granulométrique grossière. La végétation se développe en touffes dispersées :

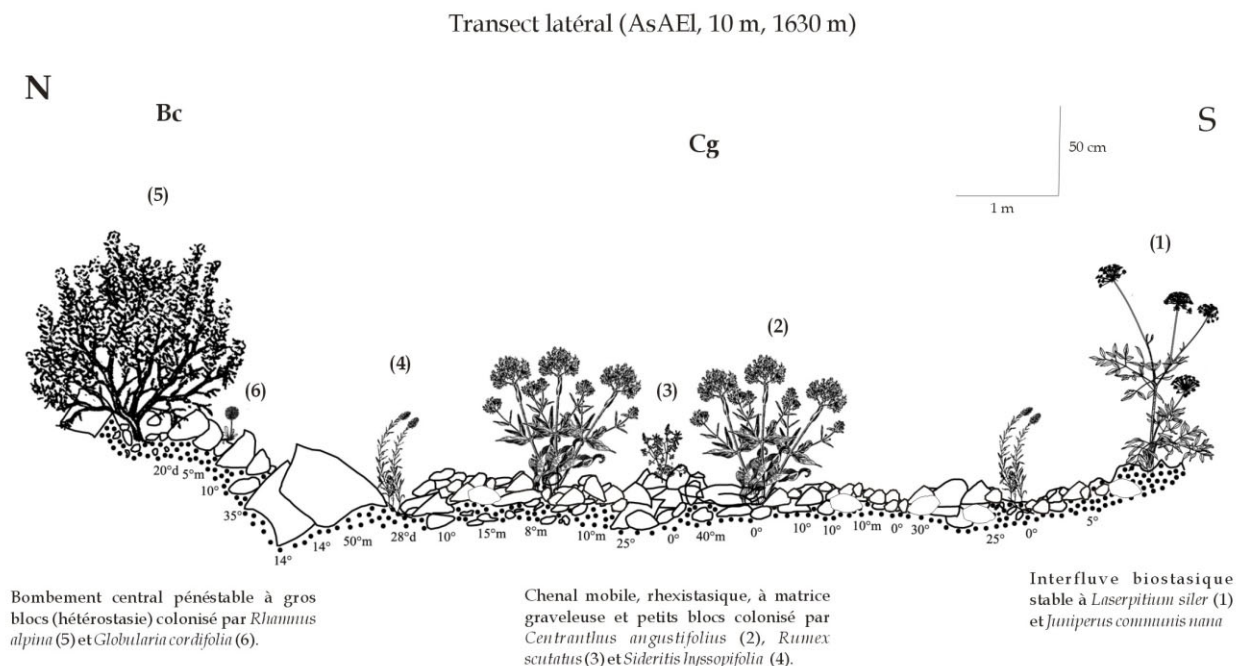
- **le secteur rhexistasique stabilisé à *Centranthus angustifolius*** : au sein du bombement central, elle occupe les plages colluviales à blocs moyens ($10 \leq L \leq 20$). Espèce lithophile migratrice par régénération (Chapitre 7, II), elle se développe sous la forme de larges et grandes touffes qui contribuent à ralentir la géodynamique de surface (Annexe R, photo 4a, b, c). Sa présence et sa forte densité, dans les portions colluviales où la mobilité des matériaux est réduite et où la pente relativement faible ($20-25^\circ$), est un gage de stabilité. Dans ce cas, son système racinaire adhère fortement au substrat et elle se comporte de la même manière que les espèces lithophiles stabilisatrices;

- **le secteur rhexistasique actif à *Centranthus angustifolius*** : rare au sein du cône apical actif, elle s'est installée dans les chenaux latéraux à matériaux mobiles (Figure 85). En raison de sa bonne capacité de régénération⁸⁷, elle s'adapte à la mobilité des matériaux et supporte même, parfois, les remaniements brutaux.

⁸⁶ Ou espèces édifcatrices à système aérien stabilisateur (Chapitre 7, II).

⁸⁷ « Le système souterrain très ramifié et flexueux est composé de longs cordons hypogés qui proviennent des pousses annuelles successives de tiges recouvertes et rabattues par les glissements de printemps et d'automne » (SOMSON, 1983). De nouvelles tiges ou touffes se forment ainsi chaque année sur celles de l'année précédente recouvertes par les matériaux, ce qui provoque l'allongement et la ramification du système végétatif souterrain (Annexe R, photo 4a, b, c).

Figure 85 : Phytomorphoséquence transversale au contact du chenal latéral graveleux (Cg) et du bombement central (Bc).



3.2. Fonctionnement géodynamique de surface et typologie morphodynamique de la mosaïque biorhexistasique de La Plagne

3.2.1. Les principaux résultats de l'étude de la géodynamique de surface : le calendrier des processus morphogéniques

53 marquages (28,8 m²) ont fait l'objet d'un suivi saisonnier entre le 19 novembre 2001 et le 20 mai 2004 (Figure 86). Cinq séries de mesure ont été réalisées sur chacun des marquages. Au pas de temps saisonnier, nous aborderons le rôle des principaux processus de remaniement dans la géodynamique de surface (impact de la pluie, nivéo-reptation et fusion nivale). Nous préciserons aussi le rôle du gel et des précipitations automnales grâce au suivi des parcelles topomicrométrées. Nous renvoyons au paragraphe 1.2 du chapitre 5 pour les aspects méthodologiques et aux annexes E et F pour les données brutes.

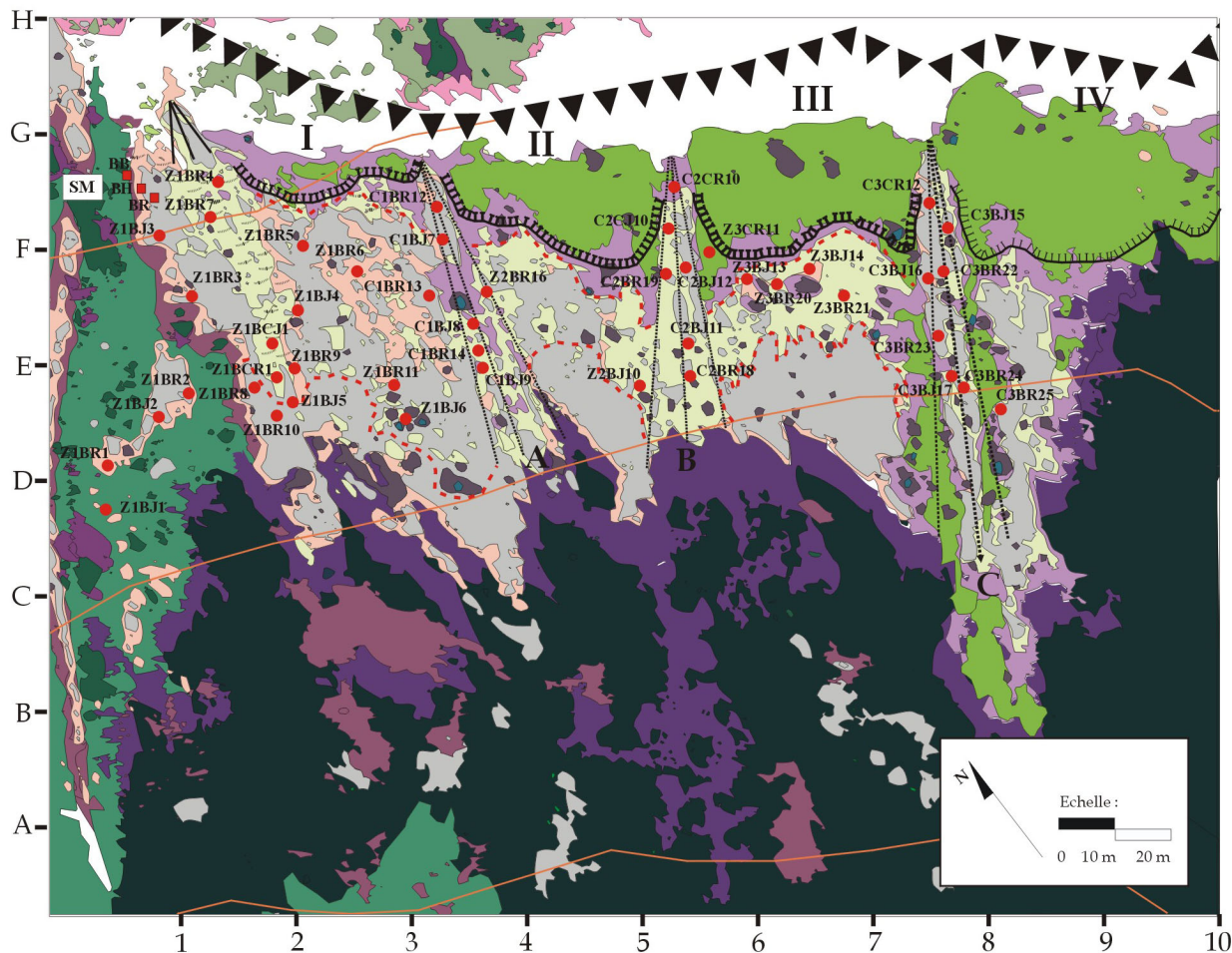
3.2.1.1. La période du 19 novembre 2001 au 25 mars 2002

A l'issue de la saison hivernale, un premier découpage géodynamique apparaît (Figures 87a et b). Celui-ci confirme le fonctionnement phyto-morphologique et topo-sédimentologique mis en évidence dans le paragraphe 1.5 du chapitre 6.

Cinq phytomorphosystèmes se distinguent nettement et présentent une morphodynamique de surface relativement active. Il s'agit des trois petits cônes semi-végétalisés, de la microlave hydro-gravitaire et d'une plage colluviale située au sein de la lande à *Arctostaphylos uva-ursi* (Figures 87a et b). Les fortes déstructurations et les vitesses de déplacement lentes révèlent ici les effets de la nivéo-reptation et de la fusion nivale.

En raison de la forte pente (34°) et de la mobilité des matériaux, la **plage colluviale graveleuse** constitue actuellement un milieu hostile pour la strate herbacée. Le secteur connaît une fermeture rapide depuis 1911, grâce à la présence d'*Arctostaphylos uva-ursi*, mais la géodynamique de surface est active (Figures 87a et b, E 1).

Figure 86 : Localisation des surfaces peintes (bandes et carrés).
 Tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m)



Sources : S. ARQUES, 2003
 D'après fond de carte diachronique 1978-2001 et carte phyto-morphologique

tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2006

Types physiologiques et évolution diachronique :

Formations présentes en 1978

- Piquetage herbacé
- Pelouse
- Prairie
- Lande
- Ilot arbustif sur éboulis
- Ilot arbustif sur formation végétale herbacée et sous-arbustive
- Forêt

Formations développées entre 1978 et 2001

- Piquetage herbacé
- Pelouse
- Prairie
- Lande
- Ilot arbustif sur éboulis
- Ilot arbustif sur formation végétale herbacée et sous-arbustive
- Forêt

Données géomorphologiques :

- Escarpement secondaire
- Zonation longitudinale
- Cône apical actif
- Cône pénestable
- Cône "raviné" pénestable
- Terrassette (sur microlave hydro-gravitaire active)
- Bombement apical à fines
- Secteur rhexistasic actif
- Secteur rhexistasic stabilisé
- Z1BR10 Surface peinte
- BB Parcelle topomicrométrée
- Non cartographié

Figure 87a : Déstructuration des surfaces peintes. Période du 19 novembre 2001 au 25 mars 2002.
 Tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m)

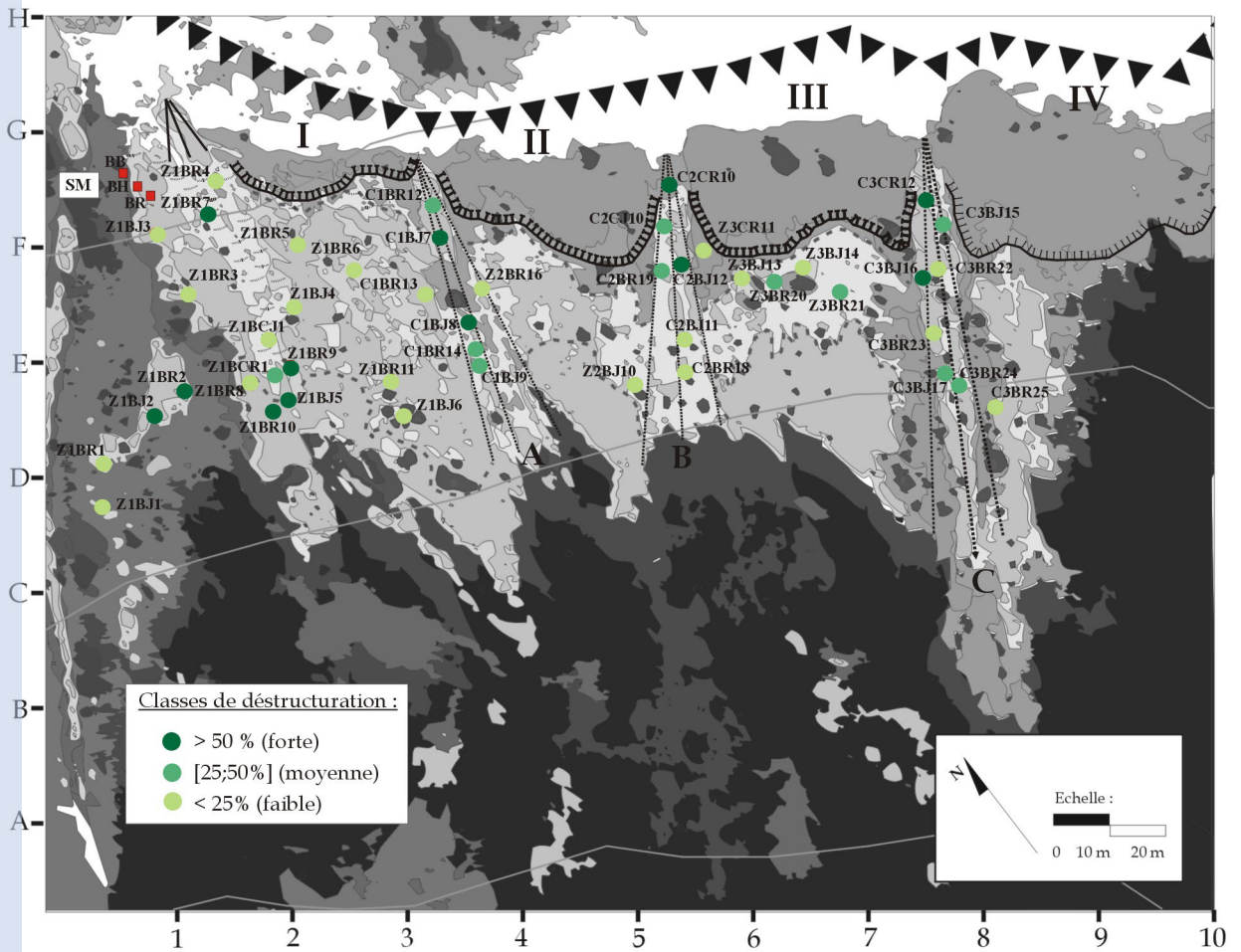
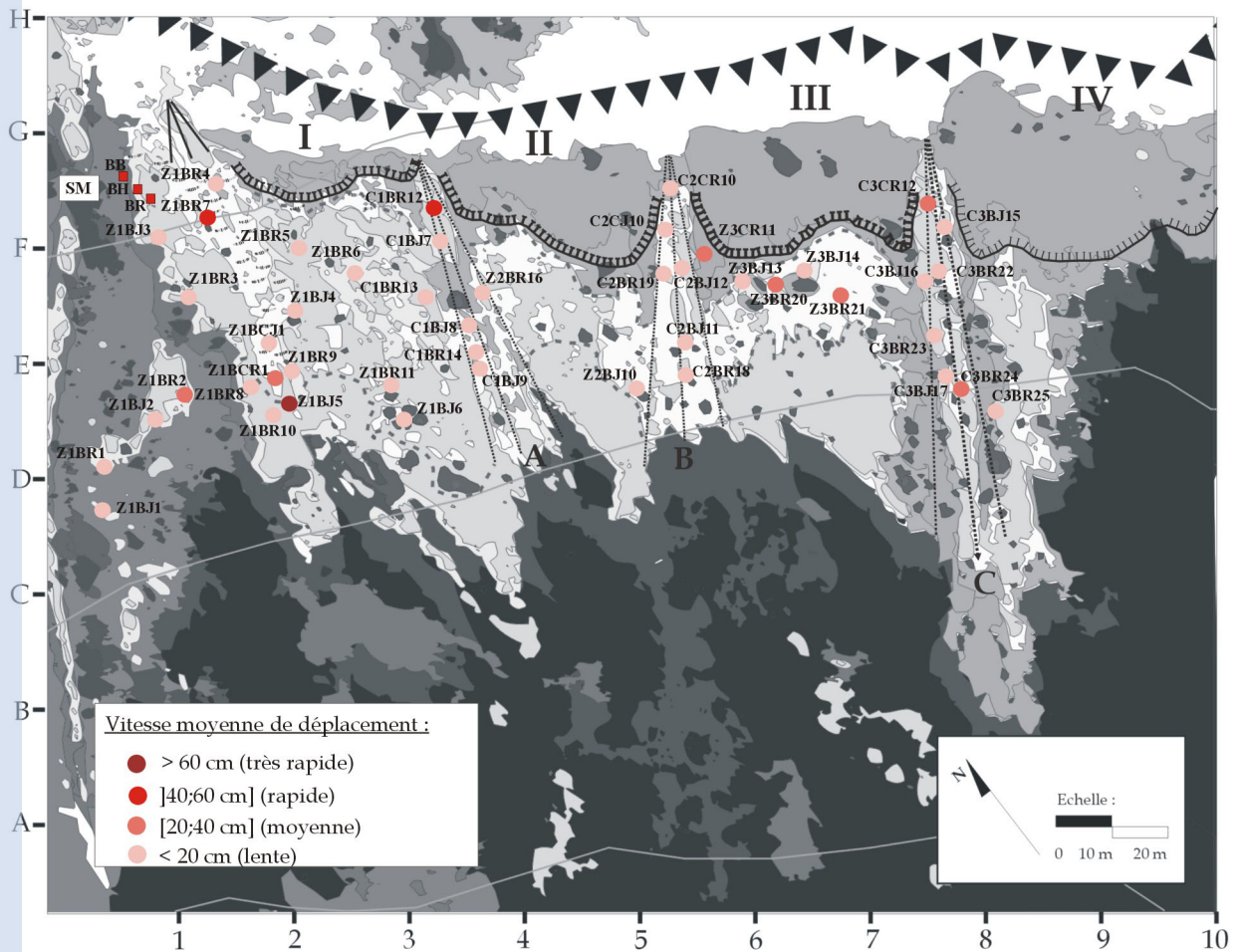


Figure 87b : Vitesses moyennes de déplacement. Période du 19 novembre 2001 au 25 mars 2002.
 Tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m)



tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2006

Si son appareil racinaire arrive à s'ancrer profondément dans le substrat, ses tiges et ses rameaux rampants sont capables de recouvrir de vastes surfaces colluviales mobiles. La mobilité du substrat, si elle n'agit qu'au niveau de son appareil aérien, ne constitue pas un facteur limitant pour la dynamique de l'arbuste (Annexe R, photo 8 a et b).

La microlave hydro-gravitaire (F 1,5) est relativement stable dans sa partie médiale car la densité végétale est importante. Cependant, les quelques mètres situés au débouché du petit cône actif (G1) sont régulièrement remaniés par sa purge annuelle, sous l'effet de la nivéo-reptation. Ce qui explique la forte déstructuration et les vitesses rapides enregistrées par la bande Z1BR7 (la bande Z1BR4 n'est pas tout à fait dans l'axe du cône). Beaucoup plus bas, au niveau de la terminaison distale de la microlave (E-F 2), le processus est sensiblement similaire. Au cours des périodes hivernales successives, sous l'effet de la nivéo-reptation et de la fusion nivale, les graviers et les petits blocs en transit s'accumulent progressivement dans la partie distale de la microlave. Par « à-coup », ils sont expulsés en masse et les coulées de pierraille graveleuses ont tendance à recouvrir progressivement le secteur rhexistatique sous-jacent (Annexe R, photo 9a et b). Ce processus entraîne une forte déstructuration des surfaces peintes ainsi que des vitesses de déplacement des matériaux assez rapides (Figures 87a et b, D-E 2).

Au sein des **cônes pénestables** (Figures 87 a et b, A, B et C) et notamment dans les zones apico-proximale et médiale, la granulométrie est assez fine ($1 \leq L \leq 10$), à l'exception des marquages Z2BR16, C3BR22, C3BR23 et C3BJ17. Les plages colluviales sont régulièrement remaniées par les fragments issus de l'éboulisation et la nivéo-reptation. Au-dessus de chaque cône, l'escarpement secondaire présente des facettes marno-calcaires extrêmement fissurées. Ces pans de corniche instables s'écroulent régulièrement, comme en 1998 et 2004 (Photo 4, paragraphe 1.5, chapitre 6). Comme les cônes ne sont pas aussi végétalisés que les bombements apicaux, l'impact des fragments (éboulements, éboulisation, haloclastie) sur les plages colluviales est plus marqué. Pour la période considérée, il est assez difficile d'isoler les effets de l'éboulisation de ceux de la nivéo-reptation. Les mouvements sont importants et la pente et la granulométrie sont assez homogènes. Les déstructurations sont fortes, notamment au sein des zones apico-proximales à fines, mais à l'exception de deux marquages (C1BR12 et C3CR12), les vitesses de déplacements sont assez lentes. Dans la zone médiale, les déstructurations sont plus modérées en raison de la présence de quelques ligneux mais les vitesses toujours aussi lentes. Les bandes ont en général « explosé » et les fragments peints sont expulsés lors qu'ils sont touchés par les blocs mais la neige a pu effacer leurs traces car nous n'avons pas relevé de signes particuliers. Il peut aussi s'agir de petits fragments dont l'impact a été négligeable ce qui expliquerait les vitesses de déplacement. Enfin, cela pourrait être uniquement l'effet de la nivéo-reptation car la pente est assez forte (30-35°). La déstructuration d'une surface peinte peut se faire de deux manières, soit par une érosion (déplacements des fragments à l'extérieur du marquage) soit par une accumulation (arrivée de fragments non peints). L'éboulisation et la nivéo-reptation sont susceptibles de produire les deux. L'analyse des périodes suivantes devrait nous permettre de préciser le rôle de l'éboulisation et de la nivéo-reptation dans les remaniements de surface.

Les zones médiales des petits tabliers I, II et III (E-F 3; E-F 7) sont assez stables. Le calcaire des pans de corniche est plus sain et moins fragmenté par conséquent, l'éboulisation est moins active. La faiblesse des déstructurations et la lenteur des vitesses de déplacement des fragments s'expliquent par la présence d'une granulométrie grossière (Figures 87 a et b). Les matériaux subissent essentiellement des mouvements rotationnels et ils ne se déplacent que très rarement. D'autre part, la géodynamique de surface est aussi fortement ralentie par la présence de *Centranthus angustifolius*.

3.2.1.2. La période du 25 mars 2002 au 24 octobre 2002

La période se caractérise par un été frais et un automne assez doux⁸⁶ (1.1.2.1). Les alternances gel/dégel automnales sont quasiment absentes (3 cycles à gel faible dans la 3^{ème} décennie d'octobre). En revanche, les précipitations ont été abondantes et parfois d'assez forte intensité (1.2.3.1). Elles ont été respectivement de 95,2 mm en juillet, 145,2 mm en août, 76,6 mm en septembre et 188,3 mm en octobre soit, un total pluviométrique de 505,3 mm pour la période. Il y a eu un maximum pluviométrique au cours de la 1^{ère} décennie d'août (104,4 mm) puis un deuxième au cours de la 2^{ème} décennie d'octobre (96,5 mm).

Du 1^{er} juillet 2002 au 31 août 2002, on relève trois journées où les précipitations ont été supérieures à 20 mm/24 h, les intensités varient entre 1,2 mm/h et 2,7 mm/h. 5 journées présentent des précipitations supérieures à 10 mm/6 heures mais les intensités sont plus faibles, à l'exception de la nuit du 8/08/02 où il est tombé 19,8 mm en continu pendant 6 heures, soit 3,3 mm/h. En général, les plus fortes intensités s'observent sur des pas de temps horaires (1.2.3.1). Du 1^{er} septembre 2002 au 31 octobre 2002, les précipitations ont été supérieures à 25 mm/24 h à trois reprises (dont deux en octobre). Il est probable qu'elles aient eu un impact plus marqué car les intensités oscillent entre 2,3 mm/h et 3,1 mm/h. En automne, les précipitations sont plus abondantes mais les intensités sont sensiblement similaires à celles observées en été (1.2.3.1.). Les épisodes de forte intensité durant moins de 4 à 5 heures n'ont pas d'effet morphogénique. En revanche, ces intensités sont suffisantes pour produire une érosion de rejaillissement, sur les plages colluviales à fines et éventuellement quelques déplacements dans les portions graveleuses et à petits cailloux ($L \leq 5$ cm). En corniche à vires, comme le soulignait ROVERA (1990), les phénomènes d'érosion apparaissent au cours d'intensités proches de 3,5 mm/h, sur de courtes ou de longues périodes. Par conséquent, il est probable que la période ait aussi connu quelques chutes de fragments. La figure 88 illustre ces différents processus. Le long de l'écotone biorhexistatique, toutes les parcelles topomicrométrées ont connu de petits remaniements de surface (1.2.4., chapitre 5).

Au sein de la parcelle topomicrométrée T1, l'accumulation colluviale est loin d'être homogène mais c'est le processus dominant (Figure 88a). Elle est plus importante au contact de *Rhamnus alpina* et oscille entre 2,5 et 10 mm sur l'ensemble de la placette (Figure 88a). Il s'agit de l'impact d'un bloc (Annexe R, photo 10a). La figure 88a traduit parfaitement le phénomène, les plages d'accumulation se répartissent de manière individuelle et ponctuelle. Pour la période, la surface peinte située au sein de la parcelle enregistre une déstructuration de 50% et une vitesse moyenne de déplacement des graviers de 9,6 cm.

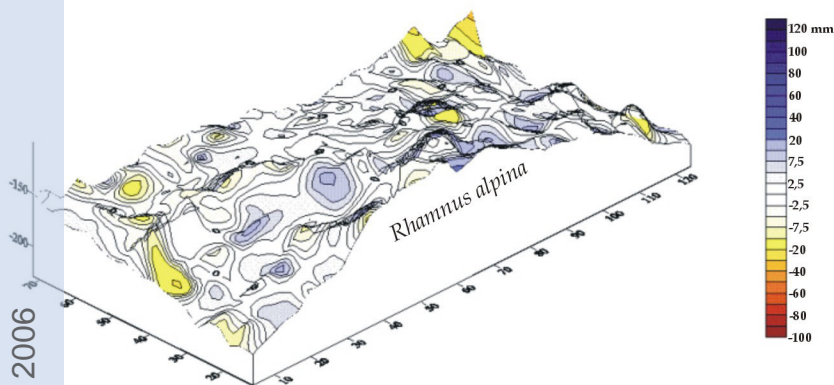
La parcelle T2 a été sujette à un léger affaissement (Figure 88b). Une arrivée de petits blocs en amont a provoqué un affaissement d'ensemble des colluvions. Certains d'entre eux se sont toutefois accumulés en amont des touffes de *Centranthus angustifolius*. La pente n'est pas très forte (15°) mais la plage colluviale est assez mobile. Le moindre impact ou un simple appel au vide entraîne la mobilisation des fragments⁸⁷. Les mouvements n'ont pas été extrêmement importants mais assez homogènes, la déstructuration est de 5% et la vitesse moyenne des déplacements de 3 cm.

La parcelle T3 ressemble beaucoup à la précédente mais le processus est bien différent (Figure 88 c). Ce cas illustre trois processus, l'impact d'un bloc, l'érosion de rejaillissement et les effets du ruissellement (Annexe R, photo 10b). D'autre part, lorsque la matrice est très fine, la pluie tend à lessiver les fragments (Annexe R, photo 10b).

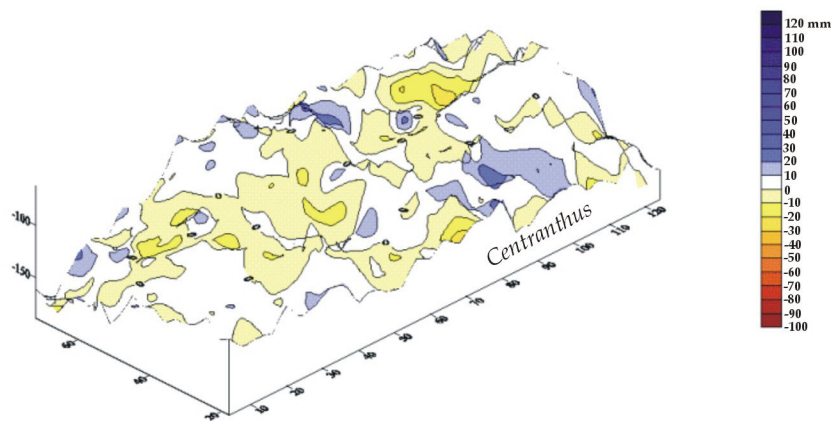
⁸⁶ La station a été installée début juillet, le décompte s'effectue à partir de cette date.

⁸⁷ Nous en avons fait l'expérience lors de l'installation du topomicromètre.

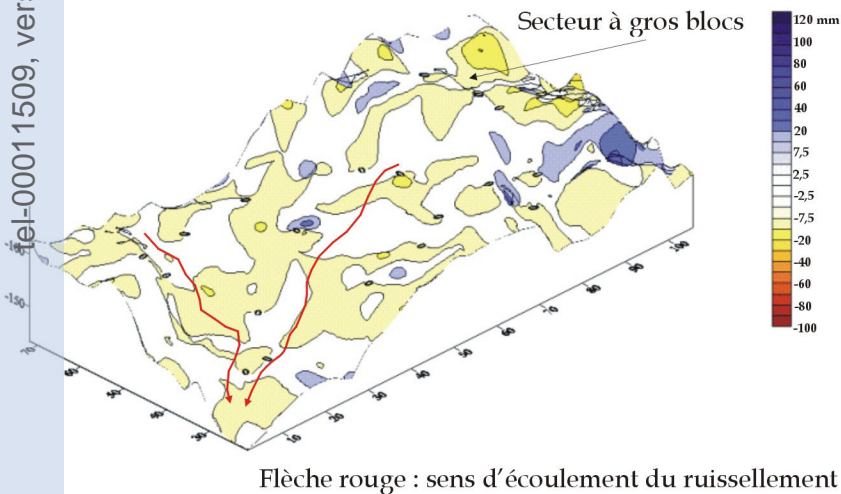
a) Parcelle topomicrométrée T1 : Secteur rhexistasique à *Rhamnus alpina*. Situation le 7/10/02.



b) Parcelle topomicrométrée T2 : Secteur rhexistasique à *Centranthus angustifolius*. Situation le 7/10/02.



c) Parcelle topomicrométrée T3 : Secteur hétérostasique à *Thymus praecox*, *Carex sempervirens* et *Valeriana montana*. Situation le 7/10/02.



d) Parcelle topomicrométrée T4 : Secteur biostasique à *Carex sempervirens* et *Sesleria varia*. Situation le 7/10/02.

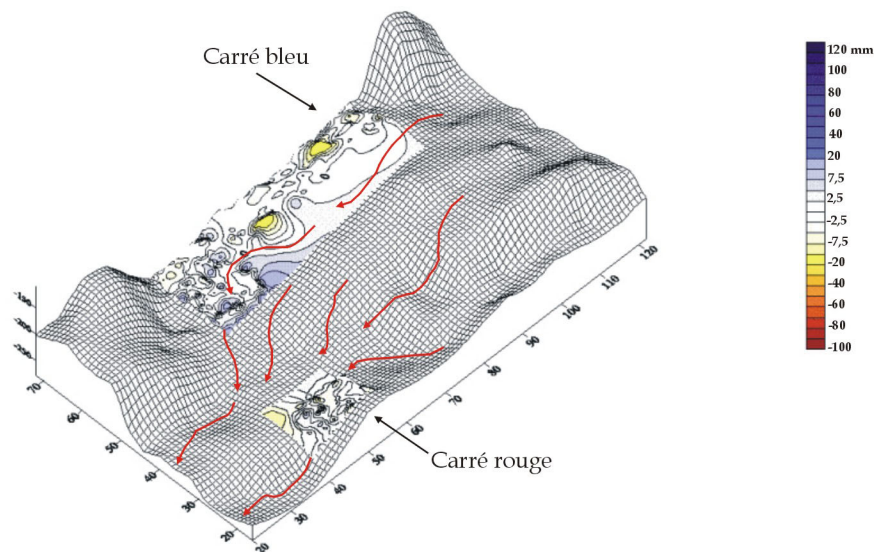


Figure 88 : Evolution morphologique de la surface des 4 parcelles topomicrométrées entre le 23/07/02 et le 7/10/02. Impact des précipitations estivale et automnale sur la géodynamique de surface (Tablier d'éboulis de La Plagne). En bleu : accumulation colluviale. En rouge : ablation ou affaissement des colluvions.

Les effets conjugués de ces trois processus ont provoqué une ablation de la parcelle qui oscille entre 7,5 et 20 mm. La déstructuration est forte (55%) mais la vitesse moyenne des déplacements reste faible.

La parcelle T4 a été soumise à l'érosion de rejaillissement et au ruissellement (Figure 88c). L'accumulation oscille entre 2,5 et 7,5 mm. Le carré bleu enregistre une déstructuration de 20% et une vitesse moyenne de déplacement des fragments de 0,5 cm sur la période. Le carré rouge a connu une déstructuration de 25% et une vitesse moyenne de déplacement des colluvions de 1,5 cm (Annexe E). Cette différence s'explique d'une part, par le fait qu'il est situé dans l'axe principal du ruissellement et, d'autre part, car il est surplombé par une petite plage colluviale non végétalisée. Le carré bleu bénéficie d'une protection végétale plus importante (Annexe F).

Les figures 89 a et b caractérisent la géodynamique de surface du tablier au cours de la période. Pour cette période, ainsi que pour la suivante, nous avons limité notre échantillonnage aux surfaces peintes situées au sein des plages colluviales à granulométrie fine (fines, graviers, petits cailloux et gros cailloux : $L \leq 10$ cm). Les fortes déstructurations associées à des vitesses moyennes à rapides des déplacements traduisent principalement les impacts des chutes de blocs. Ce processus est plus marqué dans les trois petits cônes et particulièrement au niveau des déstructurations. La lenteur de certaines vitesses de déplacement s'explique en majorité par la présence des ligneux (C1BR14, Z2BJ10, C2BR18, C3BR24, Z3BR20).

Les surfaces peintes situées juste en amont du piquetage herbacé (terrassettes à *Thymus praecox* ou touffes de *Centranthus angustifolius*) présentent des vitesses de déplacement des fragments plutôt moyennes (Z1BR4, Z1BR7, C2BR19, Z3BR21). Les autres marquages ont une granulométrie plus fine et sont moins exposés aux chutes de blocs mais ils sont soumis aux processus de remaniement évoqués plus haut (parcelles topomicrométrées). Finalement, sous l'effet des précipitations printanière et automnale, la géodynamique superficielle a été relativement active.

3.2.1.3. La période du 24 octobre 2002 au 28 avril 2003

La fin d'automne est assez froide (1.1.2.1. et 2.1) et l'entrée dans l'hiver s'effectue au cours de la 1^{ère} décennie de décembre 2002. Le tablier d'éboulis sera sous la neige de la 3^{ème} décennie de décembre 2002 à la 3^{ème} décennie de mars 2003 (2.1.7). Au printemps, la fonte est rapide en raison d'un « décollage » précoce des températures qui annonce déjà la canicule de l'été 2003 (1^{ère} décennie d'avril 2003). Il est presque simultané dans l'air et dans le sol. Sur la période, les cycles de gel-dégel dans l'air (1,5 m), en surface (20 cm) et dans le sol (-10 cm) sont nombreux mais il s'agit essentiellement de gels faibles (1.1.2.1., 2.1.3 à 2.1.8). Dans l'air (1,5 m), les conditions périglaciaires persistent de novembre 2002 à avril 2003. En surface à 20 cm, elles disparaissent une bonne partie de l'hiver. Dans le sol (-10 cm), les premiers gels apparaissent dès le 23 septembre 2002 en hétérostasie (2.1.4). En hétérostasie et en rhexistasie, il sera gelé jusqu'à la 1^{ère} décennie d'avril 2003. En surface et dans le sol, en l'absence du manteau neigeux, les conditions thermiques en rhexistasie et en hétérostasie sont suffisantes pour qu'agissent des processus d'érosion périglaciaire.

Cependant, en raison de la lourdeur des manipulations et d'un terrain difficile d'accès, nous n'avons pas été en mesure de cerner précisément, à l'aide du topomicromètre, l'effet des épisodes de gel sur les colluvions fins. Nous renvoyons pour cela aux travaux de COMBE (2002), ROVERA et ROBERT (2003) et ROBERT *et al.* (2005). Même si ces études ont été réalisées dans des terrains schisteux (Combe de Mizoën, Vallée de la Romanche) ou marneux (Draix, Alpes du Sud) et que les processus liés à la cryoreptation, à la gélireptation et la gélifluxion sont dominants, ils existent aussi à La Plagne. Bien évidemment, ils sont peu marqués, moins longs et très localisés (plages colluviales à fines et terrassettes de la zone apico-proximale).

Figure 89a : Déstructuration des surfaces peintes. Période du 25 mars 2002 au 24 octobre 2002.
 Tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m)

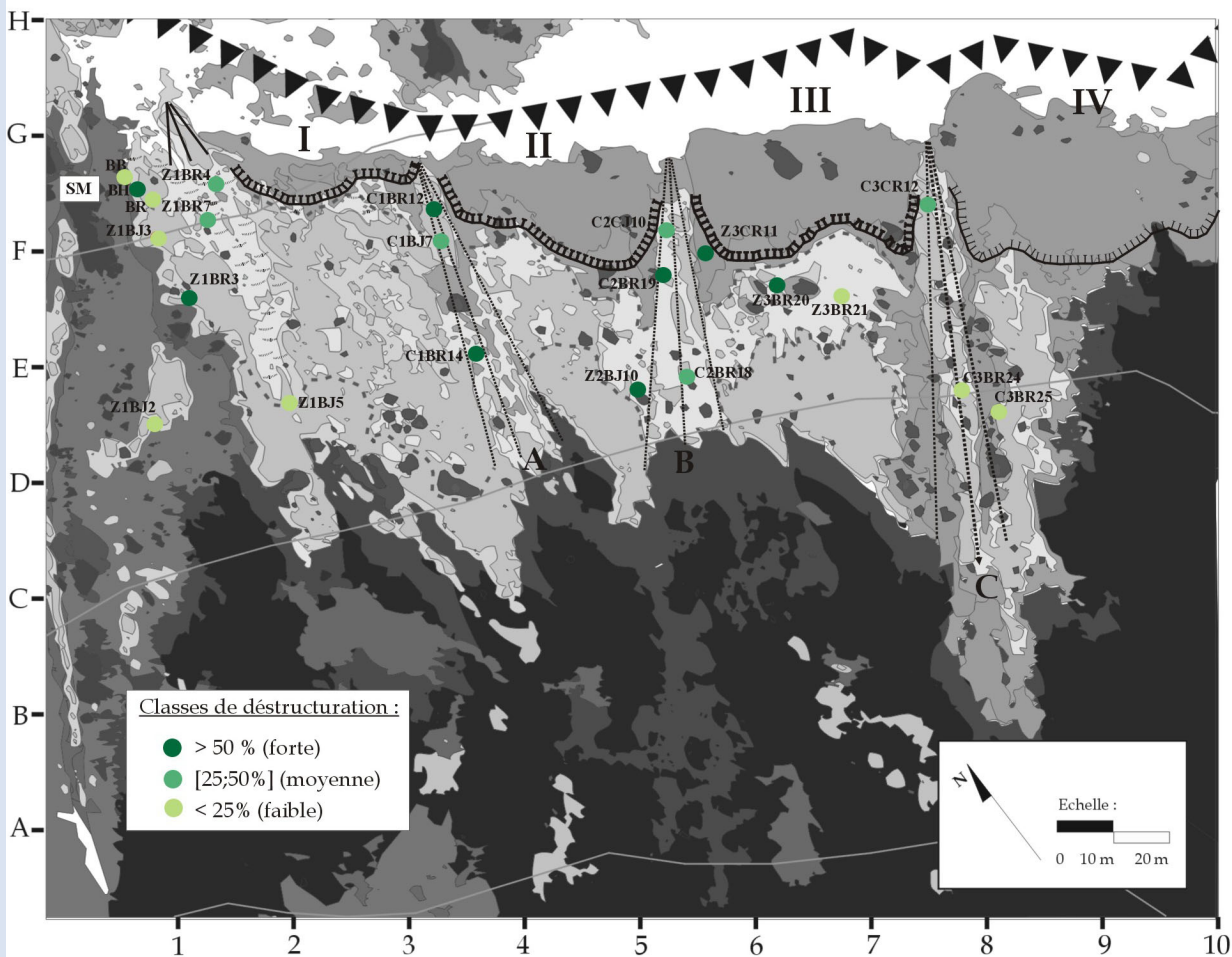
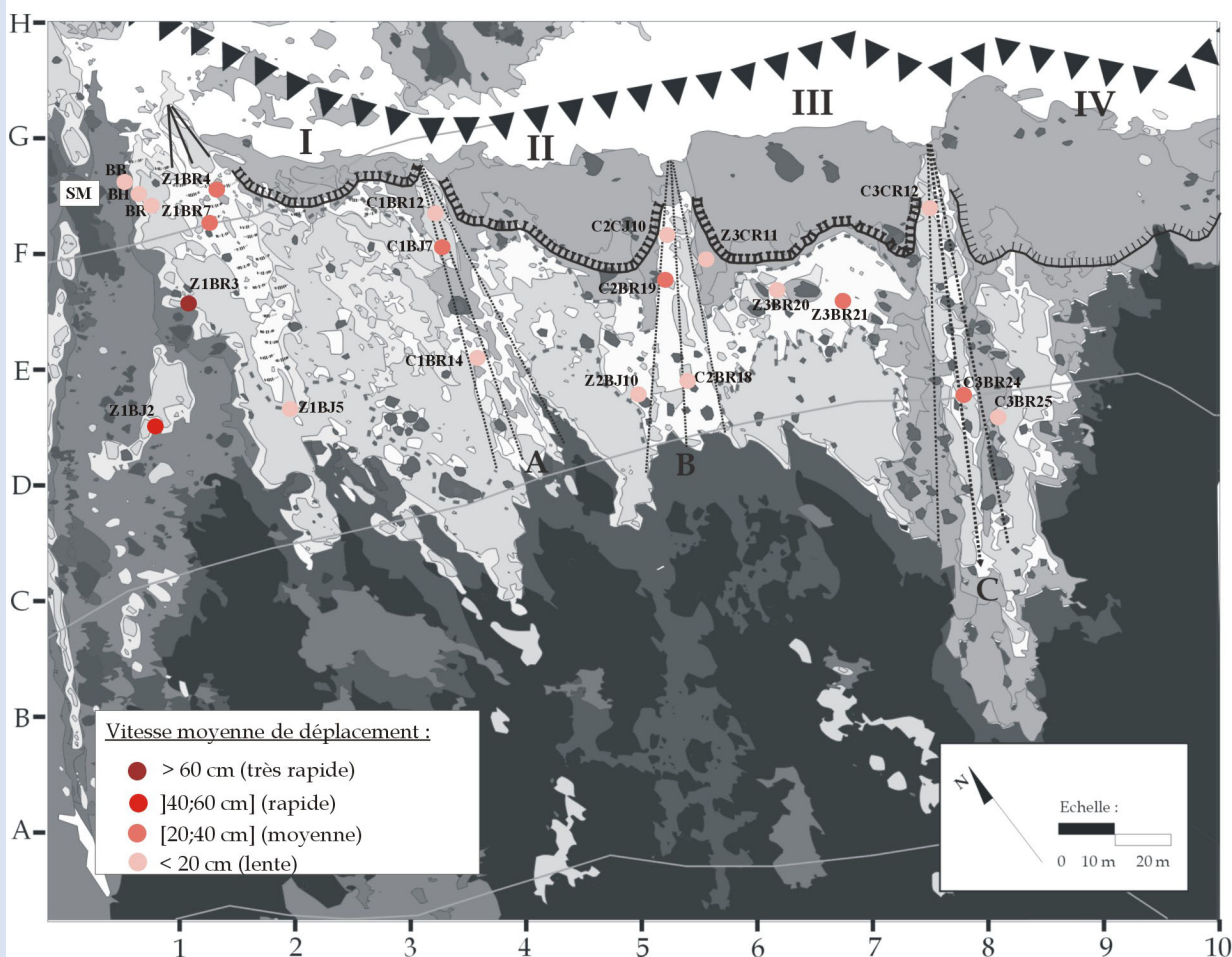


Figure 89b : Vitesses moyennes de déplacement. Période du 25 mars 2002 au 24 octobre 2002.
 Tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m)



Une campagne de mesures topomicrométriques réalisée le 25 avril 2003, nous permet toutefois de préciser le rôle morphogénique des conditions nivéo-périglaciaires hivernales (Figure 90).

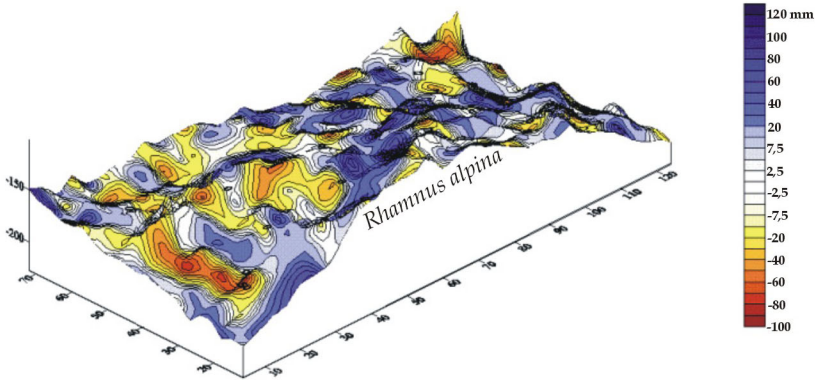
Même si l'impact de ces processus est assez bien connu, les résultats confirment le fait que la dynamique érosive est loin d'être inactive y compris dans les secteurs les plus densément végétalisés, et particulièrement au cours de la période hivernale en raison de l'état phénologique des végétaux. D'autre part, cet aspect est d'autant plus important que la transition biorhexistasiq ue étudiée a connu une progression rapide depuis le début du siècle dernier. En hiver, à l'exception des ligneux, les herbacées ne subissent pas réellement les contraintes de la géodynamique de surface et ce sont surtout les conditions édaphiques, climatiques et géodynamiques estivales, automnales et printanières qui vont déterminer leur installation et leur développement. Sur l'ensemble des parcelles, l'activité morphogénique a été efficace et les processus d'ablation et d'accumulation ont été très intenses. Sous l'effet de la nivéo-reptation, l'accumulation est très prononcée dans les secteurs rhexistasiq ues (Figure 90 a et b). La granulométrie plus grossière est moins sensible à l'ablation et d'autre part, la présence d'un ligneux qui se développe en bouquet (T1) ainsi que des rejets de *Centranthus angustifolius* (T2), exercent un freinage géodynamique plus important que le piquetage herbacé, qui a complètement disparu (Figure 90 c et d). L'effet de la nivéo-reptation semble être moins marqué dans les parcelles hétérostasiq ues mais surtout biostasiq ues car la densité des rejets des touffes de *Carex sempervirens* et *Sesleria varia* provoque un plan de glissement plus lisse pour le manteau neigeux. Au contraire, les effets de la fusion nivale (nivéo-solifluxion) et des processus périglaciaires et particulièrement, le gonflement cryogénique (pipkrakes), la gélifluxion et la gélireptation sont certainement plus importants. Les déstructurations et les vitesses des déplacements des fragments semblent confirmer ces aspects. Si les déstructurations sont assez fortes au sein de chaque parcelle (moyennes en T1 et T3 et fortes en T2 et T4), la vitesse moyenne des déplacements diffère et elle est plus rapide en rhexistasiq ue (T1 : 18,4 cm ; T2 : 30 cm ; T3 : 9,6 et 1,6 cm; T4 : 7,6 cm). Au cours de la période, c'est en biostasiq ue que la déstructuration est la plus forte (83%). L'accumulation a été importante et il semblerait qu'elle soit liée à un apport de fines provenant de l'amont (lessivage de la pelouse au moment de la fonte, figure 90 d). En hétérostasiq ue, la morphologie de la parcelle est plus complexe mais l'accumulation et l'ablation semblent s'équilibrer (Figure 90c).

Cette activité morphogénique se traduit aussi à l'échelle du tablier d'éboulis (Figures 91 a et b). A quelques exceptions près, les déstructurations sont plus fortes et les vitesses de déplacement des fragments plus rapides que celles enregistrées sur la période précédente. Les deux périodes révèlent des fonctionnements géodynamiques assez proches où seule l'intensité des processus diffère. L'activité des processus nivéo-périglaciaires joue un rôle morphodynamique prépondérant sur le tablier d'éboulis de La Plagne.

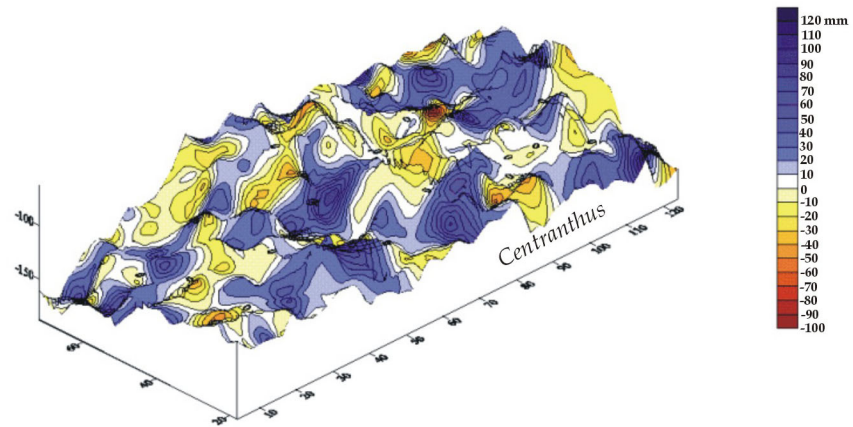
Nous n'avons pas jugé nécessaire de détailler les deux dernières séries de mesures⁸⁶ car les résultats sont sensiblement similaires et confirment le fonctionnement géodynamique proposé plus haut. Les données brutes sont disponibles dans l'annexe E et les figures dans l'annexe S. Soulignons simplement la variabilité inter-annuelle de l'intensité des processus qui est fortement corrélée aux conditions topo-climatiques enregistrées sur le tablier et à l'état phénologique des végétaux. Aussi bien dans l'air (1,5 m), qu'en surface (20 cm) ou dans le sol (-10 cm), l'année 2002-2003 a été plutôt chaude et sèche alors que l'année 2003-2004, fraîche et humide (paragraphe I et II).

⁸⁶ Période du 28 avril 2003 au 20 novembre 2004 et du 20 novembre 2003 au 20 mai 2004.

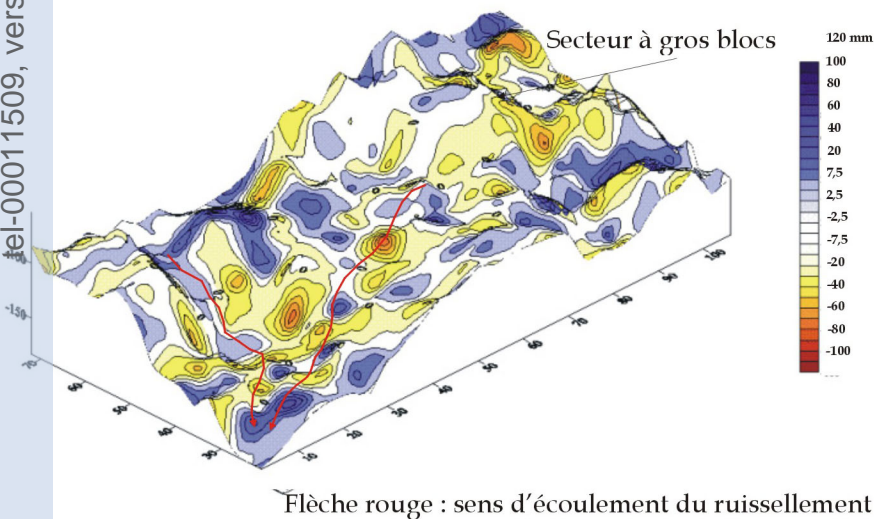
a) Parcelle topomicrométrée T1 : Secteur rhexistatique à *Rhamnus alpina*. Situation le 25/04/03.



b) Parcelle topomicrométrée T2 : Secteur rhexistatique à *Centranthus angustifolius*. Situation le 25/04/03.



c) Parcelle topomicrométrée T3 : Secteur hétérostasique à *Thymus praecox*, *Carex sempervirens* et *Valeriana montana*. Situation le 25/04/03.



d) Parcelle topomicrométrée T4 : Secteur biostasique à *Carex sempervirens* et *Sesleria varia*. Situation le 25/04/03.

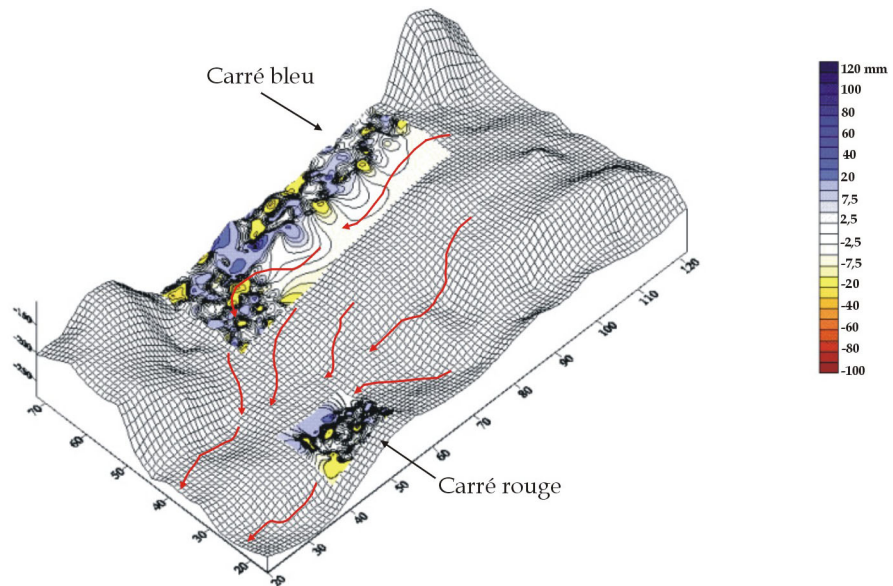


Figure 90 : Evolution morphologique de la surface des 4 parcelles topomicrométrées entre le 7/10/02 et le 25/04/03. Effet morphogénique de la neige et des processus périglaciaires (Tablier d'éboulis de La Plagne). En bleu : accumulation colluviale. En rouge : ablation ou affaissement des colluvions.

Figure 91a : Déstructuration des surfaces peintes. Période du 24 octobre 2002 au 28 avril 2003.
 Tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m)

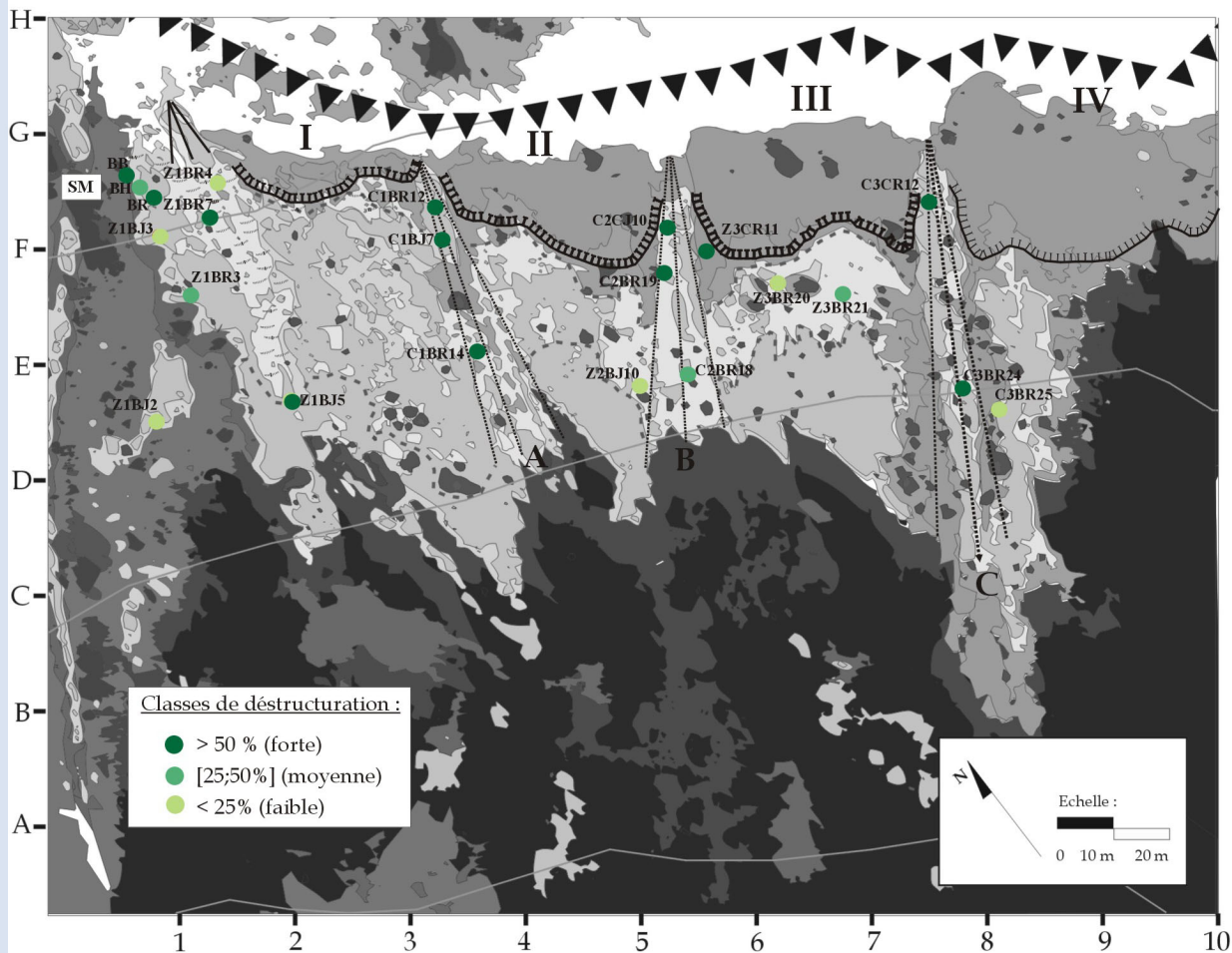
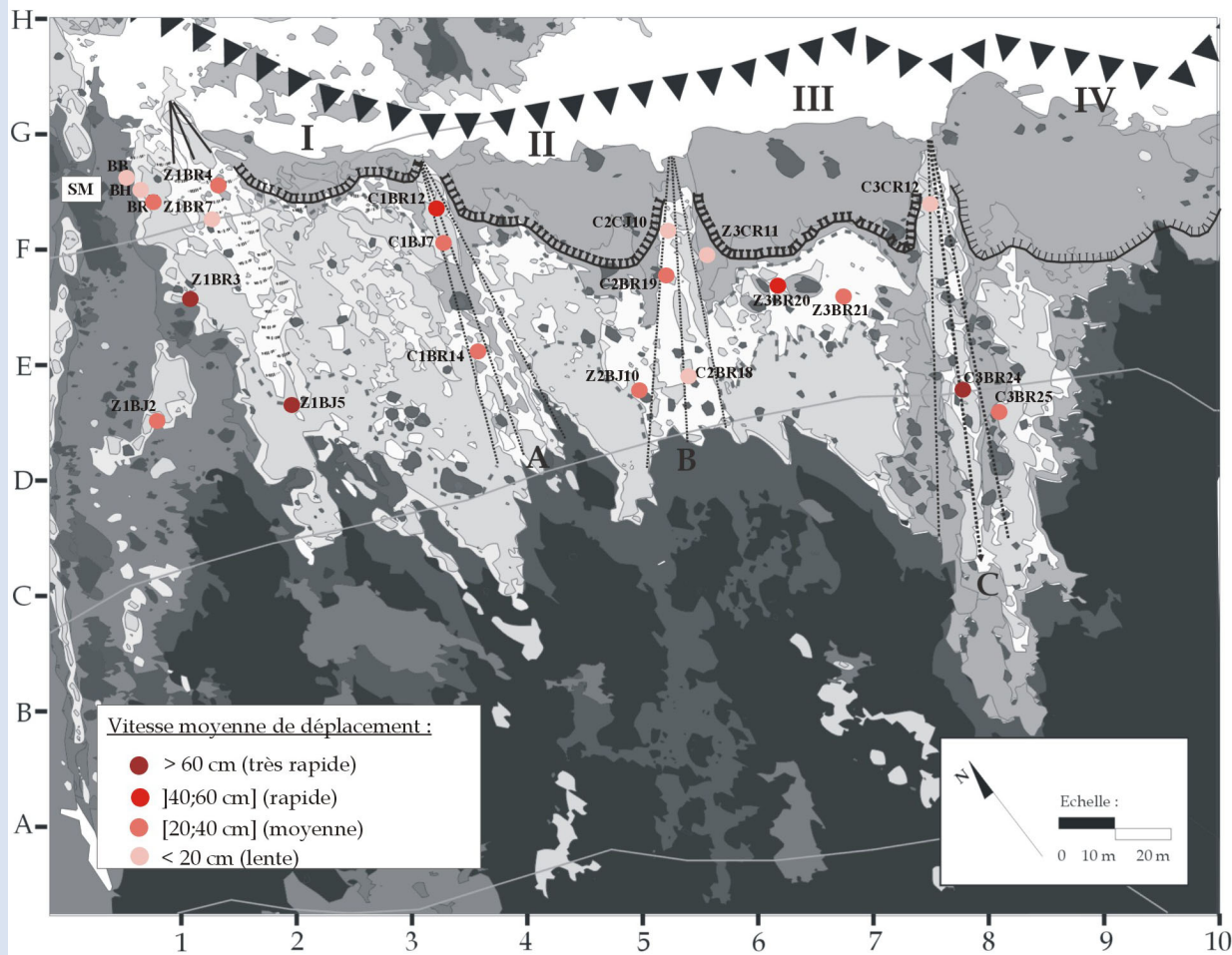


Figure 91b : Vitesses moyennes de déplacement. Période du 24 octobre 2002 au 28 avril 2003.
 Tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m)



tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2006

En ce qui concerne les effets des précipitations estivales et automnales, les différences sont peu marquées. L'été 2003 connaît un déficit hydrique important mais il est partiellement comblé à l'automne. Les séquences pluvio-orageuses sont moins nombreuses et plus intenses à l'automne 2003 mais la durée des épisodes est identique (1.2.3). Cette différence ne se reflète pas réellement en terme d'impact géodynamique. En revanche, au cours de l'hiver 2003-2004, les conditions périglaciaires ont été plus marquées et l'enneigement plus conséquent (1.1.2 et 2.2). La nivéo-reptation et les fontes répétitives du manteau neigeux au printemps 2004 ont eu un impact morphogénique et géodynamique extrêmement important (2.2.6). Les déstructurations sont très fortes et les vitesses moyennes de déplacement des matériaux très rapides (Annexes E et S). Ces éléments confirment les conclusions émises lors des analyses thermiques et pluviométriques précédentes (paragraphe I et II). Comme nous l'avons montré plus haut, une année météorologique comme l'année 2003 est plutôt favorable aux végétaux et défavorable aux processus d'érosion nivéo-périglaciaires.

Finalement, il est fortement probable que nos années soient représentatives des conditions climatiques qui règnent en Chartreuse (et dans l'étage infra-périglaciaire), depuis le début des années 80 mais surtout depuis la décennie 90. Le réchauffement climatique est attesté dans le massif et la variabilité inter-annuelle de l'intensité des processus nivéo-périglaciaires, ne semble pas avoir influencé la dynamique végétale (Chapitre 6, II). En revanche, la densité végétale ligneuse et herbacée (hors période hivernale pour cette dernière), exerce un freinage géodynamique conséquent sur les processus de remaniement de surface. De plus, les conditions périglaciaires ont diminué en fréquence et en intensité vers 1000 m (Chapitre 1, 3.1.3) et elles ne sont pas extrêmement marquées à 1647 m (paragraphe I et II de ce chapitre). Et enfin, au moins entre 1000 m et 1300 m (postes de la Grande Chartreuse et du Col de Porte) mais aussi certainement à 1647 m (La Plagne), l'épaisseur du manteau neigeux a diminué et nous avons montré, au cours d'une année chaude, que sa durée était écourtée.

D'un point de vue phyto-morphodynamique, comme pour le cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil, cette analyse confirme bien le fonctionnement topo-sédimentologique et phyto-morphologique décrit dans le paragraphe 1.5 du chapitre 6. Nous sommes donc en mesure de mieux préciser les caractéristiques phyto-morphodynamiques de la mosaïque biorhexistasique de La Plagne.

3.2.2. Découpage phyto-morphodynamique de la mosaïque biorhexistasique de La Plagne

9 unités phyto-morphodynamiques composent la mosaïque biorhexistasique de La Plagne (Carte 29). La parcellisation des phytomorphosystèmes est importante et traduit un fonctionnement phyto-dynamique complexe, en taches.

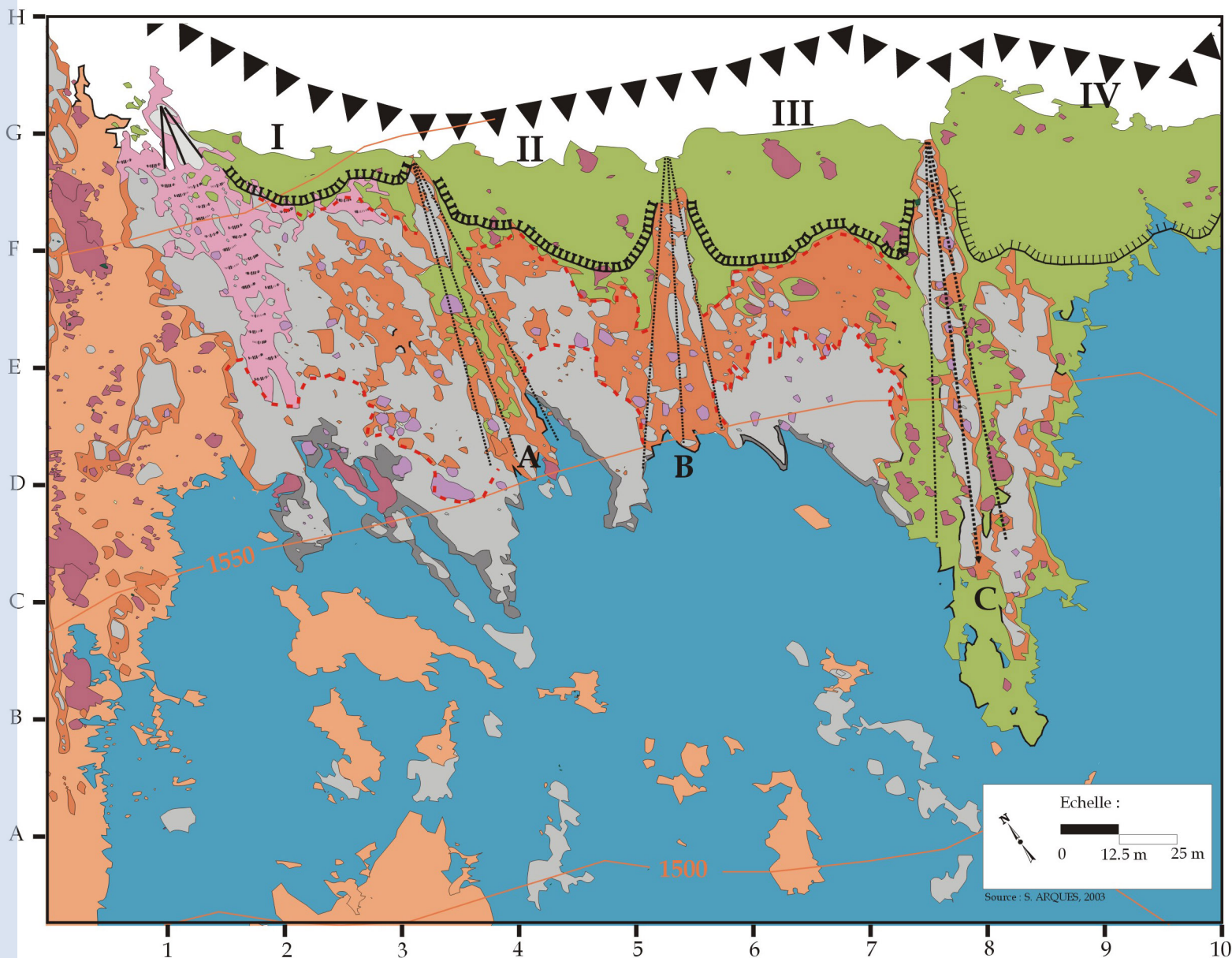
- Les écosystèmes biostasiques : stables d'un point de vue géodynamique, ces formations périphériques sont caractérisées par la présence d'une végétation dense et d'un sol évolué à matrice fine :

- **la hêtraie-sapinière et pessière** (faciès mésophile) : comme pour les autres talus d'éboulis, il s'agit de la principale formation ligneuse dense. Elle se développe au contact du tablier et couvre la plus grande surface. Sa progression sur éboulis, moyenne entre 1911 et 2001, est limitée par la nature granulométrique grossière de la zone distale;

- **la lande à *Arctostaphylos uva-ursi*** : comme *Juniperus communis nana*, il s'agit d'une formation de transition pionnière qui s'installe après abandon des pâturages. Formation sous-arbustive dense, elle se développe sur des sols secs, superficiels à moyennement profonds. Espèce xérophile et héliophile, elle trouve à La Plagne des conditions topo-climatiques particulièrement favorables.

Carte n°29 : Mosaïque biorhexistasique de La Plagne (2001)

tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2006



Légende :

Ecosystèmes biostasiques :

Formation (s) ligneuse (s)

Hétraie-sapinière et pessière (faciès mésophile). **Formation à progression moyenne entre 1911 et 2001.**

Formation (s) de transition

Lande à *Arctostaphylos uva-ursi* : *Juniperus communis*, *Laserpitium siler*, *Helianthemum nummularium*, *Scabiosa columbaria*, *Gentiana angustifolia*, *Anthyllis vulneraria*, *Dianthus monspessulanus*, *Lotus corniculatus*, *Phyteuma hemisphaericum*, *Campanula rotundifolia*, *Globularia nudicaulis*, *Carex sempervirens* et *Sesleria varia*. **Formation à fermeture rapide entre 1911 et 2001.**

Ilot (s) arbustif (s) sur formation végétale herbacée (prairie) et sous-arbustive (lande) : *Picea abies*, *Pinus uncinata*, *Acer pseudoplatanus*, *Sorbus aria*, *Rosa pendulina* et *Corylus avellana*. **Formation à progression moyenne entre 1911 et 2001.**

Formation (s) non boisée (s)

Prairie à *Calamagrostis varia* sur bombements apicaux : *Helianthemum nummularium*, *Laserpitium latifolium*, *Trifolium badium*, *Scabiosa columbaria*, *Cirsium arvense*, *Ranunculus repens*, *Lotus corniculatus*, *Alchemilla conjuncta*, *Globularia nudicaulis*, *Phyteuma hemisphaericum*, *Euphorbia cyparissias*, *Crepis pyrenaica*, *Dianthus monspessulanus*, *Taraxacum officinal*, *Laserpitium siler* et *Laserpitium latifolium*. **Formation à progression moyenne entre 1911 et 2001.**

Phytomorphosystème (s) hétérostasique (s) :

Piquetage herbacé sur secteur rhexistasique à granulométrie hétérométrique : *Valeriana montana*, *Sideritis hyssopifolia*, *Galium anisophyllum*, *Leucanthemum adustum*, *Silene vulgaris*, *Rumex scutatus*, *Poa cenisia*, *Thymus praecox*, *Globularia cordifolia*, *Senecio doronicum*, *Helleborus foetidus*, *Calamagrostis varia*, *Scabiosa columbaria*, *Lotus corniculatus*, *Helianthemum nummularium*, *Campanula rotundifolia* et *Euphorbia cyparissias*. **Ecotone à progression rapide entre 1911 et 2001.** Déstructurations et vitesses moyennes de déplacement faibles à moyennes.

Terrassettes, sur micro-lave hydro-gravitaire active, à *Thymus praecox* et *Globularia cordifolia* : *Valeriana montana*, *Sideritis hyssopifolia*, *Galeopsis angustifolia*, *Lotus alpinus*, *Galium anisophyllum*, *Rumex scutatus*, *Leucanthemum adustum*, *Poa cenisia*, *Sedum album*, *Silene vulgaris*, *Campanula rotundifolia*, *Scabiosa columbaria*, *Helleborus foetidus*, *Euphrasia salisburgensis*, *Linaria alpina* et *Calamagrostis varia*. **Plages colluviales à graviers et fines.** **Formation à progression rapide entre 1911 et 2001.** Déstructurations fortes et vitesses moyennes de déplacement rapides en zones apico-proximale et distale.

Ecotone franc de lisière forestière : *Gymnocarpium dryopteris*, *Valeriana montana*, *Galium anisophyllum*, *Silene vulgaris*, *Senecio doronicum*, *Petasites paradoxus*, *Lonicera alpigena*, *Rhamnus alpina*, *Acer pseudoplatanus*, *Rosa pendulina*, *Corylus avellana*, *Rubus idaeus*, *Viburnum lantana*, *Juniperus communis*, *Prenanthes purpurea* et *Fagus sylvatica*. **Plages colluviales à matériaux moyens et grossiers.** **Zone distale à gros blocs.** **Ecotone à progression moyenne entre 1911 et 2001.** Secteur stable.

Ilot (s) arbustif (s) sur éboulis : *Rhamnus alpina*. **Plages colluviales à blocs moyens.** **Formation à progression rapide entre 1911 et 2001.** Déstructurations faibles et vitesses moyennes de déplacement lentes.

Phytomorphosystème (s) rhexistasique (s) :

Secteur rhexistasique à *Centranthus angustifolius*. **Plages colluviales à blocs moyens.** **Régression rapide entre 1978 et 2001.** Déstructurations faibles et vitesses moyennes de déplacement lentes.

Données géomorphologiques :

- Escarpement secondaire
- Zonation longitudinale
- Cône apical actif
- Cône pénestable à *Helleborus foetidus*
- Cône "raviné" pénestable à *Helleborus foetidus*
- Terrassette (sur microlave hydro-gravitaire active)
- Bombement apical à fines stabilisé
- Secteur rhexistasique stabilisé
- Non cartographié

Espèce très compétitive, elle colonise indifféremment la pelouse à *Carex sempervirens* et les bordures du talus d'éboulis. Au contact de l'éboulis, elle joue un rôle important dans la stabilisation des sédiments fins (fines, graviers, petits cailloux, 3.2.1.1., annexe R, photo 8). Sur la période 1911-2001, elle a participé de manière active et rapide au colmatage des plages colluviales isolées (D-E1) et à la progression des bordures (D-F 1-2), au contact du dépôt (Chapitre 6, 2.5);

- **les îlots arbustifs sur formation végétale herbacée (prairie) et sous-arbustive (lande) :** *Pinus uncinata* et *Picea abies* colonisent essentiellement la lande à *Arctostaphylos uva-ursi* située en périphérie du tablier d'éboulis. Ils sont parfois accompagnés par *Sorbus aria* et *Rosa pendulina*. En raison de la concurrence accrue de la lande sous-arbustive et des conifères, la plupart des feuillus privilégie la prairie stable à *Calamagrostis varia*. En prairie, on note la présence de quelques espèces de lisière forestière telles que *Corylus avellana* et *Sorbus aria* ainsi que des espèces à caractère pionnier plus marqué comme *Acer pseudoplatanus* et *Rosa pendulina*. Le topo-climat du tablier favorise la mixité des espèces de feuillus. Ainsi, elles sont pour la plupart mésophiles (*Corylus avellana*), parfois hygrocènes (*Rosa pendulina*) ou encore mésohygrophiles (*Acer pseudoplatanus*) mais elles supportent parfaitement bien un stress hydrique estival (quand même assez rare en Chartreuse !). Le caractère xérophile de *Sorbus aria* révèle des conditions de sécheresse estivale qui peuvent être importantes. Leur progression est toutefois moyenne entre 1911 et 2001, en raison de la concurrence interspécifique (strates sous-arbustive et herbacée et particulièrement *Calamagrostis varia*);

- **la prairie à *Calamagrostis varia* :** principale formation herbacée, elle occupe les bombements apicaux à fines du tablier (G 2-9). Espèce mésoxérophile à mésophile, elle supporte parfaitement bien les contrastes hydriques annuels. Stable d'un point de vue géodynamique, elle enregistre une progression moyenne entre 1911 et 2001 (Chapitre 6, 2.5). Les espèces compagnes à très large amplitude autécologique, colonisent aussi la lande à *Arctostaphylos uva-ursi* et la pelouse subalpine.

- **Les phytomorphosystèmes hétérostasiques :** stables, pénestables ou instables, ils sont caractérisés par une granulométrie hétérométrique à grossière et des sols moyennement évolués (1.3.2., D). Les plantes se développent en taches et la prolifération d'espèces « sociales », appartenant aux formations périphériques biostasiques, est importante au sein des écotones :

- **le piquetage herbacé sur secteur rhexistasique à *Valeriana montana* :** écotone à progression rapide entre 1911 et 2001, il est constitué d'espèces lithophiles stabilisatrices (Chapitre 7, II) qui s'accommodent parfaitement d'un substrat colluvial pénestable, à matrice hétérométrique variable ($2 \leq L \leq 20$). Comme pour les autres écomplexes, à ce premier groupe stabilisateur s'ajoutent, dans les plages colluviales plus mobiles, certaines espèces lithophiles migratrices par « allongement et régénération » (Chapitre 7, II). La progression du piquetage herbacé « par capillarité », en zone médiale du talus, a été favorisée par la présence des bombements apicaux herbeux (largage des fines, Chapitre 6, 2.5) et par un escarpement secondaire plus stable à cet endroit (éboulisation moins active, strate marno-calcaire à facettes moins fragmentées). D'autre part, le secteur rhexistasique stable à blocs moyens, colonisé par *Centranthus angustifolius*, constitue une structure cohésive importante qui le ceinture par endroit (F3) et qui contribue à freiner le déplacement des matériaux vers l'aval (Carte 29 : F4 ; F6-7 et figure 92). Enfin, la lignification du dépôt, plus tardive, a contribué à maintenir un environnement relativement stable. Par conséquent, la géodynamique de surface est fortement ralentie.

- **terrassettes à *Thymus praecox* et *Globularia cordifolia*, sur microlave hydro-gravitaire active :** phytomorphosystème à progression rapide entre 1911 et 2001 (Chapitre 6, 2.5.4.), sa géodynamique de surface est loin d'être homogène. Active sur quelques mètres en zone apico-proximale et distale (G1,5; E2), la microlave est plutôt stable et densément végétalisée dans toute sa portion médiale. Aux espèces « édificatrices » des terrassettes (végétaux recouvreurs, chapitre 7, II), se sont associées les espèces lithophiles migratrices et stabilisatrices. Comme nous l'avons souligné plus

haut, ces dernières sont incapables de suivre ou de subir le mouvement en surface, elles privilégient donc les zones stables ou la fourniture en fines et importante. Leur présence au sein de la microlave s'explique par l'abondance de matière organique mais aussi par une géodynamique de surface moins contraignante qu'en milieu rhexistatique actif. Dans la zone médiale, les principaux mouvements en surface sont provoqués par le transit de quelques petits blocs et pour ces espèces, ce type de mouvement est moins contraignant qu'une mobilité en masse du substrat en sub-surface.

- **l'écotone franc de lisière forestière** : il se développe au contact du front forestier (D 2-10). La structure en « openwork » à gros blocs, laisse parfois la place à quelques plages colluviales à granulométrie plus fine (graviers, petits blocs) où s'installent des espèces lithophiles stabilisatrices (*Valeriana montana*, *Silene vulgaris*) ou migratrices (*Galium anisophyllum*, *Senecio doronicum*).

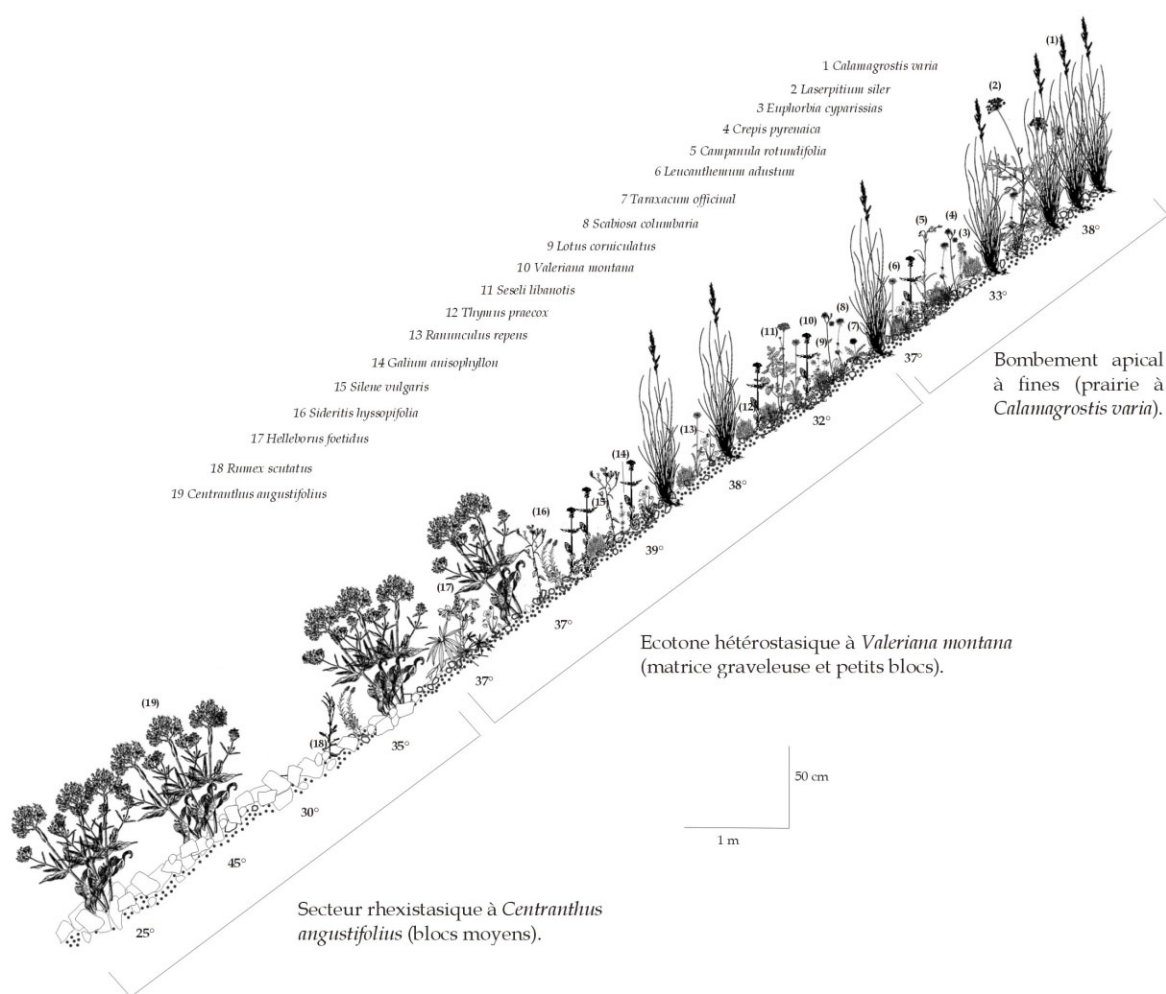


Figure 92 : Biomorphoséquence longitudinale au contact du secteur rhexistatique à *Centranthus angustifolius* et de la prairie à *Calamagrostis varia*. Transect longitudinal, La Plagne (LpHE, 12 m, 1600 m).

L'espèce herbacée dominante est *Gymnocarpium dryopteris*. Cette géophyte à rhizome hygrosclaphile, privilégie sur éboulis les stations fraîches de lisière forestière. Elle est souvent accompagnée par *Petasites paradoxus*. Mais l'écotone est essentiellement caractérisé par la présence d'une strate arbustive où se côtoient les espèces de lisière forestière (*Corylus avellana*, *Rubus idaeus*, *Viburnum montana*, *Acer pseudoplatanus*, *Rosa pendulina* et *Lonicera alpigena*) et de la hêtraie-sapinière (*Fagus sylvatica*). Parfois, on note la présence de *Prenanthes purpurea*. Ecotone stable d'un point de

vue géodynamique, il enregistre une progression moyenne entre 1911 et 2001 en raison de la granulométrie grossière du substrat;

- **les îlots arbustifs sur éboulis** : il s'agit d'arbres isolés ou d'îlots arbustifs, dont la progression a été rapide entre 1911 et 2001 (Chapitre 6, 2.5). *Rhamnus alpina* est l'espèce dominante. Espèce lithophile stabilisatrice, elle colonise les secteurs colluviaux à matériaux moyens et grossiers. Pionnière sur éboulis⁸⁶, elle ne souffre d'aucune concurrence interspécifique. Grâce à son enracinement profond et sa répartition en bouquets, elle exerce un freinage géodynamique particulièrement efficace et participe activement à la stabilisation du dépôt.

- **Le phytomorphosystème rhexistasique** : localement instable, notamment dans la zone apico-proximale, il est caractérisé par une absence de sol (lithosol) et une matrice granulométrique grossière en surface. La végétation se développe sous forme de touffes dispersées :

- **le secteur rhexistasique à *Centranthus angustifolius*** : les plages colluviales à blocs moyens ($10 \leq L \leq 20$) sont principalement colonisées par *Centranthus angustifolius*. Espèce lithophile migratrice par « régénération », elle se développe sous la forme de larges et grandes touffes dispersées qui exercent un freinage géodynamique important (Annexe R, photo 4a). En terme de remaniements de surface, l'étude géodynamique a montré son efficacité dans le freinage des matériaux. Cependant, son rôle est moins marqué en période hivernale en raison de l'état phénologique des touffes (Photo 4 b et c).

Finalement, ces talus d'éboulis semi-végétalisés sont loin d'être inactifs. On retiendra de cette étude, la complexité du fonctionnement des unités phyto-morphodynamiques ainsi que l'existence d'une réelle dimension fonctionnelle et structurelle. Le terme semi-végétalisé prend ici tout son sens, il indique un état transitoire qui rend difficile l'explication et/ou l'interprétation simples, un peu à l'image de la zone hétérostasique. Dans le contexte environnemental actuel, l'exercice est encore plus difficile. En revanche, le concept de biorhexistasie permet une bonne structuration de l'objet d'étude et une entrée simple. L'objectif principal de ce paragraphe, était de tenter d'affiner la typologie des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis cartusiennes. Nous l'avons fait, en intégrant une dimension géodynamique fonctionnelle. Mais en fin de compte cela ne fait que renforcer leur caractère homogène car les principales unités phyto-morphodynamiques se ressemblent beaucoup, d'une mosaïque à l'autre. Certes, comme nous l'avons souligné précédemment, à l'échelle paysagère, les différences structurelles, la variété des évolutions végétales constatée ainsi que les différences dans les modalités d'anthropisation, nous permettent d'opposer clairement les écosystèmes de la Grande Sure et du Grand Som à ceux de La Plagne, des Pelloux et de l'Aulp du Seuil. A l'échelle stationnelle, la biodiversité oppose les écosystèmes de La Plagne et du Grand Som aux trois autres. Cependant, d'un point de vue fonctionnel, la mise en évidence de critères de différenciation et/ou de regroupements particuliers est moins évidente. Ainsi, à l'échelle stationnelle, seul l'état hydrique du milieu apparaît être un facteur réellement discriminant mais il ne fait que confirmer le découpage latitudinal du massif. Si nous n'avons pas été en mesure de dresser une typologie « discriminatoire », basée sur un ou plusieurs facteur (s) autrement plus pertinent (s) que l'état hydrique du milieu, peut être ne faut il pas abonder dans ce sens. Cette homogénéité est plutôt un aspect positif dans le contexte environnemental actuel.

Si nous avons privilégié jusqu'à présent l'étude des végétaux en relation avec leur substrat, éléments fondamentaux pour l'approche biorhexistasique des mosaïques d'éboulis, tantôt indicateurs d'une dynamique paysagère, tantôt protagonistes actifs dans le fonctionnement des talus d'éboulis, nous allons maintenant les envisager sous l'angle de leur pertinence en terme de reconstitution environnementale.

⁸⁶ En Chartreuse.

1911

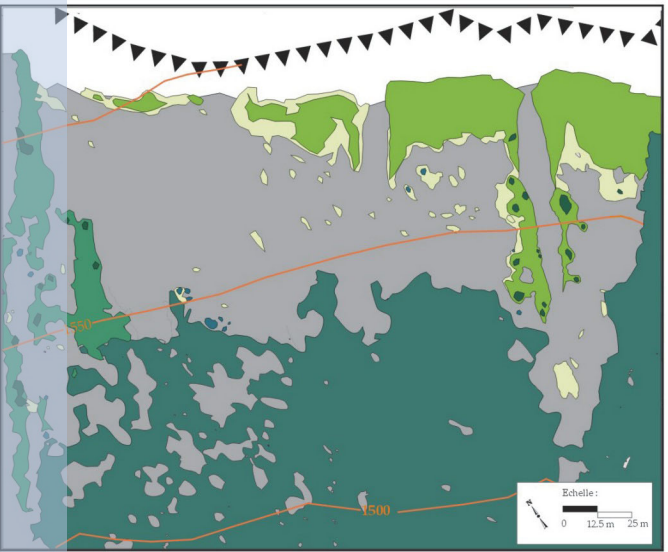


Figure 93 : Evolution de la colonisation ligneuse du tablier d'éboulis de La Plagne (1911-2001). Les fréquences d'établissement des ligneux sont présentées sous forme d'histogrammes. a) période 1950-1978 et b) période 1979-2003.

▲▲▲▲ Escarpement secondaire

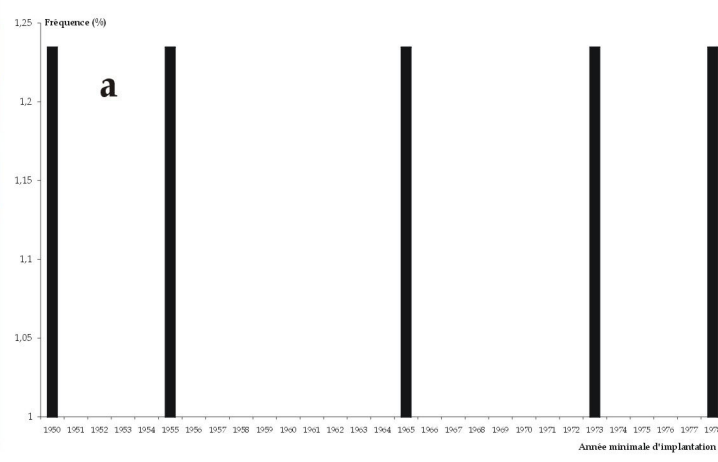
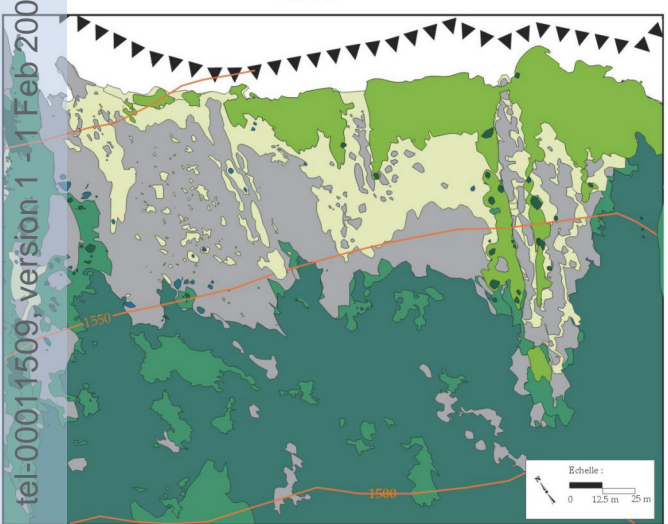
Formation (s) ligneuse (s)

- Forêt
- Lande
- Ilot arbustif sur formation végétale herbacée et sous-arbustive
- Ilot arbustif sur éboulis

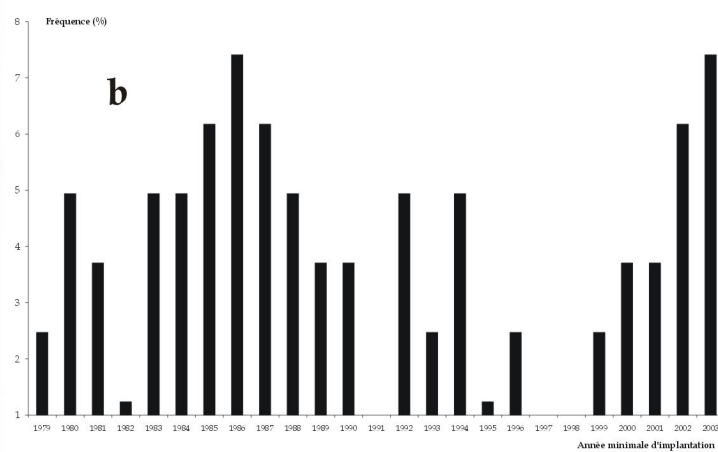
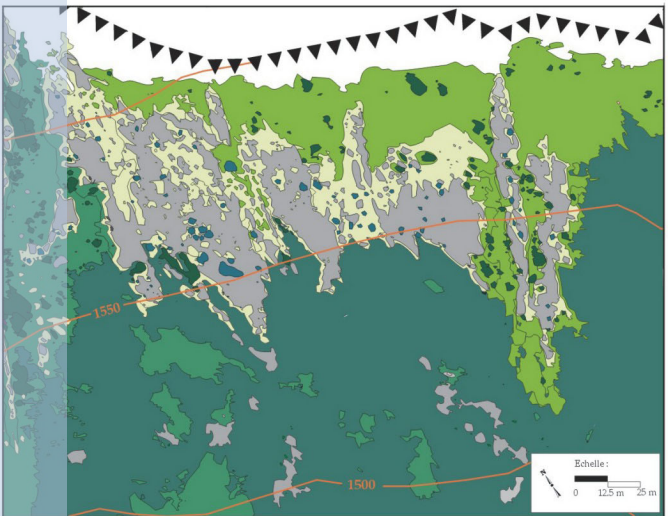
Formation (s) non boisée (s)

- Piquetage herbacé
- Prairie
- Secteur rhexistatique

1978



2001

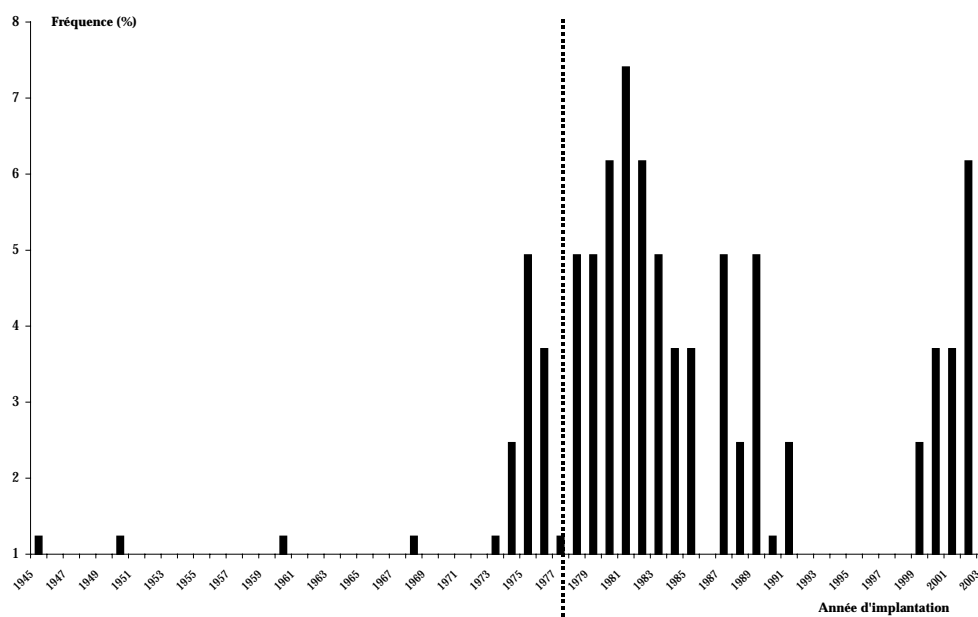


IV. Contribution à la validation du réchauffement climatique dans l'étage infra-périglaciaire : les apports de la dendrochronologie et de la dendrogéomorphologie

4.1. Etablissement de la végétation ligneuse sur le talus d'éboulis

Les résultats de l'analyse dendrochronologique renforcent ceux obtenus lors de l'approche diachronique (Chapitre 6, 2.5). La colonisation ligneuse du tablier d'éboulis de La Plagne s'est amplifiée à partir du début des années 80 (Figure 93). Conformément aux remarques émises dans la partie méthodologie, les datations ont été exprimées en années minimales d'établissement ou âge minimal des ligneux (Chapitre 5, 1.5). Cependant, pour les raisons évoquées dans cette même partie (accumulation faible, prélèvement des échantillons à proximité du collet *visible*⁸⁶), nous pensons être assez proches des années et des âges réels d'établissement. Sur la photographie oblique de 2001, les semis n° 8' et 9' sont parfaitement visibles et leur âge réel est de 5 ans (Figure 22). Si l'on examine la cartographie de 1978 (Figure 93 et photographie oblique dans l'annexe C), cela signifie que les arbres qui sont visibles ont au moins 5 ans. Par conséquent, on peut estimer l'erreur de datation à plus ou moins 5 ans. Dans ce cas, sur la période 1945-2003 (et non plus 1950-2003), nous obtenons une distribution des individus légèrement décalée mais dont la signification est identique à celle énoncée plus haut : « l'explosion » démographique de la population ligneuse du tablier d'éboulis a bien été amorcée au début des années 80, à La Plagne (Figure 94).

Figure 94 : Fréquences d'implantation des ligneux sur la période 1945-2003



Sur les 81 ligneux échantillonnés, l'âge minimal d'implantation de l'arbre le plus âgé est de 53 ans (1950⁸⁷) et l'âge réel du plus jeune est de 2 ans (2003⁸⁸). On distingue quatre périodes (Figure 93 a et b) :

- **1950-1978** : une première période « d'implantation » sur éboulis (5 arbres). Entre 1911 et 1978, seuls les îlots arbustifs sur lande et sur prairie ont enregistré une progression de leur surface. Sur éboulis *ss*, la dynamique végétale est essentiellement herbacée (Figure 93 et 2.5, chapitre 6);
- **1979-1989** : une décennie marquée par une progression démographique extrêmement importante (41 arbres).

⁸⁶ A l'exception des n° 17, 18, 52 et des semis dont les collets ont été excavés.

⁸⁷ Année de référence 2003.

⁸⁸ Année de référence 2005.

- **1992-1996** et **1999-2003** : deux périodes secondaires « d'implantation » (35 arbres).

A partir de 1978, la dynamique ligneuse sur éboulis est la plus rapide. Quasi inexistante en 1978, la surface occupée par les îlots arbustifs sur éboulis a doublé entre 1978 et 2001.

Les années 1985, 1986, 1987, 2002 et 2003 enregistrent des fréquences plus importantes. La période 1979-2003 est marquée par trois années de stagnation : 1991, 1997 et 1998.

Le graphe de la structure d'âge (minimal) des populations ligneuses met en évidence une fréquence importante de trois classes d'âge (0-10 ans, 10-20 ans et 20-30 ans), qui souligne la jeunesse des peuplements (Figure 95a). *Rhamnus alpina* L. constitue l'espèce dominante et c'est aussi la plus dynamique. La cartographie de répartition des populations confirme la structure longitudinale et latérale de la colonisation ligneuse, observée dans le paragraphe 2.5 du chapitre 6 (Figure 95b). La microlave hydro-gravitaire ainsi que les trois petits cônes constituent des phytomorphosystèmes privilégiés (Figure 95b). Paradoxalement, ce sont actuellement les phytomorphosystèmes les plus actifs en terme de processus d'érosion nivéo-périglaciaires (paragraphe III de ce chapitre). Par conséquent, la dynamique végétale observée depuis une trentaine d'années, constitue certainement une réponse à la diminution de la fréquence et de l'intensité de ces processus d'érosion dont nous situons l'amorce au début des années 80 (Figures 93 et 95). Depuis une trentaine d'années, les conditions bioclimatiques, édaphiques et géodynamiques, semblent être devenues particulièrement favorables à l'installation et au développement des arbres (tandis que les conditions hydriques restent favorables dans le substrat).

Regroupés dans le sud (SSE et SE) du tablier d'éboulis, au sein de la zone médiale, les plus vieux arbres échantillonnés ont un âge compris entre 50 et 60 ans (Figure 95b, C-D9). Il s'agit d'un alisier blanc (*Sorbus aria* L.) et d'un érable sycomore (*Acer pseudoplatanus* L.). A l'est (ESE) en zone apico-proximale (E9-10), et au nord-ouest en zone distale (E2), deux alisiers blancs (*Sorbus aria* L.) et un nerprun (*Rhamnus alpina* L.) ont entre 30 et 40 ans. A proximité du cône « raviné » pénestable, la densité végétale ligneuse et herbacée est importante et ancienne ce qui confirme le rôle de l'eau (Figure 93). A noter le cas particulier d'un nerprun qui s'est installé au nord-est du tablier, en zone apico-proximale et au contact de l'escarpement secondaire (Figure 95b, G6,5). Il a entre 40 et 50 ans. A l'échelle du tablier d'éboulis, ces arbres sont les plus vieux et ils sont peu nombreux.

Les ligneux qui ont entre 20 et 30 ans sont principalement des nerpruns et ils sont nombreux dans les zones médiale et distale de la microlave hydro-gravitaire (F1-2). Quelques individus sont présents au sein des deux premiers cônes (E4, E6) et certains ont privilégié la zone médiale stable, au contact des bombements apicaux herbeux (F6, E8, C-D10).

Les arbres qui ont entre 10 et 20 ans sont les plus nombreux. La densité de nerpruns est importante dans les secteurs NW et NNW du tablier d'éboulis (E-H 1-6). Les individus sont nombreux au sein de la microlave mais ils sont aussi bien représentés dans les secteurs à blocs moyens et gros blocs des zones médiale et distale du tablier (E2-3, E5, B8). La répartition de l'alisier blanc est différente, il a privilégié les zones médiales à gros blocs situées dans le prolongement des bombements herbeux (E5, D-E8, D9,5) ainsi que les abords du cône « raviné » où il est accompagné du saule marsault (*Salix caprea* L.).

Les arbres les plus jeunes (0-10 ans) se sont installés préférentiellement au sein des zones médiale et distale du tablier d'éboulis (Figure 95b). *Rhamnus alpina* L. a colonisé les abords de la microlave et des petits cônes tandis que les espèces de lisière forestière ont privilégié les bordures du tablier, au contact du front forestier (D-E1, D3, B-D 8-10).

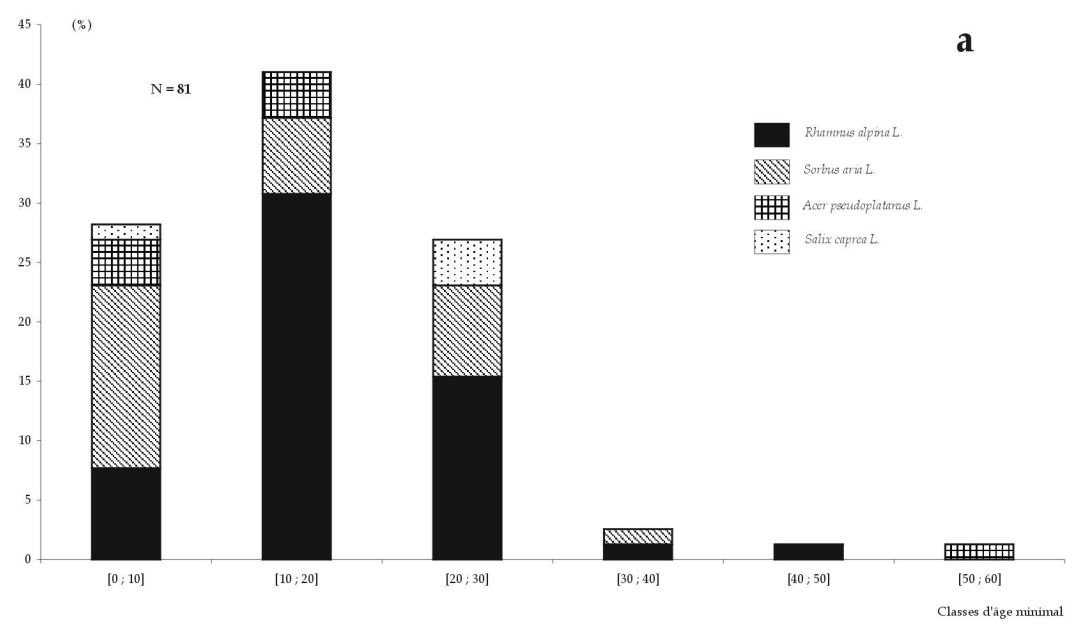
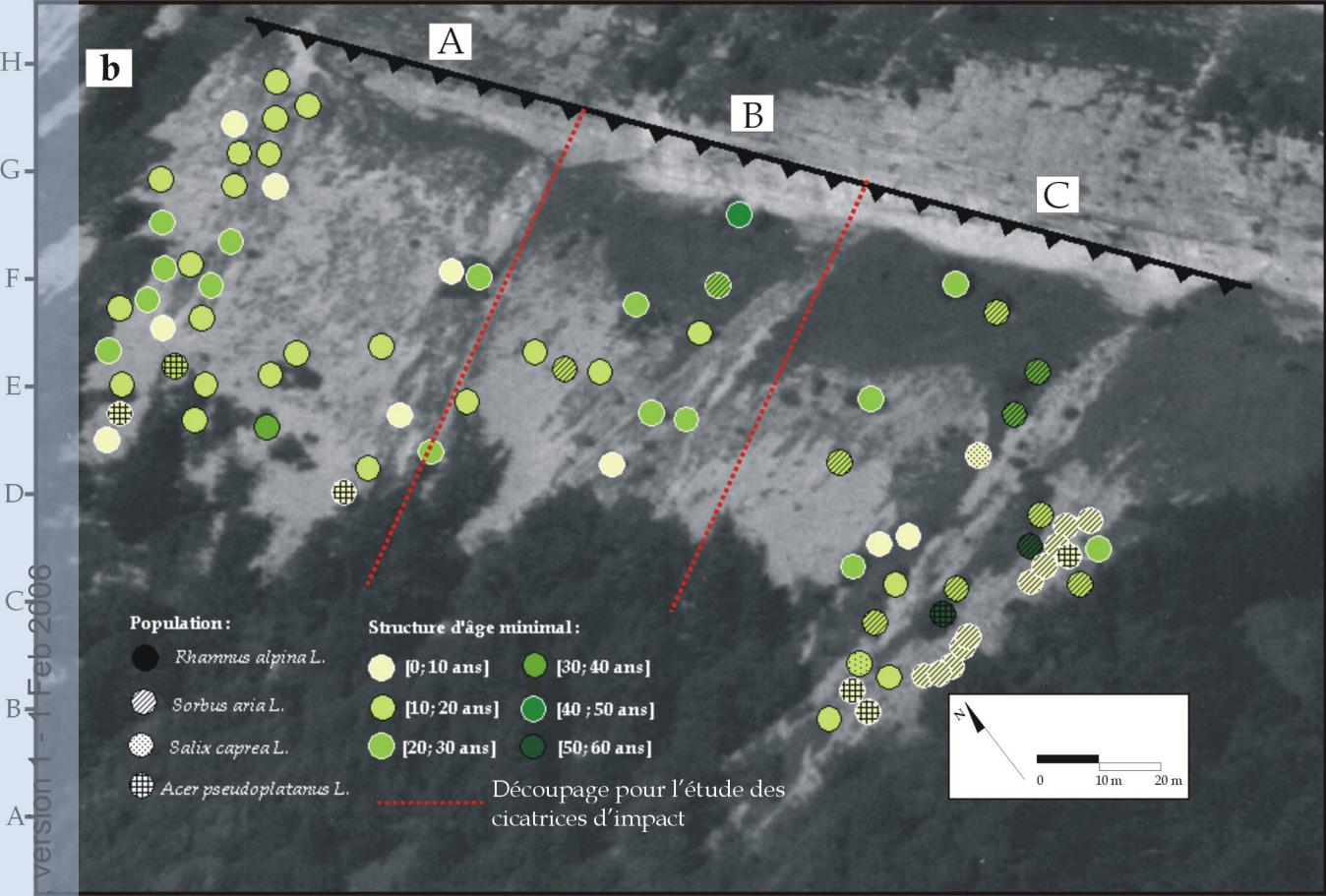


Figure 95 : Structure d'âge (minimal) des populations ligneuses du tablier d'éboulis de La Plagne (modifiées d'après LAURENT, 2005). a) Graphe de la structure d'âge minimal et b) cartographie de localisation.

Il semblerait que l'humidité édaphique provoque un effet corridor de colonisation dans un contexte de ralentissement de la contrainte érosive à l'ouest, celle-ci restant forte à l'est mais i) son effet est compensé par un apport d'eau plus important que dans les autres cônes allongés et la microlave ou ii) par le fait que même si la dynamique nivale s'est aussi atténuée ces dernières décennies, elle est compensée, remplacée par un ramonage pluvial qui continue d'exercer sa contrainte (l'apport en eau restant dans ce cas aussi un plus qui compense et permet le développement des ligneux). D'une manière générale, on observe une franche opposition entre la dynamique du nerprun, dont les individus, plutôt jeunes, colonisent préférentiellement la microlave mais sont aussi extrêmement nombreux sur l'ensemble du tablier d'éboulis (NNW et NW), et les espèces de lisière forestière qui se sont principalement installées au sud du tablier, en bordure du cône « raviné » et dans des secteurs où la densité végétale herbacée est déjà importante (ESE, SSE et SSW). Il est probable que le drainage épidermique, l'humidité du substrat et la fourniture en fines soient ici plus marqués. Cette opposition nous permet de réaliser un découpage du tablier d'éboulis pour le traitement des cicatrices d'impact en trois zones A, B et C (Figure 95b). Cette zonation correspond au découpage latéral que nous avons déjà mis en évidence lors de l'étude phytomorphologique du tablier d'éboulis (1.5, chapitre 6).

Le couplage de la dendrochronologie à l'analyse spatiale permet de préciser la nature et la rythmicité de la dynamique ligneuse observée depuis le début des années 80 et de confirmer la stabilisation en cours du tablier d'éboulis. Certes, comme nous l'avons souligné précédemment, l'activité érosive nivéo-pérglacière est toujours présente mais elle l'est certainement moins qu'avant.

4.2. Les enseignements issus de l'étude des cicatrices d'impact

Pour cette étude, les arbres adultes échantillonnés ($n=52$) portaient au total 163 cicatrices. Il ne s'agit pas de toutes les cicatrices visibles car nous avons uniquement prélevé les tiges à cicatrices multiples. Ces chiffres révèlent par ailleurs l'activité importante des processus car, sur 81 individus, 52 d'entre eux ont subi plusieurs dommages et pratiquement au même niveau sur les tiges. Ces cicatrices, de forme ovale, ont une hauteur moyenne de 10 à 15 cm, une largeur dépassant rarement les 5 cm et une profondeur inférieure ou égale au centimètre. La majorité d'entre elles semble résulter de l'impact causé par les blocs issus de l'éboulisation de l'escarpement secondaire. D'autres résultent de l'arrachement de branches qui plient et se brisent sous le poids du manteau neigeux. Un maximum de six cicatrices a été dénombré sur la tige d'un arbre situé au contact du bombement apical herbeux et du deuxième petit cône (n°34, figure 22). La hauteur moyenne des cicatrices, au-dessus de la surface actuelle du substrat, est de 40,7 cm. Aucune cicatrice n'a été relevée sous la surface du sol.

La formation de la plus vieille cicatrice remonte à 1986 (un arbre)⁸⁶ et la plus récente à 2002 (9 arbres)⁸⁷. On dénombre très peu de cicatrices avant 1990 (Figure 96a). A partir de 1990, on observe un accroissement du nombre absolu de cicatrices et de l'indice pondéré selon le nombre de tiges vivantes mais l'évolution est loin d'être homogène. Ainsi, entre 1990 et 1995, on compte en moyenne 8,8 cicatrices par année ($I_t = 15,4\%$), entre 1996 et 1997, ce nombre enregistre une forte diminution pour atteindre 1,9 cicatrices par année ($I_t = 5\%$). Puis, entre 1998 et 1999, il remonte pour atteindre en moyenne 4,7 cicatrices par année ($I_t = 7,4\%$) et depuis 2000 on assiste à une nouvelle péjoration où l'on enregistre 2,6 cicatrices par année ($I_t = 3,7\%$). Depuis 1993, les cicatrices apparues sur l'ensemble des secteurs A, B et C indiquent que les blocs issus de l'éboulisation ou l'arrachement des branches sont des phénomènes fréquents sur l'ensemble du tablier d'éboulis (Figure 96a).

⁸⁶ N°22.

⁸⁷ Nos 11, 28, 30, 31, 34, 36, 44, 45 et 47.

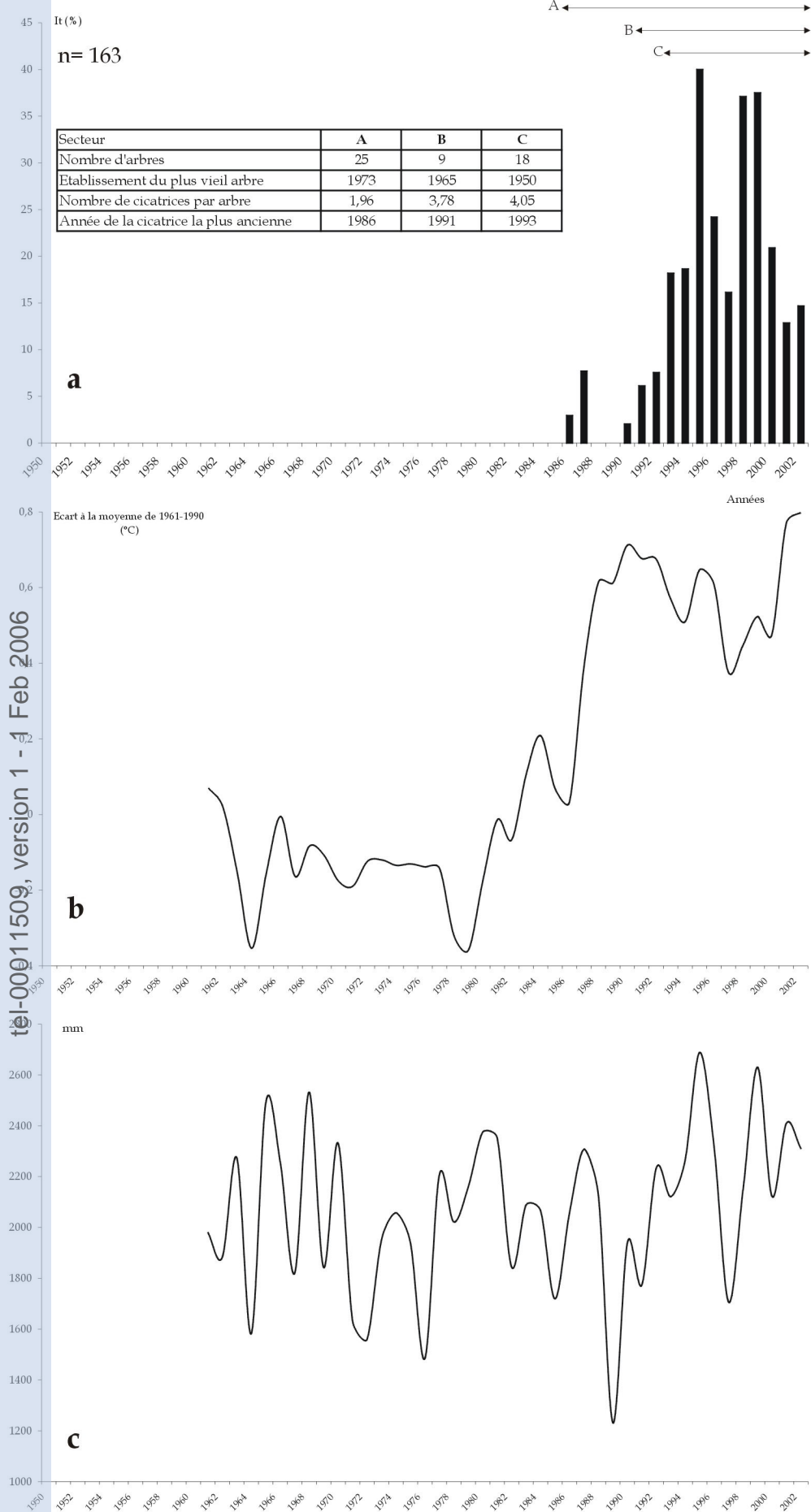


Figure 96 : Données sur la formation de cicatrices par secteur et fréquence pondérée (I) de formation des cicatrices (a). Ecart à la moyenne de 1961-1990 (°C), moyennes mobiles des températures (b). Totaux pluviométriques annuels (c) (Poste de la Grande Chartreuse, Météo-France)

Les données sur la formation de cicatrices par secteur, consignées dans le tableau de la figure 96, nous permettent de souligner que l'activité des processus s'est déplacée du nord-ouest vers le sud-est, le secteur C étant actuellement le plus actif et particulièrement au sein du cône « raviné ». Au contraire, on observe une décroissance des âges d'établissement des arbres de l'est vers l'ouest. Ces éléments confirment pleinement les premières conclusions émises d'une part, lors de l'étude géodynamique et, d'autre part, lors de l'analyse de la cartographie géodynamique et physiognomique du tablier d'éboulis (Carte 12, chapitre 6, 1.5)⁸⁶.

L'explication n'est pas aisée en raison des lacunes concernant les données thermiques et pluviométriques à La Plagne depuis 1960 mais à défaut, nous proposons une petite interprétation. Comme à l'échelle de la planète et des Alpes, en Chartreuse, la période 1989-1999 constitue la décennie la plus chaude (Figures 5 et 96 b) et c'est à partir de 1990 que l'on observe une augmentation du nombre de cicatrices. D'autre part, on relève, toujours au sein de cette décennie, trois années où la fréquence des cicatrices a été importante : 1995, 1998 et 1999 (Figure 96a). Il peut s'agir de phénomènes isolés, comme par exemple de petits écroulements provenant des facettes marno-calcaires fragmentées de l'escarpement secondaire, comme en 2004. Nous savons que les pans de paroi situés en amont des petits cônes sont sujets à ce type de processus. La mise en « concordance » des graphes de fréquence pondérée de formation des cicatrices avec les données thermiques et pluviométriques annuelles du poste de la Grande Chartreuse permet d'émettre quelques hypothèses (Figure 96a, b et c). On observe parfois une adéquation entre les données thermiques et pluviométriques et la fréquence des cicatrices.

Sur la période 1986-1987, les écarts à la moyenne des températures de 1961-1990 montrent un léger fléchissement mais les données pluviométriques enregistrent une petite pointe (Figure 96b et c). Entre 1986 et 1987, seul le secteur A a connu quelques impacts (Figure 96a) et comme la majorité des arbres ont entre 10 et 20 ans, il est probable qu'ils étaient trop petits à l'époque pour enregistrer efficacement les dommages. Ou alors, malgré des conditions thermiques et pluviométriques favorables, les processus d'éboulisation et de remaniement de surface n'ont pas été suffisamment actifs. Nous tenons aussi à rappeler qu'il s'agit ici des données du poste de la Grande Chartreuse et comme nous avons pu le constater sur la période 2002-2004, le tablier d'éboulis est moins arrosé mais les régimes thermiques se ressemblent beaucoup. Il pourrait aussi bien s'agir des effets de l'éboulisation printanière et automnale que ceux liés au poids du manteaux neigeux (arrachement des branches).

Quatre autres périodes présentent une adéquation entre les conditions climatiques⁸⁷ et la fréquence des cicatrices d'impact :

- 1989-1990 : la période est marquée d'une part, par une augmentation brutale des températures (Graphique 1b), les écarts à la moyenne 1961-1990 vont franchir durablement le seuil des + 0,6°C (Figure 96b) et, d'autre part, par un déficit hydrique important (Figure 96c). 1989 est l'année la plus sèche de la période (1232,1 mm). Aucune cicatrice n'a été comptabilisée au sein de notre échantillon. Ces conditions climatiques ont été défavorables aux processus nivéo-péglaciaires;

- l'année 1995 : année de la plus haute fréquence de formation des cicatrices (Figure 96a). L'écart à la moyenne 1961-1990 est élevé et les précipitations enregistrent un pic pluviométrique important (Figure 96b et c). Il s'agit par ailleurs du total pluviométrique le plus élevé de la période 1961-2002 (2688,1 mm). Il semblerait qu'il s'agisse ici des effets conjugués du manteaux neigeux et de l'éboulisation printanière (paragraphe III de ce chapitre). L'examen des totaux pluviométriques mensuels du poste de la Grande Chartreuse semble confirmer cette hypothèse. L'hiver et le printemps sont très arrosés.

⁸⁶ Photogrammétrie basée sur la couleur de la patine des matériaux.

⁸⁷ Nous renvoyons aussi au graphique 1b pour l'évolution thermique en Chartreuse sur la période 1981-2003.

Les précipitations pluvio-neigeuses enregistrent un total de 432,4 mm en janvier et 245,8 mm en février. Le printemps est légèrement plus arrosé et particulièrement en mars (212,7 mm) et mai (481,1 mm) soit, 693,8 mm contre 678,2 mm. Les secteurs A et C ont été fortement marqués et particulièrement au sein de la microlave hydro-gravitaire et du cône « raviné »⁸⁸. Dans le secteur B, un arbre enregistre une seule cicatrice (n°27).

- l'année 1997 : elle est marquée par une péjoration thermique et un déficit pluviométrique (1706, 8 mm) (Figure 96b et c). La fréquence de formation des cicatrices diminue au cours de la période (Figure 96a).

- la période 1998-1999 : comme en 1995, elle enregistre un pic pluviométrique et les écarts à la moyenne 1961-1990 augmentent. Les deux années sont marquées par des fréquences élevées de formation des cicatrices d'impact et particulièrement dans le secteur C⁸⁹. L'examen des totaux pluviométriques mensuels confirme ici, une fois de plus, le rôle des effets conjugués du manteaux neigeux mais surtout des précipitations printanières et automnales. Les deux années ont été particulièrement arrosées : 1998 (2147,3 mm) et 1999 (2629,2 mm). Après 1995, 1999 est la deuxième année la plus pluvieuse de la période. Dans le détail, au cours de l'année 1998, les précipitations pluvio-neigeuses ont été importantes au moins de janvier (249,4 mm) et le début du printemps et de l'été bien arrosé (avril : 250,7 mm, juin : 250,7 mm) . Mais c'est surtout à l'automne que les effets des précipitations ont certainement été les plus marqués. Le total pluviométrique pour la saison automnale s'élève à 868 mm soit, 396,8 mm en septembre, 252 mm en octobre et 219,2 mm en novembre. L'année 1999 est différente et ressemble plus à l'année 1995 pour la saison hivernale. L'hiver est très arrosé en janvier (243,3 mm) et février (353,9 mm). Cependant, comme en 1998, le début des saisons printanière et estivale est pluvieux et particulièrement en avril (281,2 mm) et juin (237,7 mm). Le mois de septembre enregistre aussi un petit excédent hydrique (210,2 mm).

Il semblerait que la concordance entre la fréquence pondérée de formation des cicatrices avec les données pluviométriques soit indiscutable, même si nous avons utilisé les données du poste de la Grande Chartreuse. Une étude de l'ébouilisation des corniches couplée à une reconstitution pluviométrique et une analyse fine de l'intensité des précipitations à La Plagne, aurait permis de préciser cet aspect.

⁸⁸ Secteur A : nos 4, 8, 9, 13, 16, 17, 19 et 22. Secteur C : nos 36, 37, 38, 40, 42, 44 et 48 (Figure 22).

⁸⁹ 1998 : secteur A: nos 3, 5, 10, 19, 24 ; secteur B: 30 et 34 et secteur C: 36, 38, 41, 48, 50 et 52.

1999 : secteur A : nos 3 et 25 ; secteur B : 31 et secteur C : 38, 44, 45, 46, 47, 51 et 52.

CONCLUSION

Au terme de ce travail, trois aspects majeurs retiendront notre attention : l'intérêt d'une approche géo-écologique systémique et appliquée pour l'étude des mosaïques biorhexistatiques d'éboulis en évolution, le rôle fondamental de la biorhexistatie comme facteur structurant à différents niveaux d'observation et d'organisation, et enfin, un jugement sur la pertinence des mosaïques biorhexistatiques d'éboulis comme éléments intégrateurs et révélateur des changements environnementaux en cours.

I. L'intérêt d'une approche géo-écologique systémique et appliquée

En milieu montagnard, l'étude intégrée et exhaustive reste une opération difficile à mener. L'analyse systémique est d'un grand intérêt car l'esprit de système oblige à pratiquer une comptabilité précise des paramètres du milieu étudié, identifiés d'après leurs interrelations et jusqu'à percevoir la dynamique de l'ensemble.

Nous avons ici tenté de mettre en application les conseils de TRICART (1982) qui suggérait d'aborder l'étude d'un milieu, d'un habitat de la même manière que celle des biocénoses, en pratiquant une analyse systémique pour déterminer les interactions entre phénomènes naturels et en introduisant une dimension spatiale et dynamique. Nous avons aussi relancé l'intérêt pour l'approche biogéographique-géomorphologique. Approche défendue par nos prédécesseurs Messieurs SOUTADE et BAUDIERE pour qui l'étude des relations entre la végétation et son modelé support est fondamentale. Dans cette optique, les généralistes que nous sommes doivent nécessairement se tourner vers la pluridisciplinarité. Pour ce faire, la géo-écologie constitue une approche primordiale dans la mesure où elle permet de relier les structures spatiales, objets de la géographie, aux processus écologiques. Le paysage semble être un élément fédérateur entre les deux disciplines dans la mesure où il désigne un système écologique doté d'une composante spatiale et historique, animé par une dynamique évolutive. Ici, les apports de l'écologie du paysage sont intéressants car ils nous permettent d'aborder les liens fonctionnels entre les éléments paysagers. En géographie, le paysage constitue un élément spatial et dynamique fondamental et c'est tout naturellement que nous l'avons choisi comme entrée pour l'étude des mosaïques biorhexistatiques d'éboulis. Cependant, en raison de l'hétérogénéité du système paysager (mosaïque), c'est sous la définition de l'écologie du paysage que nous l'avons appréhendé. Ainsi, le paysage est considéré comme un écosystème, espace porteur d'un ensemble plus ou moins anthropisé d'écosystèmes interactifs. L'écosystème prend en considération la nature hétérogène du paysage et permet d'approfondir la complexité des interrelations entre potentiel écologique (géomorphologie, pédologie, hydrologie, climat), potentiel biologique (végétation) et action anthropique. Sur le terrain, l'hétérogénéité du système paysager est perçue comme une mosaïque biorhexistatique.

Aborder l'étude géo-écologique de la structure et du fonctionnement des mosaïques biorhexistatiques d'éboulis nécessite de prendre en compte une multitude de facteurs mésologiques (composantes climatique, géomorphologique, géodynamique, édaphiques et biologique). Mais le travail ne s'arrête pas là car il convient de s'intéresser simultanément aux aspects statique et dynamique des mosaïques. Comme tout système paysager, elles évoluent dans l'espace et dans le temps et dans le contexte environnemental actuel, il devient plus que nécessaire de prendre en compte leur dimension spatio-temporelle. Cette nécessité n'est pas seulement importante du seul point de vue des mosaïques cartusiennes mais elle s'inscrit aussi dans une problématique plus vaste, celle de la transformation des paysages d'altitude et des conséquences à long terme de cette transformation.

Dans cette course à la compréhension de l'organisation et de l'évolution des écosystèmes paysagers, que sont les mosaïques d'éboulis, la biorhexistase joue un rôle fondamental. La géo-écologie, s'appuie sur le concept de biorhexistase, pour étudier les talus d'éboulis en évolution.

II. Le rôle fondamental de la biorhexistase comme élément structurant à différents niveaux d'observation et d'organisation

La complexité des interactions topoclimatiques, géodynamiques, édaphiques et végétales s'exerçant selon des intensités variables et à des échelles spatio-temporelles différentes expliquent la structure, la dynamique et le caractère polygénique des mosaïques d'éboulis. Pour appréhender cette complexité, nous avons proposé une approche systémique de la biorhexistase applicable à différents niveaux d'organisation (écosystème, station et parcelle) et échelles spatio-temporelles d'observation. L'utilisation de la biorhexistase permet de simplifier l'objet d'étude et faciliter son entrée dans l'approche systémique. De plus, comme nous l'avons montré dans ce travail, son appréciation peut être qualitative mais aussi quantitative.

D'un point de vue statique, la biorhexistase traduit un état du niveau d'organisation considéré à un instant donné. Ainsi, à chaque niveau d'organisation, la confrontation « érosion-végétation » est appréhendée sous la forme d'un bilan biorhexistatique. D'un point de vue dynamique, la biorhexistase se prête parfaitement bien à une approche diachronique et il est ainsi possible de suivre l'évolution du gradient dans l'espace mais aussi dans le temps. Cette évolution traduit une modification de l'équilibre phyto-morphodynamique à l'échelle paysagère, stationnelle et/ou parcellaire. Comme nous l'avons montré au cours de cette étude, la multiplicité des facteurs qui contrôlent le mécanisme de colonisation végétale sur versants érodés ainsi que l'équilibre phyto-morphodynamique, explique les disparités dans l'ampleur, les rythmes et les modalités du phénomène. Par définition, la biorhexistase traduit l'hétérogénéité du niveau d'organisation considéré mais le suivi de l'évolution du gradient biorhexistatique, permet aussi de cerner son éventuelle homogénéisation. La biorhexistase joue donc un rôle clé dans l'étude et la compréhension de la transformation des paysages d'altitude.

Mais son rôle ne s'arrête pas là car elle est aussi garante, par les différents degrés d'hétérogénéité qu'elle implique, de la phytodiversité des mosaïques et de la conservation des habitats. Le passage de la biorhexistase à la phytodiversité est aisé mais peu pratiqué. Comme l'état biorhexistatique à un instant donné, la phytodiversité actuelle a une dimension biogéographique et temporelle qui est la résultante d'une évolution passée qui se poursuit aujourd'hui. Elle est en interaction avec les différents processus d'érosion et les changements morphoclimatiques. Elle évolue, se transforme sous les effets conjugués ou non de facteurs endogènes (biotiques) ou exogènes (abiotiques et anthropiques). Ainsi, comme nous l'avons montré précédemment, les mosaïques biorhexistatiques d'éboulis sont caractérisées par la présence d'une richesse et d'une diversité spécifiques locales et globales originales, intégrant différents degrés de rareté. Cette phytodiversité est directement liée à l'existence du gradient biorhexistatique, dans la mesure où l'état phyto-morphodynamique va favoriser l'installation et le développement des végétaux soit en biostase, soit en rhexistase, soit en hétérostase. Par conséquent, tout processus qui modifie l'équilibre phyto-morphodynamique, entraînera une réorganisation du gradient biorhexistatique. Si ce processus s'inscrit dans une dynamique d'homogénéisation rhexistatique ou biostatique, la phytodiversité en sera forcément modifiée. Actuellement, comme nous l'avons souligné, la tendance est plutôt biostatique et l'évolution devrait se poursuivre dans ce sens.

III. La pertinence des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis de l'étage infra-périglacière comme éléments intégrateurs et révélateur des changements environnementaux en cours

Tout au long de cette étude, nous nous sommes efforcés de cerner le mieux possible les effets des changements environnementaux sur la dynamique des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis. C'est incontestable, elles ont déjà répondu à ces changements. Depuis la fin du 19^{ème} siècle et surtout depuis les années 1950, la déprise sylvo-pastorale a été particulièrement ressentie au sein des différentes mosaïques étudiées. Certes, les cinq écosystèmes ont enregistré des trajectoires et des vitesses d'évolution végétale variées, en raison notamment des différences liées à la pression anthropique passée, mais le résultat est identique. La dynamique végétale a été très importante sur talus d'éboulis et en périphérie. D'autre part, l'étage nivéo-périglacière s'est révélé être extrêmement sensible aux fluctuations climatiques depuis 100 ans mais aussi sur une courte durée (2002-2004) et nous pensons qu'il a connu une évolution sensiblement similaire à celle enregistrée à 1000 m. Le réchauffement climatique des dernières décennies par son action directe sur la dynamique des végétaux et par son intervention sur l'efficacité des processus nivéo-périglaciaires, qui entretiennent la rhexistasie sur éboulis, est à l'origine de la dynamique végétale observée et particulièrement depuis le début des années 80. Le couplage de la dendrochronologie à l'analyse spatiale diachronique confirme cet aspect. D'autre part, ces méthodes ont aussi permis de préciser la nature et la rythmicité de la dynamique ligneuse et de confirmer la stabilisation en cours de certains talus d'éboulis et particulièrement ceux de La Plagne et de l'Aulp du Seuil. Ces talus d'éboulis sont par ailleurs ceux qui ont connu la pression anthropique la moins forte. Ces changements environnementaux ont entraîné de profondes modifications structurelles, fonctionnelles et dynamiques des mosaïques. La démonstration n'a pas été facile car il est extrêmement difficile de mettre en évidence de manière précise des liens de causalité. D'autre part, les paramètres explicatifs sont tellement nombreux que nous n'avons pu en aborder qu'une petite partie. En tout cas, nous sommes au moins convaincus de la pertinence des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis comme étant des éléments intégrateurs et révélateurs des changements environnementaux en cours. Ces milieux ouverts, de petites surfaces, délimités en amont par de grands escarpements de calcaire urgonien et, en aval, par l'écosystème forestier, présentent une configuration paysagère particulière qui en fait des milieux privilégiés pour l'étude des changements environnementaux. Par conséquent, ils constituent sans conteste des observatoires privilégiés pour le suivi à long terme des interactions entre le végétal et le minéral mais aussi de la dynamique végétale et ses conséquences possible sur l'évolution paysagère et par extension sur la phytodiversité.

IV. La nécessité d'un suivi à long terme

Nous sommes parfaitement conscients du fait que cette étude, très minutieuse, ne porte que sur un secteur réduit dans les Préalpes mais nous considérons que tous les niveaux d'action sont légitimes. Il est évident et surtout si l'on considère ce travail qu'il est matériellement impossible de développer des protocoles aussi diversifiés, tout en étant très fournis, sur un nombre de sites d'étude éloignés et disparates. Il n'en demeure pas moins que ce travail consiste aussi et avant tout en une mise au point d'une chaîne d'analyses instrumentalisées faisant l'objet d'un vrai processus méthodologique susceptible d'être appliqué dans d'autres milieux comparables. Dans ce type de recherche, l'approche systémique hiérarchique, du paysage à la parcelle, est fondamentale et l'outil cartographique extrêmement efficace surtout dans un contexte de dynamique évolutive. Ainsi, notre étude se place en comparaison avec d'autres secteurs de massifs montagneux pour lesquels des études de ces dynamiques existent comme le Jura, les Alpes du Sud, les Pyrénées mais aussi la Sierra Nevada en Espagne, les Alpes suisses ou autrichiennes ou bien encore les Carpathes voire les montagnes nord américaines. La problématique de la transformation des paysages d'altitude est au centre des préoccupations scientifiques actuelles et les mosaïques biorhexistasiques d'éboulis cartusiennes sont loin d'être des cas isolés, bien au contraire. Dans le contexte

environnemental actuel, il est important de les étudier et de les surveiller. Seul un suivi rigoureux permettra de cerner les éventuelles conséquences de cette transformation et d'appréhender l'érosion de la phytodiversité. Car après tout, non seulement ces mosaïques paysagères d'altitude peuvent constituer des « hotspots » de phytodiversité mais aussi, comme nous l'avons montré, des « hotspots » privilégiés pour l'étude des effets des changements environnementaux en cours. Leur intérêt scientifique et patrimonial est indiscutable. La Chartreuse se prête bien à ce type d'étude car le massif constitue un véritable laboratoire d'analyse de certains paramètres biophysiques. Ce massif, grâce à la proximité de l'agglomération grenobloise, a été particulièrement bien prospecté et équipé en instruments de mesure dans tous les domaines scientifiques. Il constitue sans aucun doute un site-atelier pertinent.

Nous avons vu que les mosaïques biorhexistasiques avaient évolué différemment sous l'influence des facteurs mésologiques et des dynamiques naturelles et anthropiques. Nous avons pu cerner cette évolution de trois manières : par le biais de travaux plus anciens, sur une courte durée dans le cadre de notre étude et par la mise en place d'une instrumentation d'observation et de suivi ainsi que par l'utilisation de protocoles d'étude spécifiques. La transformation des mosaïques biorhexistasiques cartusiennes est susceptible d'entraîner à long terme une modification durable de la phytodiversité. Nous pensons avoir répondu aux besoins du gestionnaire en matière de connaissance du milieu et de sa dynamique évolutive. Cette étude a été l'occasion de recueillir des données spécifiques qui pourront être directement utilisables, à condition d'en réaliser un suivi régulier. Car pour le gestionnaire se pose deux problèmes : celui de la gestion de la multitude et de la rareté et celui de la gestion de l'évolution. Il était donc important pour nous de mettre en avant les spécificités des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis et d'identifier celles qui comportent une phytodiversité importante. Mais par rapport à ce volet gestion ou aide à la gestion, il était aussi nécessaire de bien mettre en évidence la réalité biogéographique de la phytodiversité qui est, aussi désormais, dépendante de la gestion des habitats. Ce qui est valable pour tel ou tel habitat, et de surcroît pour les éboulis de la Réserve des Hauts de Chartreuse, peut être contredit ailleurs. Il est donc nécessaire d'aborder la gestion des mosaïques de manière ponctuelle et de centrer les préoccupations à la fois sur le maintien des espèces et des écosystèmes. La Réserve des Hauts se doit d'être un bon outil de gestion de la phytodiversité spécifique et écosystémique car c'est une des solutions pour la maintenir *in situ*, mais il ne faut pas perdre de vue le fait qu'elle n'est qu'un palliatif à court terme.

BIBLIOGRAPHIE

- AGNEW A.D.Q., COLLINS S.L., VAN DER MAAREL E., 1993, Mechanisms and processes in vegetation dynamics: introduction, *Journal of Vegetation Science* 4: 146-148.
- AICHELE D., 1975, *Quelle est donc cette fleur ?* Paris, Fernand Nathan, 399p.
- ALBJAR G., REHN J., STROMQUIST L., 1979, Notes on talus formation in different climates, *Geografiska Annaler* 61 A (3-4): 179-185.
- ALLEE P., 1984, Environnement géomorphologique et éboulis de gélifraction hérités dans le Haut-Vallespir (Pyrénées Orientales), Actes du Colloque tenu le 8 janvier 1983 à Paris, "Eboulis et environnement géographique passé et actuel" : 31-34.
- ALLEN T.F.H., STARR T.B., 1982, *Hierarchy. Perspectives for ecological complexity*, The University of Chicago Press, 310 p.
- ALLEN T.F.H., HOEKSTRA T.W., 1990, The confusion between scale-defined levels and conventionnal levels of organisation, *Journal of Vegetation Science* 1: 5-12.
- ALLIX A., 1975, *Un pays de haute montagne: l'Oisans, étude géographique*, 1ère édition 1929, Laffite reprints, Marseille, 915 p.
- AMBERG K., 1916, *Der Pilatus in seinen pflanzengeographischen und wirtschaftlichen Verhältnissen (Promotionsarbeit)*, Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Luzern Heft VII mit 23 Abbildungen und einer Karte: 5-267.
- ANDREAU J., 2003, *L'évolution paysagère des dépôts détritiques de la vallée de la Haute Romanche: rôle respectif des pratiques agro-sylvo-pastorales et du réchauffement climatique ?* Mémoire de Maîtrise, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble 1, 154 p.
- ANDRE M.-F., 1988, Vitesses d'accumulation des débris rocheux au pied des parois supraglaciaires du nord-ouest du Spitsberg, *Z. Geomorphol.* 32 (3): 351-373.
- ANTHELME F., MICHALET R., BARBARO L., BRUN J.-J., 2003, Environmental and spatial influences of shrub cover (*Alnus viridis* DC.) on vegetation diversity at the upper treeline in the Inner Western Alps, *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 35, 1: 48-55.
- ANTOINE P., FABRE D., 1984, *Géologie appliquée au génie civil*, Masson, Paris, 291 p.
- ARQUES S., 1999, *Biodiversité et processus d'érosion: l'exemple des talus d'éboulis du massif de la Grande Chartreuse (réserve naturelle des Hauts et Chamechaude): Etude et cartographie des écotones biorhexistatiques au 1/5000*, Grenoble, IGA-UJF, Mémoire de Maîtrise, 165 p.
- ARQUES S., ROVERA G., 2000, Dynamique des talus d'éboulis et biodiversité dans le massif de la Grande Chartreuse (Alpes du nord): méthode d'étude et cartographie à grande échelle (1: 5000), *Bull. Assoc. Fr. Péri.* Vol 7, n° XXV: 87-94.
- ARQUES S., VANPEENE-BRUHIER S., ROVERA G., BRUN J.-J., 2001, *Evaluation de la biodiversité et fonctionnement des écosystèmes et écotones sur éboulis calcaires. Application en Chartreuse aux sites de Chamechaude, la Dent de Crolles, l'Aulp du Seuil, les Pelloux et la Plagne*, Rapport intermédiaire rédigé à la demande de la Direction de la Nature et ds Paysages, du M.A.T.E, Convention cadre: Gestion des territoires – Opération 3, 46 p.
- ARQUES S., CORONA C., ROBERT Y., 2003a, *Rôle des processus nivo-périglaciaires et de leur évolution dans la dynamique des écotones biorhexistatiques: l'exemple du tablier de La Plagne (Massif de la Grande Chartreuse, Préalpes du Nord, France)*. Communication et présentation d'un poster à la Journée Nationale des Jeunes Géomorphologues - Rennes, 29 mars 2003.
- ARQUES S., CORONA C., ROBERT Y., 2003b, *Géodynamique et biodiversité sur éboulis dans la Réserve Naturelle des Hauts de Chartreuse. Evolution récente en relation avec les changements environnementaux: l'exemple du tablier d'éboulis de La Plagne (Massif de la Grande Chartreuse, Préalpes Françaises du Nord)*. In Vanpeene-Bruhier S. (ed), *Evaluation des risques environnementaux pour une gestion durable des espaces*, Actes des journées 2003 de l'Association Internationale pour l'Ecologie du Paysage IALE France, Gap du 8 au 10 octobre 2003, Cemagref Editions, Antony: 131-140.

- ARQUILLIERE S. 1986**, *Morphologie, croissance, reproduction végétative de l'épicéa (Picea abies (L.) Karsten) dans une zone de combat subalpine: massif du Taillefer, Alpes dauphinoises*, Thèse de troisième cycle, écologie appliquée, Grenoble 1, 265 p.
- ASTRADE L., BRAVARD J.-P., LANDON N., 1998**, Mouvements de masse et dynamique d'un géosystème alpestre: étude de deux sites dans la vallée de Boulc (Diois, France), *Géographie Physique et Quaternaire*, vol. 44 (2): 199-215.
- ATKINSON I.A.E., 1972**, Vegetation and floral of Sail Rock, Hen and Chikens Islands, New Zealand, *J. Bot.*, 10: 545-558.
- AUBERTIN C., VIVIEN F.D., 1998**, *Les enjeux de la biodiversité*, Paris, Coll. Poche Environnement, Ed Economica, 112 p.
- BALLANDRAS S., 1998**, Le remblaiement historique dans les bassins-versants torrentiels des Alpes françaises, *Géomorphologie*, 1: 65-78.
- BALLAIS J.L., 1998**, Haloclastie et hydroclastie, In VEYRET Y. (Coord.), *L'érosion entre nature et société*, SEDES, Paris : 27-28.
- BALLAIS J.L., MIETTON M., VALADAS B., 1998**, L'érosion entre nature et société, *Coll. Dossier des images économiques du Monde*, Dossier n°22, Ed. SEDES, Paris, 344 p.
- BÄR J., 1918**, *Die Vegetation des Val Onsernone (Kanton Tessin) Den Berichten der Schweizerischen Botanischen Gesellschaft Heft XXVI mit einer pflanzengeographischen Karte 1:50 000 und zwei Höhenverbreitungstafeln*, Beiträge zur geobotanischen Landesaufnahme 5: 1-80.
- BARBAULT R., 1995**, *Ecologie des peuplements*, Masson, Paris, 273 p.
- BARRY R.G., AND C.C. VAN WIE, 1974**, Topo- and microclimatology in alpine areas, *Arctic and Alpine Environment*, Methuen, London: 73-83.
- BAUDIERE A., BONNET L.M., 1963**, Introduction à l'étude de la végétation des éboulis de la zone alpine des Pyrénées Orientales, *Nat. Monsp. Sér. Bot. Fasc 15*: 13-28.
- BAUDIERE A., SERVE L., 1971**, Organisation morphologique et rôle des végétaux dans la dynamique des formations superficielles en milieu supraforestier, *Bull. Soc. Bot. Fr.* 118 (1-2): 77-94.
- BAUDIERE A., 1983**, Modes de perception de l'éboulis par les botanistes, *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, Paris, 491: 25-31.
- BAUDIERE A., SOUTADE G., 1985**, Sur la notion de système phytomorphogénétique et l'utilisation de ce concept pour l'étude de la végétation des milieux supraforestiers, XXXIX^e symp. Intern. I.V.V. *Végétation et géomorphologie*, Bailleul, in Colloques phytosociologiques 13: 173-177.
- BAUDIERE A., GAUQUELIN T., 1990**, Successions, substitutions, écotones et systèmes phytomorphogénétiques pyrénéens d'altitude. Evolution récente des sols et de la végétation sur les hauts sommets du bassin occidental de la Méditerranée, *Coll. Ecologie et Biogéographie alpines, La Tuile, Rev. Valdôtaine Sci. Nat. Supp. n° 48 (1994)*: 13-28.
- BAUDRY J., BUREL F., 1982**, La mesure de la diversité spatiale. Relations avec la diversité spécifique, Utilisation dans les évaluations d'impact, *Acta oecologica, Oecol. Applic.* 3 (2): 177-190.
- BAUDRY J., 1992**, Approche spatiale des phénomènes écologiques: détection des effets d'échelle, in AUGER P., BAUDRY J., FOURNIER F., *Hierarchies et échelles en écologie*, Naturalia publication, Paris: 157-171.
- BECKER et al., 1995**, Long-term changes in forest productivity in northeastern France: The dendroecological approach, in: LANDMANN G. et BONNEAU M. (eds), *Forest Decline and Atmospheric Deposition Effects in the French Mountains*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 143-156.
- BEHRE C.H., 1933**, Talus behavior above timber in the Rocky Mountains, *J. Geol.* 41: 622-635.
- BELINGARD C., 1996**, *Etude dendroécologique de la dynamique de la limite supérieure de la forêt dans les Alpes du Sud, en relation avec les facteurs climatique et anthropique*, Thèse d'université, Marseille III, 103 p.

- BELINGARD C., TESSIER L., EDOUARD J.-L., 1998**, Reboisement et dynamique naturelle dans les forêts sub-alpines (Haut-Verdon, Alpes du Sud, France), *Géographie Physique et Quaternaire* 52 (2): 1-10.
- BELL K.L., et BLISS L.C., 1973**, Alpine disturbance studies: Olympic National Park, USA, *Biol. Conserv.* 5: 25-32.
- BENEDICT J.B., 1970**, Downslope soil movement in a Colorado alpine region ; rates, processes and climatic significance, *Arctic and alpine Research.* 2 (3): 165-226.
- BENEVENT E., 1926**, *Le climat des Alpes françaises*. Thèse, Paris, 435 p.
- BENISTON M., 2005**, Warmed winter spells in the Swiss Alps: Strong heat waves in a cold season? A study focusing on climate observations at the Saentis high mountain site, *Geophys. Res. Lett.* 32, L01812: 1-5.
- BENISTON M., 2004a**, Climate model predicts even hotter summers, *Geophys. Res. Lett.* 31, L02202.
- BENISTON M., 2004b**, *Climatic change in the alpine region*, Comm. IABM, Barcelona, 5 june 2004.
- BENISTON M., DIAZ H F., 2004**, The 2003 heat wave as an example of summers in a greenhouse climate? Observations and climate model simulations for Basel, Switzerland, *Global and Planetary Change* 44: 73-81.
- BENISTON M., STEPHENSON D B., 2004**, Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions, *Global and Planetary Change* 44: 1-9.
- BENISTON M., 2003**, Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts, *Climatic Change* 59: 5-31.
- BENISTON M., KELLER F., KOFFI B., GOYETTE S., 2003**, Estimates of snow accumulation and volume in the Swiss Alps under changing climatic conditions, *Theor. Appl. Climatol.* 76: 125-140.
- BENISTON M., JUNGO P., 2002**, Shifts in the distributions of pressure, temperature and moisture and changes in the typical weather patterns in the Alpine region in response to the behavior of the North Atlantic Oscillation, *Theor. Appl. Climatol.* 71: 29-42.
- BENISTON M., 2000**, *Environmental change in mountains and uplands*, Arnold, London.
- BENISTON M., REBETEZ M., 1996a**, Regional behaviour of minimum temperatures in Switzerland for the period 1979-1993, *Theor. Appl. Climatol.* 53: 231-243.
- BENISTON, M., FOX, D.G., ADBILCARY, S., GUISAN, A., HOLTEN, J., INNES, J., MAITINN, J., PRICE, M., TESSIER, L., 1996b**, *The impacts of climate change in mountain regions*, p. 191-213. In R.I . Watson, M. Zinyomer, et R.H. Moss, édit., *Climate change 1995: The impact of climate change, adaptation and migration options*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press.
- BERTINELLI F., PETITCOLAS V., ASTA J., RICHARD L., SOUCHIER B., 1993**, Relations dynamiques entre la végétation et le sol sur éboulis froid dans les Alpes Françaises Méridionales, *Revue d'Ecologie Alpine* II: 93-104.
- BERTRAN P., al., 1997**, Fabric characteristics of subaerial slope deposits, *Sedimentology* 44: 1-16.
- BERTRAN P., TEXIER J.-P., 1999**, Sedimentation processes and facies on a semi-vegetated talus, Lousteau, Southwestern France, *Earth Surf. Process. Landforms* 24: 177-187.
- BERTRAND G., 1966**, Pour une étude géographique de la végétation, *Rev. Géogr. Pyr. S.-Ouest*, t.XXXVII, 2: 129-143.
- BERTRAND G., 1968**, Paysage et géographie physique globale. Esquisse méthodologique. *Rev. Géogr. Pyr. S.-Ouest*, 39 (3): 249-272.
- BILLINGS W.D et al., 1983**, Increasing atmospheric carbon dioxide: possible effects on arctic tundra, *Oecologia* 58: 286-289.
- BILLINGS W.D., 1987**, Constraints to plant growth, reproduction and establishment in arctic environments, *Arctic and Alpine research* 19 (4): 357-365.
- BIROT P., 1981**, *Les processus d'érosion à la surface des continents*. Paris, Masson, 607 p.
- BLANCHARD R., 1943-1947-1948**, *Les Alpes occidentales. Les Cluses préalpines et le Sillon alpin*, Tome 2, Grenoble, Arthaud, Deuxième édition, 670 p.
- BLACHE J., 1931**, *Les massifs de la Grande Chartreuse et du Vercors. étude géographique*, Tome 1 et 2, Grenoble, Ed Didier Richard: 478 et 514 p.

- BLANDIN P., 1992**, *De l'écosystème à l'écocomplexe*, in JOLLIVET M. Ed Sciences de la Nature, Sciences de la Société. Les passeurs de frontières, CNRS Editions, 1992: 267-279.
- BLANDIN P., LAMOTTE M., 1988**, Recherche d'une unité écologique correspondant à l'étude des paysages: la notion d'écocomplexe, *Bull. Ecol.* 19 (4): 547-555.
- BLONDEL J., 1995**, *Biogéographie. Approche écologique et évolutive*. Masson, collection écologie: 27, 297 p.
- BONNIER G., DE LAYENS G., 1986**, *Flore complète portative de la France, de la Suisse et de la Belgique*, Paris, Belin, 425 p.
- BOREL J.L., JORDA M., MONTJUVENT G., 1984**, Variations climatiques, morphogenèse et évolution de la végétation post-Würmienne dans les Alpes françaises, ouvrage du Comité International d'Organisation du 25 Congrès International de Géographie, août 1984, *Les Alpes*: 43-53.
- BOUTONNET P., 1992**, *L'ancienne économie agro-pastorale*, in BOUDON J., ROUGIER H., *Histoire du Dauphiné*, Horvath, 65-82.
- BOWMAN, W.D., THEODOSE T.A., SCHARDT J.C., CONANT R.T., 1993**, Constraints of nutrient availability on primary production in two alpine tundra communities, *Ecology* 74: 2085-2097 .
- BOZONAT J.P., 1980**, *Infiltration et circulation dans les calcaires fissurés. Hydrogéologie et bilan hydrique du secteur septentrional du Massif de la Chartreuse*, Grenoble, Thèse de Doctorat, Spécialité: géologie appliquée, Option: hydrogéologie, 353 p.
- BRAUN-BLANQUET J., 1915**, *Les Cévennes méridionales (Massif de l'Aigoual). Etude phytogéographique*, Thèse Sci. Montpellier, 208 p.
- BRAUN-BLANQUET J., 1948**, *La végétation alpine des Pyrénées orientales*, Comm. Stat. Int. Géobot. Médit. Montpellier, 98, 306 p.
- BRAUN-BLANQUET J., 1954**, *La végétation alpine et nivale des Alpes françaises*, 8^{ème} congrès international de Botanique « Etude botanique de l'étage alpin, particulièrement en France », Paris-Nice 1954, Travaux du comité scientifique du Club Alpin Français: 2-72
- BRUN J.J., DELCROS P., GROSSI J.L., 1995**, Landscape pattern and biodiversity management in abandoned mountain land (French alps), in Belland D., Boning G., Emig C., (eds) *Functioning and dynamics of naturel perturbed ecosystems*, Technique et documentation Lavoisier, Intercepted Ltd: 468-476.
- BURGA C.A., 1988**, Swiss vegetation history during the last 18 000 years, *New Phytologist* 110: 581-602.
- BURROWS C.J., 1990**, *Processes of Vegetation Change*, Unwin Hyman Publishing, London, 551p.
- CAILLEUX A., 1947**, Caractères distinctifs des coulées de blocailles liées au gel intense, *C.R. Somm. Séances Soc. Géol. France*, 16: 323-325.
- CAINE N., 1963**, Movement of low-angle scree slopes in the Lake District, northern England, *Rev. Géomorph. Dynam.*, 14: 172-178.
- CAINE N., 1968**, The log-normal distribution and rates of soil movement: an example, *Rev. Géomorph. Dyn.* 18: 1-7.
- CAINE N., 1969a**, A model for alpine talus slope development by slush avalanching, *J. Geol.*, 77: 92-100.
- CAINE N., 1969b**, The analysis of surface fabrics on talus by means of ground photography, *Arct. And Alp. Res.* 1: 127-134.
- CAINE N., 1974**, *The geomorphic processes of the alpine environment*, In Arctic and Alpine Environments, Edited by Jack D. Ives and Roger G. Barry, METUEN and Co. Ltd, London: 721-748.
- CANNEL M.G.R., GRACE J., BOOTH A., 1989**, Possible impacts of climatic warning on trees and forests in the United Kingdom: a review, *Forestry*, 62 (4): 337-364.
- CANNONE N., GERDOL R., 2003**, Vegetation as an Ecological Indicator of Surface Instability in Rock Glacier, *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 35 (3): 384-390.

- CARCAILLET C., 1996**, *Evolution de l'organisation spatiale des communautés végétales d'altitude depuis 7000 ans BP dans la vallée de la Maurienne (Alpes de Savoie, France): une analyse pédoanthracologique*, Thèse d'université, Aix-Marseille III, 95p.
- CARNIEL P. et SCHEIDEGGER A. E., 1974**, Morphometry of an alpine scree cone, *Rivista Italiana di Geofisica* 23: 95-10.
- CARSON M.A., 1977**, Angles of repose, angles of shearing resistance and angles of talus slopes, *Earth Surf. Proc.* 2: 363-380.
- CARTES GEOLOGIQUES AU 1: 50000 ET NOTICES EXPLICATIVES, 1969**, Feuilles de Domène XXXIII-34 et Montmélian XXXIII-33, IGA, BRGM.
- CHAPIN F.S. III, SCHULZE E.D., MOONEY H.A., 1992**, Biodiversity and ecosystem processes, *Tree* 7 (4): 107-108.
- CHAPIN F.S. III, KORNER C., 1994**, Arctic and alpine biodiversity: patterns, causes and ecosystem consequences, *Tree* 9 (2: 92): 45-47.
- CHARDON M., 1984**, Montagne et haute montagne alpine, critères et limites morphologiques remarquables en haute montagne, *Revue de Géographie Alpine* 72 (2-3-4): 213-224.
- CHAUVET M., OLIVIER L., 1993**, *La biodiversité enjeu planétaire, préserver notre patrimoine génétique*. Editions Sangs de la Terre, 413p.
- CHOCHILLON C., 2002**, *Fréquence des coulées de débris depuis le Petit Age Glaciaire dans le massif des Ecrins (Alpes françaises du Sud)*, Thèse de 3^{ème} cycle, 113 p.
- CHRISTENSEN O.B., CHRISTENSEN J.H., MACHENHAUER B., BOTZET M., 1998**, Very high-resolution regional climate simulations over Scandinavia Present Climate, *J. Climate*, 11: 3204-3229.
- CHURCH M., STOCK R. F., RYDER J. M., 1979**, Contemporary sediment environments on Baffin Island, N. W. T.: debris slope accumulations, *Arctic and Alpine Research*, 2 (4): 371-402.
- CLAVAL P., 1996**, *Le renouvellement de la géographie*, Presses Universitaires de France, Que sais-je? 126 p.
- CLEMENT F.E., 1905**, *Research methods in ecology*, Lincoln Univ., 334 p.
- CLERC J., 1988**, *Recherches pollenanalytiques sur la paléoécologie Tardiglaciaire et Holocène du Bas-Dauphiné*, Thèse de Doctorat, Univ. Aix-Marseille III, 171 p.
- COE M.J., 1967**, *The ecology of the alpine zone of Mount Kenya*, Dr. W. Junk, The Hague.
- COOPER W.S., 1916**, Plant successions in the Mount Robson region, British Columbia, *Plant World* 19: 211-238.
- COMBE N., 2002**, *Erosion et dynamique de la végétation sur les versants de l'Oisans: Contribution à un diagnostic de l'effet biotassique des travaux de restauration (RTM) sur l'adret de Mizoën (Vallée de la Romanche, Isère)*, Mémoire de Maîtrise, Institut de Géographie Alpine, Univ. Joseph Fourier, Grenoble 1, 191 p.
- COQUE R., 1977**, *Géomorphologie*, Armand Colin, Paris, 507 p.
- CORONA C., ARQUES S., ROBERT Y., 2003**, Réponse des modelés périglaciaires aux variations climatiques: l'exemple des banquettes de soli-gélifluxion de Mizoën (Haute Romanche, Alpes françaises du Nord), Communication au colloque annuel de l'Association Française du Périglaciaire, 17-18 janvier 2003, sur le thème des « Réponses des modelés périglaciaires et niveaux aux variations environnementales ».
- CORONA C., ARQUES S., 2002**, *Impacts des fluctuations climatiques enregistrées depuis le Petit Age Glaciaire sur les versants soumis aux processus nivo-périglaciaires et aux mutations du pastoralisme. Approche biogéographique appliquée aux versants de la vallée d'Ailefroide (commune du Pelvoux, Parc national des Ecrins)*, Programme de Recherche Interaction Nature-Société, 2001-2004, Laboratoire de Géographie Physique "Pierre Birot" UMR 8591 CNRS Meudon sous la direction de JOMELLI V., 50 p.
- COSTE H., 1901 (rééd 1990)**, *Flore descriptive et illustrée de la France, de la Corse et des contrées limitrophes*. Albert Blanchard, Paris, 3 tomes: 416, 627 et 807 p.
- COSTET J., SANGLERAT G., 1969**, *Cours pratique de mécanique des sols*. Dunod, 599 p.
- COUREL M.F., DELAUNAY J., 1980**, *Les éboulements d'extension catastrophique*, B.R.G.M., 55 p.

- COUTEAUX M., 1983**, Fluctuations glaciaires de la fin du Würm dans les Alpes françaises établies par des analyses polliniques, *Boréas*, 12 (1): 35-36.
- COX J.E., LARSON D.W., 1993**, *Spatial heterogeneity of vegetation and environmental factors on talus slopes of the Niagara Escarpment* 71 (2): 323-332.
- DAGET P., 1976**, *Les modèles mathématiques en écologie*, Masson, Paris, 172 p.
- DAGET P., GODRON P., 1982**, *Analyse de l'écologie des espèces dans les communautés*, Masson, collection d'écologie n°18, Paris: 12-21.
- DAJOZ R., 1996**, *Précis d'écologie*, Paris, Dunod, 6^{ème} édition, 551 p.
- DAUBENMIRE R.F., SLIPP A.W., 1943**, Plant succession on talus slopes in northern Idaho as influenced by slope exposure, *Bull. Torrey Bot. Club*, 70: 473-480.
- DAVEAU S., 1958**, Cône central d'éboulis de l'Aiguille Rousse, *Rev. Géogr. Alp.*, 46: 423-428.
- DAVID F., 1993**, *Evolutions de la limite supérieure des arbres dans les Alpes françaises du Nord depuis la fin des temps glaciaires*, thèse de 3^{ème} cycle, université Aix-Marseille III, 94 p.
- DAVID F., 1995**, Vegetation dynamics in the northern French Alps, *Historical Biology* 9: 269-295.
- DAVIS P.H., 1951**, Cliff vegetation in the eastern Mediterranean, *J.Ecol.* 39: 63-93.
- DAVIS M.B., 1986**, *Climatic instability, time lags, and community disequilibrium*, in DIAMOND D.J., CASE T.J., *Community Ecology*, Harper and Row, New-York: 269-284.
- DAVISON C., 1888a**, Note on the movement of scree-material, Reprinted from *Quarter. J. Geol. Soc.* 44: 232-238. In *Slope Morphology*, 1973, *Benchmark Papers in Geology*, Edited by STANLEY A. SCHUM and M. PAUL MOSLEY, Dowden, Hutchinson & Ross, Inc. Stroudsburg, Pennsylvania: 330-336.
- DAVISON C., 1888b**, Second note on the movement of scree-material. Reprinted from *Quarter. J. Geol. Soc.* 44: 825-826. In *Slope Morphology*, 1973, *Benchmark Papers in Geology*, Edited by STANLEY A. SCHUM and M. PAUL MOSLEY, Dowden, Hutchinson & Ross, Inc. Stroudsburg, Pennsylvania: 337-338.
- DE BEAULIEU J.-L., 1977**, *Contribution pollenalytique à l'histoire tardiglaciaire de la végétation des Alpes méridionales françaises*, Thèse Aix Marseille 3, 358 p.
- DE BEAULIEU J.L., DAVID F., 1995**, Histoire des végétations forestières dans les Alpes depuis la glaciation, *Forestier* 25, supplément, *Rencontres européennes, La forêt dans l'espace montagnard, vers un nouvel équilibre ?* Grenoble 5-7 avril 1994: 1-3.
- DEBELMAS J., 1970**, *Les Alpes du Dauphiné*, Coll Guides Géologiques Régionaux, Paris, Masson, 198 p.
- DECONCHAT M., BALENT G., 1998a**, Biodiversité et forêt dans un paysage agricole, Etude bibliographique, INRA, *Et. Rech. Syst. Agraires Dév.* 29: 15-36.
- DECONCHAT M., BALENT G., VIEBAN S., LAUGA-REYREL F., 1998b**, Relations entre biodiversité et exploitation forestière: bases pour une méthode d'analyse, *Revue Forestière Française*, 2: 159-167.
- DELCROS P., 1993**, *Ecologie du paysage et dynamique végétale post-culturale*, Cemagref, collection Etude Gestion des Territoires, n°13, 334 p.
- DELETRAZ G., 1997**, *L'impact des aménagements sur la dynamique de la cembraie de la station de La Plagne. Elaboration d'un SIG en vue d'une gestion environnementale*, Mémoire de DEA, IGA, Univ. Joseph Fourier, Grenoble 1, 206p.
- DELLION F., 1986**, *Morphologie des corniches et des éboulis actifs dans le massif des Cerces-Grand-Galibier (Alpes du Briançonnais)*, Mémoire de Maîtrise, Paris X, 142 p.
- DERRUAU M., 1974**, *Précis de géomorphologie*, Paris, Masson, 453 p.
- DESPLANQUE C., 1997**, *Dendroécologie comparée du sapin et de l'épicéa dans les Alpes internes franco-italiennes. Rôle des facteurs climatiques et anthropiques sur leur répartition*, Thèse de doctorat, Grenoble 1, 204 p.
- DIAZ S., CABIDO M., 1997**, Plant functional types and ecosystem function in relation to global change, *Journal of Vegetation Science* 8: 463-474.
- DI CASTRI F., HANSEN A.J., 1992**, *The environment and development crises as determinants of landscape dynamics*, in HANSEN A.J., DI CASTRI F. (eds.) *Landscape boundaries. Consequences for biotic diversity and ecological flows*, Springer Verlag, New-York: 3-18.

- DIDIER L., BRUN J.-J., 1997**, La cartographie phyto-morphologique, un outil d'analyse structurelle et fonctionnelle de la dynamique des lisières forestières subalpines, Colloque en l'honneur des professeurs P. Ozenda et B. Souchier, *Végétations et sols de montagnes. Diversité, fonctionnement et évolution*, Grenoble, 8-13 juillet 1996. *Écologie*, 29 (1).
- DIDIER L., BRUN J.-J., 1998a**, Limite supraforestière et changements environnementaux: pour une approche pluriscalaire et spatialisée des écosystèmes d'altitude, *Géographie Physique et Quaternaire* 52 (2): 245-253.
- DIDIER L., BRUN J.-J., 1998b**, La cartographie phyto-morphologique, un outil d'analyse structurelle et fonctionnelle de l'écotone supraforestier, *Ecologie* 29 (1-2): 283-288.
- DOLLFUS O., 1982**, L'écologie est morte, vive l'écologie ! *Hérodote* 26: 23-39.
- DRUART P., 1999**, Contribution à l'inventaire de la flore de Chartreuse, *Gentiana, Société botanique dauphinoise D Villars*, Bull n° 8: 14-30.
- DUBOURDIEU J., MORTIER F., HERMELINE M., 1995**, Biodiversité et gestion des forêts publiques en France: du concept à la pratique, *Revue Forestière Française*, n°3: 223-229.
- DUCLOS J.-C., MALLEM M., 1998**, Transhumance et biodiversité: du passé au présent. *Revue de Géographie Alpine*, n°4, Tome 86 "Patrimoine, montagne et biodiversité", 153 p.
- DUMAS B., RAFFY J., 1991**, Déplacement de débris grossiers par le ruissellement et la reptation de surface des versants des Alpes françaises du Sud, *Z. Geomorph. N.F., Suppl -Bd 83*: 251-259.
- DYLIK J., 1964**, The essentials of the meaning of the term of « periglacial », In The 20 th International Geographical Congress, United Kingdom, *Bulletin de la Société des Sciences et des Lettres de LÓDZ*, Vol. XV, 2: 1-19.
- DYLIKOWA A., 1962**, Notion et terme « périglaciaire », *Biuletyn Peryglacjalny*, n°11: 149-163.
- EAMUS D., JARVIS P.G., 1989**, The direct effects of increase in the global atmospheric CO2 concentration on natural and commercial temperature trees and forests, *Advances in Ecological Research*, 19: 1-55.
- EDOUARD J.L., 1978**, *La glaciation du bassin de la Romanche. Contribution à l'étude des fluctuations glaciaires post-würmiennes*, Thèse de 3^{ème} cycle, Grenoble, 329 p.
- EDOUARD J.L., 1989**, Lacs d'altitude et fluctuations glaciaires récentes en Maurienne, Parc National de la Vanoise, *Travaux scientifiques du Parc National de la Vanoise*, 17: 47-61.
- ERHART H., 1967**, *La genèse des sols en tant que phénomène géologique*, Paris, masson.
- EVAN S.G., CLAGUE J.J., 1994**, Recent climatic change and catastrophic geomorphic processes in mountain environments, *Geomorphology* 10: 107-128.
- EYBERGEN F.A., IMESON A.C., 1989**, Geomorphological processes and climatic change, *Catena*, 16: 307-319.
- EYNARD-MACHET R., 1993**, Anciens cadastres et évolution des paysages. Cartographie historique de l'occupation des sols dans les Alpes de Savoie (France), *Revue de Géographie Alpine* 80: 51-67.
- FAURIE C. et al., 2003**, *Ecologie : Approche scientifique et pratique*, 5^{ème} Ed., Tec et Doc, Paris, 407 p.
- FAVARGER C., ROBERT P.A., 1995**, *Flore et végétation des Alpes, tome II, l'étage subalpin*, 3^o édition, Delachaux et Niestlé, Paris, 239p.
- FELTGEN-DIDIER L., 1998**, *La limite supraforestière dans les Alpes: un nouveau regard sur sa structure et sa dynamique, à la lumière des successions post-pastorales et grâce à la théorie de la hiérarchie. L'exemple des gorges houillères en moyenne Maurienne, dans les Alpes françaises du Nord*, Tomes 1 et 2, Thèse de Doctorat en biologie, Université Joseph Fourier, Grenoble 1, 363 p.
- FENELON J.-P., 1981**, *Qu'est ce que l'analyse de données ?* Paris, LEFONEN, 312 p.
- FEODOROFF A., 1965**, Mécanisme de l'érosion par la pluie, *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique* (2), Vol. VII, Fasc. 2: 149-163.
- FIENLEY J.R., 1979**, The late quaternary vegetational history of the equatorial mountains, *Progress in Physical Geography*, 3: 488-509.

- FISHER F.J.F., 1952**, Observations on the vegetation of screes in Canterbury, New Zealand, *J. Ecol.*, 40: 156-167.
- FITTER R., FITTER A., BLAMEY M., 1993**, *Guide des fleurs sauvages*, Paris, Delachaux et Niestlé, 335 p.
- FORMAN R.T.T., GODRON M., 1986**, *Landscape ecology*. J. WILEY and sons eds. New-York, 619 p.
- FORTIN M.-J., PAYETTE S., MARINEAU K., 1999**, Spatial vegetation diversity index along a postfire successional gradient in the northern boreal forest, *Ecoscience*, 6 (2): 204-213.
- FOURNIER J., 1985**, *Contribution à l'étude des Alpes intermédiaires françaises: la moyenne Maurienne, Bioclimatologie, groupements végétaux forestiers et impacts humains*, Thèse de doctorat, écologie, Grenoble 1, 88 p.
- FOURNIER P., 1977**, *Les quatre flores de la France, Corse comprise (générale, alpins, méditerranéenne, littorale)*. 2^e édition, Lechevallier, Paris, 2 tomes: 1106 et 308 p.
- FRANCOU B., 1977**, Formes d'éboulis élevés en Briançonnais, *Revue de Géographie Alpine*, 75: 63-79.
- FRANCOU B., 1981**, *Géodynamique des éboulis et formes associées de la Combe de Laurichard (Hautes Alpes)*. Thèse de 3^{ème} cycle, Grenoble, non publiée, 153 p.
- FRANCOU B., 1982**, Chute de pierres et éboulisation dans les parois de l'étage périglaciaire, *Rev. De Géogr. Alpine*, LXX, 3: 279-300.
- FRANCOU B., 1983**, Géodynamique des dépôts de pied de paroi dans l'étage périglaciaire, *Revue de Géologie dynamique et de Géographie physique*, 5: 411-424.
- FRANCOU B., 1988**, *L'éboulisation en haute montagne*, Thèse de doctorat d'état en Géographie, 2 tomes, Université de Paris VII, Caen, Editec, 684 p.
- FRANCOU B., HETU B., 1989**, Eboulis et autres formations de pentes hétérométriques. Contribution à une terminologie géomorphologique. *Notes et comptes-rendus du groupe de travail «Régionalisation du Périglaciaire»*, Caen, Fasc. XIV, CNRS: 11-69.
- FRANCOU B., MANTE C., 1990**, Analysis of the segmentation in the profile of alpine talus slopes, *Permafrost and Periglacial Processes*, 1: 53-60.
- FRANCOU B., 1991**, Pentas, granulométrie et mobilité des matériaux le long d'un talus d'éboulis en milieu alpin, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2: 175-186.
- FREI C., CHRISTENSEN J. H., DEQUE M., JACOB D., JONES R. G., VIDALE P. L., 2003**, Daily precipitation statistics in regional climate models: Evaluation and intercomparison for the European Alps, *J. Geophys. Res.*, 108 (D3), 4124 : 1-19.
- FREY E., 1922**, *Die Vegetationsverhältnisse der Grimselgegend ein Gebiet der zukünftigen Stauseen ein Beitrag der Besiedlungsweise von Kalkarmen Silikattfels und Silikatschuttböden mit einer Vegetationskarte*, 9 Tafeln mit 12 Abbildungen, 2 Profiltafeln und 5 Textfiguren, Bern.
- FROMARD F., 1978**, *Recherches sur la dynamique de la végétation des milieux supraforestiers pyrénéens: la vallée de Soulcem, Haute Ariège*, Thèse de 3^{ème} cycle, Univ. P. Sabatier, Toulouse, 156 p.
- FRONTIER S., 1983a**, *Stratégies d'échantillonnage en écologie*, Masson, Collection d'écologie 17, 494 p.
- FRONTIER S. 1983b**, *Choix et contraintes de l'échantillonnage écologique*, in *Stratégies d'échantillonnage en écologie*, Masson, Collection d'écologie 17: 15-6.
- FRONTIER S., PICHOD-VIALE D., 1998**, *Ecosystèmes: Structure, Fonctionnement, Evolution*, Dunod, 2^{ème} Edition, 447 p.
- GALLANDAT J.D., GILLET F., HAVICEK E., PERRENOUD A., 1995**, *Patubois, typologie et systématique phytoécologique des pâturages boisés du Jura suisse*, Université de Neuchâtel, Institut de botanique, Laboratoire d'écologie végétale et de phytosociologie, 438 p.
- GARBUTT K., BAZZAZ F.A., 1984**, The effects of elevated CO₂ on plants. Flower, fruit and seed production and abortion, *New phytologist*, 97: 433-446.
- GARDNER J., 1969**, Observations of surficial talus movement, *Z. Geomorph.* 13: 317-323.
- GARDNER J., 1970**, A note on the supply of material to debris slopes, *Can. Geogr.* 14: 369-372.
- GARDNER J., 1972**, Morphology and sediment characteristics of mountain debris slopes in the Lake Louise district, *Z. Geomorph.* 15: 390-402.

- GARDNER J., 1977**, High magnitude rockfall-rockslide: frequency and geomorphic significance in the Highwood Pass Area, Alberta, *Rocky Mountain Geographical Journal*, 6: 228-238.
- GARDNER J., 1979**, The movement of material on debris slopes in the Canadian Rocky mountains, *Z. Geomorph.* 23: 45-57.
- GARDNER J., 1980**, Frequency, magnitude, and spatial distribution of mountain rockfalls and rockslides in the Highwood Pass area, Alberta, Canada, In COATES D.R., VIEK J.D. (eds.): *Thresholds in Geomorphology*: 267-295. G. ALLEN & Unwin, London.
- GARDNER J.S., 1983**, Rockfall frequency and distribution in the Highwood Pass area, Canadian Rocky Mountains, *Z. Geomorph.* 27: 311-324.
- GAUQUELIN T., 1982**, *Végétation et dynamique des formations superficielles sur les montagnes du bassin occidental de la Méditerranée*, Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Toulouse, 145 p.
- GEAR, A.J., HUNTLEY B., 1991**, Rapid changes in the range limits of Scots Pine 4,000 years ago, *Science*, 251: 544-547.
- GEHU J.-M., GEHU F. J., 1981**, *Evolution des près salés nord-armoricains sous l'impact de la marée noire*, In Amoco Cadiz, Conséquence d'une pollution accidentelle pour les hydrocarbures : 443-453.
- GEORGE P. (dir), 1970**, *Dictionnaire de la Géographie*, Paris, P.U.F., 1^{ère} éd., 448 p.
- GERVAISE M., 1997**, *La gélifraction des corniches de calcaires urgonien dans le massif de la Chartreuse. Aspects actuels et depuis le post-glaciaire: l'exemple de l'Aulp du Seuil (1800 m)*, Mémoire de Maîtrise, Grenoble, Institut de Géographie Alpine, 146 p.
- GILLET F. 2000**, *La phytosociologie synusiale intégrée, guide méthodologique*, Documents du Laboratoire d'Ecologie Végétale et de Phytosociologie, Document 1, Université de Neuchâtel, Institut de Botanique, 68 p.
- GIRARD M., BINTZ P., BOCQUET A., 1981**, La végétation et les climats au Tardiglaciaire et à l'Holocène en Savoie d'après l'étude pollinique des grottes de Saint-Thibaud-de-Couz, *Bull. A.F.E.Q.* 6: 89-106.
- Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), 2001**, *Bilan 2001 des changements climatiques: les éléments scientifiques*, Rapport du Groupe de travail I, 97 p.
- GOETZE D., SCHWABE A., 2000**, Linking ecosystem mosaics and biodiversity concepts by means of sigmasociology, Actes du colloque "Données de la Phytosociologie sigmatiste", Bailleul 1997, Colloques Phytosociologiques, XXVII: 789-812.
- GOSSELIN M., LAROUSSINIE O. (eds), 2004**, *Biodiversité et gestion forestière. Connaître pour préserver*. Synthèse bibliographique et premières recommandations, Coll. Etudes du Cemagref, Série Gestion des Territoires, Cemagref Editions, Antony, 20, 416 p.
- GOSZ J.R., 1993**, Ecotones herarchies, *Ecological applications* 3 (3): 369-376.
- GOUNOT M., 1969**, *Méthodes d'étude quantitative de la végétation*, Masson Paris, 314 p.
- GRAUMLICH L.J., KEIFER M.B., 1994**, A 1000-year record of climatic change and population dynamics in the Sierra Nevada, California, USA, in BENISTON M. (Ed.) *Mountain environments in changing climates*, proceedings of an international conference, 11-16 oct. 1992, Davos, Switzerland, Routledge Publishing Co., London.
- GRIFFITHS J.C., 1959**, Size and shape of rock fragments in Tuscarora scree, Fishing Creek, Lamar, Central Pennsylvania, *Journal of Sedimentary Petrology*, 29 (3), 391-401.
- GROUPE CHADULE, 1994**, *Initiation aux pratiques statistiques en géographie*, Paris, Masson, 203 p.
- GROVE J.M., 1972**, The incidence of landslides, avalanches and floods in Western Norway during the Little Ice Age, *Arctic and Alpine Research*, 4 (2): 131-138.
- GUIBAN A., HOLTEN J.I., SPICHIGER R., TESSIER L., (eds) 1995a**, *Potential ecological impacts of climate change in the Alps an Fennoscandian mountains*, Ed. Conserv. Jard. Bot. Genève, publication hors série 8, 194 p.
- GUIBAN A., TESSIER L., HOLTEN J.I., HAEBERLI W., BAUMGARTNER M., 1995b**, Understanding the impact of climate change on mountain ecosystems: an overview, in GUIBAN et al. (eds) *Potential ecological impacts of climate change in the Alps an Fennoscandian mountains*, Ed. Conserv. Jard. Bot. Genève: 15-37.

- GUIBAN A., THEURILLAT J.P., SPICHIGER R., 1995c**, Effects of climate change on alpine plant diversity and distribution: the modelling and monitoring perspectives, in GUIBAN *et al.* (eds) *Potential ecological impacts of climate change in the Alps and Fennoscandian mountains*, Ed. Conserv. Jard. Bot. Genève: 129-135.
- GUYOT G., 1997**, *Climatologie de l'environnement. De la plante aux écosystèmes*, Paris, Masson, 505 p.
- HAEBERLI W., 1992**, Possible Effects of Climatic Change on the Evolution of Alpine Permafrost, *Catena*, Suppl. 22: 23-35.
- HAEBERLI W., GUODONG C., GORBUNOV A.P., HARRIS S.A., 1993**, Mountain Permafrost and climatic change, *Permafrost and Periglacial Processes*, 4: 165-174.
- HAEBERLI W., 1995**, Climate impacts on glaciers and permafrost change, in GUIBAN *et al.* (eds) 1995, *Potential ecological impacts of climate change in the Alps and Fennoscandian mountains*, Ed. Conserv. Jard. Bot. Genève: 97-103.
- HAEBERLY W., BENISTON M., 1998**, Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps, *Ambio* 27: 258-265.
- HALLOY S. R. P., MARK A. F., 2003**, Climate-change effects on alpine plant biodiversity: a New Zealand perspective on quantifying the threat, *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 35 (2): 248-254.
- HAMELIN L.E., 1958**, Le talus oriental d'éboulis de l'Aiguille Rouse (Alpes Occidentales), *Revue de Géographie Alpine*, 46: 429-439.
- HAMELIN L.E. et COOK F.A., 1967**, *Le périglaciaire par l'image*, Presses de l'Université Laval, Québec, 237 p.
- HANG R., 1994**, *Analyse spatio-temporelle des précipitations et des températures au pas de temps annuel et mensuel au cours des dernières décennies dans les Alpes françaises du Nord*, Mémoire de Maîtrise, Géographie, Institut de Géographie Alpine, Université de Grenoble 1, 204 p.
- HANSEN J., JOHNSON D., LACIS A., LEBEDEFF S., LEE P., RIND D., RUSSELL G., 1981**, Climate impact of increasing atmospheric carbone dioxide, *Science*, 213: 957-966.
- HANSEN J., DI CASTRI F. (eds), 1992**, *Landscape boundaries. Consequences for biotic diversity and ecological flows*, *Ecological Studies* 92, 438 p.
- HANSEN A.J., RISSER P.G., DI CASTRI F., 1992**, Epilogue: biodiversity and ecological flows across ecotones, in HANSEN A.J., DI CASTRI F. (eds), *Landscape boundaries. Consequence for biotic diversity and ecological flows*, Springer-Verlag, New-York: 423-438.
- HANSEN J.E., JOHNSON D., LACIS A., LEBEDEFF S., LEE P., RIND D., RUSSEL G., 1981**, Climate impact of increasing atmospheric carbone dioxide, *Science*, 213: 957-966.
- HANSEN J.E., LACIS A., RIND D., RUSSEL G., STONE P., FUNG I., RUEDY R., LERNER J., 1984**, Climate sensitivity: analysis of feedback mechanisms, in HANSEN J.E., TAKAHASHI T. (eds.), *Climate processes and climates sensitivity*, Maurice Ewing, Series no. 5, American Geophysical Union, Washington DC.
- HANSEN-BRISTOW K.J., IVES J.D., WILSON J.P., 1988**, Climatic variability and tree response within the forest-alpine tundra ecotone, *Annals of the Association of American Geographers*, 78: 505-519.
- HARSHBERGER J.W., 1929**, *The vegetation of the screes, or talus slopes, of western North America*, Proceedings American Philosophical Society, 68: 13-26.
- HENGEVELD R., 1990**, Theories on species responses to variable climates, in BOER M., DE GROOT R.S. (eds) *Landscape ecological impact of climate change*, Proceedings of an European Conference, Lunteren, The Netherlands: 274-293.
- HERITIER K., 1996**, *Entre homogénéité et hétérogénéité, nature et société, la dynamique d'un paysage préalpin: l'exemple de la Haute Vallée de Gresse-en-Vercors*, Grenoble, IGA-UJF, Mémoire de Maîtrise, 138 p.
- HESTNES E., SANDERSEN F., 1987**, Slushflow activity in the Rana district, North Norway, *Norwegian Geotechnical Institute Report* 4 (19): 449-462.
- HETU B., 1986**, *L'influence du contexte géomorphologique quaternaire sur la dynamique postglaciaire des versants raides de la Gaspésie septentrionale*, Thèse de Phi. Doct., Université de Montréal, non publiée, 568 p.

- HETU B., VANDELAC P., 1989**, La dynamique des éboulis schisteux au cours de l'hiver, Gaspésie septentrionale, Québec, *Géographie Physique et Quaternaire* 43 (3): 389-406.
- HETU B., 1990**, Evolution récente d'un talus d'éboulis en milieu forestier, Gaspésie, Québec, *Géographie Physique et Quaternaire* 44 (2): 199-215.
- HETU B., VAN STEIJN H., VANDELAC P., 1994**, Les coulées de pierres glacées: un nouveau type de coulées de pierraille sur les talus d'éboulis, *Géographie Physique et Quaternaire* 48 (1): 3-22.
- HETU B., GRAY J.T., 2000**, Effects of environmental change on scree slope development throughout the postglacial period in the Chic-Choc Mountains in the northern Gaspé Peninsula, Québec, *Geomorphology*, 32: 335-355.
- HILL M.O., 1973**, Diversity and evenness : a unifying notation and its consequences, *Ecology* 54 : 427-431.
- HOFER H.R., 1992**, Veränderungen in der vegetation von 14 Gipfeln des Berninagebietes zwischen 1905 und 1985, *Berichte des geobotanischen Institutes, Stiftung Rübél, Zürich*, 58: 39-54.
- HOLLAND M.M., 1988**, SCOPE/MAB technical consultations on landscape boundaries. Report of a SCOPE/MAB workshop on ecotones, in DI CASTRI F., HANSEN A.J., HOLLAND M.M. (eds), *A new look at ecotones*, Biology International, IUBS, Unesco MAB, SCOPE, special issue 17: 9-46.
- HOLTMEIER F.K., 1973**, Geocological aspects of timberlines in northern and central Europe, *Arctic and Alpine Research*, 5 (3): A45-A54.
- HOLTMEIER F.K., 1993**, Timberlines as indicators of climatic changes: problems and research needs, in FRENZEL B. (ed.) *Fluctuations of alpine and polar tree limits in the Holocene*, Fischer: 211-222.
- HOLTMEIER F.K., 1994**, How does the timberline respond to changing climate ? in BENISTON M. (ed.) *Mountain environment in changing climates*, proceedings of an international conference, 11-16 oct. 1992, Intermountain research Station, Utah, U.S., *INT-GTR* 309: 9-17.
- HOLZHAUSER H., 1995**, *Gletscherschwankungen innerhalb der letzten 3200 Jahre am Beispiel des Grossen Aletsch- und des Gornergletschers*, Neue Ergebnisse, Gletscher im ständigen Wandel, Jubiläums-Symposium der Schweizerischen Gletscherkommission 1933 Verbier (VS), Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, VDF: 101-112.
- HOUGHTON J.T., DING Y., GRIGGS D.J., NOGUER M., VAN DER LINDEN P.J., XIAOSU D. (eds), 2001**, Climate Change 2001: The scientific basis. *Contribution of working group I to the third assessment report of IPCC*, Cambridge University Press, Royaume Unis, 944p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001**, Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, *Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report*, Cambridge University Press, 1005 p.
- HUNTLEY B., 1991**, How plants respond to climate change: migration rates, individualism and the consequences for plant communities, *Ann. Bot.* 67 (1): 15-22.
- INNES J.L., 1985**, Lichenometric dating of debris-flow deposits on alpin colluvial fans in Southwest Norway, *Earth Surface Processes and Landforms*, 10: 519-524.
- ISELI M., SCHWEINGRUBER F.H., 1989**, Sichtbarmachen von Jahringen für dendrochronologische Untersuchungen, *Dendrochronologia*, 7: 145-157.
- JALUT G., 1974**, *Evolution de la végétation et variations climatiques durant les quinze derniers millénaires dans l'extrémité orientale des Pyrénées*, Thèse Sciences, Université Paul Sabatier, Toulouse, 181 p.
- JENIK J., 1992**, Ecotone and ecocline: two questionable concepts in ecology, *Ekologia*, 11 (3): 243-250.
- JOLLIVET M., al., 1992**, *Les passeurs de frontières*, Paris, Sciences de la nature, Sciences de la société, CNRS Editions, 559 p.

- JOLLIVET M., LEPART J., 1992**, *Hétérogénéité, diversité, complexité: nuances et convergences*, in JOLLIVET M. Ed. Sciences de la nature, Sciences de la Société, Les passeurs de frontières, CNRS Editions: 519-535.
- JOMELLI V., 1997**, *Géodynamique des dépôts d'avalanches: analyses morphométriques et sédimentologiques*, Thèse de doctorat, Paris 7, 252 p.
- JOMELLI V., 1999**, Quelques critères morphosédimentaires pour identifier les éboulis à avalanches dans les Alpes françaises, *Bull. Assoc. Fr. Péri.*, Vol. 6, n° XXIV: 3-10.
- JOMELLI V., FRANCOU B., 2000**, Comparing the characteristics of rockfall talus and snow avalanche landforms in an Alpine environment using a new methodological approach: Massif des Ecrins, French Alps, *Geomorphology*, 35: 181-192.
- JOMELLI V., 2000**, *Impacts des fluctuations climatiques enregistrées depuis le Petit Age Glaciaire sur les versants soumis aux processus nivo-pérglaciaires et aux mutations du pastoralisme: l'exemple des hautes vallées de l'Oisans (Alpes du Sud, France)*, Programme de Recherche "Interaction Nature-Société", 22 p.
- JOMELLI V., BERTRAN P., 2001**, Wet snow avalanche deposits in the French Alps: Structure and sedimentology, *Geogr. Ann.* 83 A (1-2): 15-28.
- JOMELLI V., 2002**, *Impact du Petit Age de Glace sur les versants soumis aux processus nivo-pérglaciaires et aux mutations du pastoralisme: L'exemple des Hautes vallées de l'Oisans (Massif des Ecrins, Alpes françaises)*, Programme de Recherche CNRS APN, 122 p.
- JOMELLI V., PECH P., CHOCHILLON C., BRUNSTEIN D., 2003**, Geomorphic variations of debris flows and recent climatic change in the french Alps, *Clim. Change*, 00: 1-26.
- JONES P.D., WIGLEY T.M., WRIGHT P.B., 1986**, Global temperature variations 1861-1984, *Nature*, 322: 430-434.
- JORDA M., 1993**, *Histoire des paléoenvironnements tardi et postglaciaires sud-alpins de moyenne altitude*. Essai de reconstitution cinématique, Géomorphologie et aménagement de la montagne, Hommage à P. Gabert, CNRS, Caen: 9-111.
- JORDA M., ROSIQUE T., 1994**, Le tardiglaciaire des Alpes françaises du Sud: rythme et modalités des changements bio-morphoclimatiques, *Quaternaire*, 5 (3-4):141-150.
- KARTE J., 1983**, Periglacial phenomena and their significance as climate and edaphic indicators, *Geo. Journal*, 7: 329-340.
- KAYSER B., 1983**, Morphodynamique pérglaciaire en Vanoise, Observations et mesure sur deux formes majeures: talus d'éboulis et glaciers rocheux. *Tr. Sc. Parc National de la Vanoise*, 13: 55-80.
- KAYSER B., 1987**, *Les versants de la Vanoise. Enjeux traditionnels et fonctionnement morphoclimatique*, Thèse, Paris, 2 vol., 425 et 639p.
- KELLER F., GOYETTE S., 2003**, Snow melt under the different temperature increase scenarios in the Swiss Alps. In JONG C., COLLINS D., RANZI R (eds), *Climate and hydrology in mountain areas*, UK: J Wiley (accepted).
- KELLER F., KÖRNER C., 2003**, The Role of Photoperiodisme in Alpine Plant Development, *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 35 (3): 361-368.
- KERKACHE R., 1996**, *Téledétection appliquée au diagnostic de l'enfrichement. Traitement de photographies aériennes pour l'Opération Locale des Chambarans (Isère)*, Mémoire de DEA, ADASEA de l'Isère, IGA, Univ. Joseph Fourier, 112 p.
- KERSHAW L.J., GARDNER J.S., 1986**, Vascular plants of mountain talus slopes, Mt. Rae area, Alberta, Canada, *Phys. Geogr.* 7: 218-230.
- KILIAN W., FLUSIN G., 1899**, *Observations sur les variations des glaciers dans les Alpes Dauphinoises*, Société des Touristes du Dauphiné, Grenoble, Imprimerie Allier Frères, 124 p.
- KING C. A. M., 1956**, *Scree profiles in Iceland*, 1st Rapport Comm. pour l'Etude Versants, Int. Geog. Union: 124-125.
- KIRKBY M.J., STATHAM I., 1975**, Surface stone movement and scree formation, *J. Geol.* 83: 349-362.

- KORNER C., COCHRANE P., 1983**, Influence of plant physiognomy on leaf temperature on clear midsummer days in the Snowy Mountains, south-eastern Australia, *Acta Oecologica, Oecol. Plant.* 4: 117-124.
- KÖRNER C., LARCHER W., 1988**, *Plant life in cold climates*, In LONG S.F. and WOODWARD F.I. (eds), *Plant and temperature*, The Company of Biologists Ltd, Cambridge.
- KÖRNER C., 1992**, Response of Alpine Vegetation to Global Climate Change, *Catena*, Suppl. 22: 85-96.
- KÖRNER C., 1994**, *Impact of atmospheric changes on high mountain vegetation*, Mountain Environments in Changing Climates, M. Beniston, (ed.), Routledge Publishing Company, London and New York, 155-166.
- KÖRNER Ch., 1995**, Impact of atmospheric changes on alpine vegetation: the ecophysiological perspective, in **GUISAN A., HOLTEN J.I., SPICHIGER R., TESSIER L., (eds) 1995a**, *Potential ecological impacts of climate change in the Alps and Fennoscandian mountains*, Ed ; Conserv. Jard. Bot. Genève, publication hors série 8, 194 p.
- KÖRNER Ch., PAULSEN J., et PELAEZ-RIEDL S., 2003**, A bioclimatic characterisation of Europe's alpine areas, *Ecological Studies*, 167: 13-28.
- KOUACI K., 1962**, *Végétation du rebord oriental de la Chartreuse*, Grenoble, Laboratoire de Biologie Végétale, Tome I, DES d'Ecologie, 80 p.
- KUDO G., 1991**, Effects of snow-free period on the phenology of alpine plants inhabiting snow patches, *Arctic and Alpine Research*, 23 (4): 436-443.
- LACHIVER M., 1997**, *Dictionnaire du monde rural*, Les mots du passé, Ed Fayard, 1709 p.
- LAFORTUNE M., FILION L., HETU B., 1997**, Dynamique d'un front forestier sur un talus d'éboulis actif en climat tempéré froid (Gaspésie, Québec), *Géographie physique et Quaternaire*, 51 (1): 67-80.
- LAHOUSSE P., 1994**, *Rythme géomorphologique et cartographie dans la vallée de la Guisane, Hautes-Alpes, Briançonnais*, Thèse de 3^{ème} cycle, Lille, 431 p.
- LAHOUSSE P., 1996**, L'instabilité actuelle des versants dans la vallée de la Guisane, Hautes Alpes, Briançonnais, *Géomorphologie*, 4: 21-36.
- LAMARCHE V.C. Jr, MOONEY H.A., 1972**, Recent climatic change and development of the bristlecone pine (*P. longaeva* Bailey) krummholz zone, Mt Washington, Nevada, *Arctic and Alpine Research*, 4 (1): 61-72.
- LAMB H.H., 1977**, *Climate, present, past and future*. London Methuen, 835 p.
- LARCHER W., 1995**, *Physiological plant ecology. Ecophysiology and stress physiology of functional groups*, Springer, 506 p.
- LAUBER K., et WAGNER G., 2000**, *Flora Helvetica. Flore illustrée de Suisse*, Paris, Belin, 1616 p.
- LAURENT C., 2005**, *Dynamique végétale d'un talus d'éboulis dans le contexte environnemental récent (Tablier de La Plagne, massif de la Grande Chartreuse)*, Mémoire de MASTER II « Evaluation et Gestion de l'Environnement et des Paysages de Montagne », Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble 1, 73 p.
- LAURENT C., 2004**, *La colonisation ligneuse d'un tablier d'éboulis dans le contexte climatique récent: applications dendrochronologique et dendroécologique. La Plagne, massif de la Grande Chartreuse, Préalpes françaises du Nord*, Mémoire de Maîtrise, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble 1, 120 p.
- LAVOIE C., et PAYETTE S., 1992**, Black spruce growth form as a record of changing winter environment at treeline, Quebec, Canada, *Arctic and Alpine Research*, 24 (1): 40-49.
- LEACH W., 1930**, A preliminary account of the vegetation of some noncalcareous British scree (Gerölle), *J. Ecol.* 18: 321-332.
- LEE W.G., HEWITT A.E., 1982**, Soil changes associated with development of vegetation on an ultramafic scree, north-west Otago, New Zealand, *J. R. Soc. N. Z.* 12: 229-241.
- LEFEUVRE J.C., 1992**, *Biodiversité et territoires agricoles*, Economie Rurale, n°208-209: 79-84.
- LEROY LADURIE E., 1967**, *Histoire du climat depuis l'an mil*. Flammarion, Paris, 376 p.
- LEUFEUVRE J.-C., BARNAUD G., 1988**, Ecologie du paysage: mythe ou réalité? *Bulletin d'Ecologie*, 19 (4): 493-522.

- LEVEQUE C., 1994**, Le concept de biodiversité: de nouveaux regards sur la nature, *Natures-Sciences-Sociétés*, 3 (2): 243-25.
- LEVEQUE (C.), 1998**, La biodiversité: un avis d'écologue, *Natures-Sciences-Sociétés*, 6 (1): 37-40.
- LIVRE ROUGE DE LA FLORE MENACEE DE FRANCE., 1995**, *Tome I: espèces prioritaires*, Paris, Ministère de l'Environnement, Collection Patrimoines Naturels, Série patrimoine génétique, n° 20, 486 p.
- LOUGHRAN R. J., LOUGHRAN A. I., 1979**, Stone chute development on a limestone scree, *Earth Surf. Proc.* 4: 191-197.
- LUCKMAN B.H., 1978**, Geomorphic work of snow avalanches in the Canadian Rocky Mountains, *Arctic and Alpine Research*, 2: 261-276.
- LUCKMAN B.H., 1978**, The measurement of debris movement on alpine talus slopes, *Z. Geomorph. Suppl.* 29: 117-129.
- LUCKMAN B. H., 1988**, Debris accumulation patterns on talus slopes in Surprise Valley, Alberta, *Géographie Physique et Quaternaire*, 42 (3): 247-278.
- LUCKMAN B., 1992**, Debris flows and snow avalanche landforms in the Lairig Ghru Cairngorm Mountains, Scotland, *Geografiska Annaler*, 74 A: 109-121.
- LÜDI W., 1925**, *Die pflanzengesellschaften des Lauterbrunnentales und ihre Sukzession. Versuch zur Gliederung der Vegetation eines Alpentes nach generisch-dynamischen Gesichtspunkten.* Der Berichten der Schweizerischen Botanischen Gesellschaft Heft XXX: 1-364 mit 4 Vegetationsbildern, 2 Vegetationskarten 1: 50 000 und mehreren Sukzessionstafeln. Beiträge zur Geobotanischen Landesaufnahme 9, Zurich, 1192 p.
- LUGINBÜHL Y., MUXART T., 1998**, Place de la géographie dans les recherches sur l'environnement, *Lettre Pirens*, 7: 44-63.
- MAGNY M., 1994**, Holocene climatic oscillations in Jura and Alps: oceanic and solar forcing? *C. R. Acad. Sc.* 319-667.
- MAGNY M., 1995**, *Une histoire du climat. Des derniers mammoths au siècle de l'automobile.* Errance (ed.), Paris, 176 p.
- MAISCH M., 1994**, How fast will the alpine glaciers disappear? In BENISTON M. (ed.), *Mountain environments in changing climates*, proceedings of an international conference, 11-16 oct. 1992, Davos, Switzerland, Rotledge Publishing Co., London.
- MALAUURIE J., 1960**, Gélifraction, éboulis et ruissellement sur la côte nord-ouest du Groenland, *Z. Geomorph., Suppl.* 1: 59-68.
- MALAUURIE J., 1968**, Thèmes de recherche géomorphologique dans le Nord-Ouest du Groënland, *Mémoires et documents, N° Hors-série*, Paris, CNRS, 481 p.
- MALEVAL V., ASTRADE L., 2003**, Le modelage d'une cuvette lacustre artificielle après son remplissage: quantification et chronologie de l'érosion des rives du lac de Saint-Pelloux, Limousin (France), *Revue de Géographie Alpine*, 1.
- MANN M.E., BRADLEY R.S., HUGHES M.K., 1999**, Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries, *Nature*, 392: 779-787.
- MARCEAU J. D., 1999**, Th escale issue in social and natural sciences, *Canadian Journal of Remote Sens.* 25 (4): 347-356.
- MARTIN B., 1999**, *Contribution à l'étude des paysages bocagers de montagne: structure et dynamique spatiale, diversité écologique et gestion d'un patrimoine rural. L'exemple du Champsaur (Hautes-Alpes, France)*, Thèse de Doctorat, IGA, Univ. Joseph Fourier, Grenoble 1, 320 p.
- MARTIN E., DURAND Y., 1998**, Precipitation and snow cover variability in the French Alps. In BENISTON M., INNES J-L. (eds), *The impact of climate change on forest*, Heidelberg, New York, Springer: 81-92.
- MATTHEWS J.A., Mc CAROLL D., 1994**, Snow avalanche impact Landforms in Breheimen, Southern Norway, Origin, age and paleoclimatic implications, *Arctic and Alpine Research*, 26: 103-115.
- MAC ARTHUR R.H., 1972**, *Geographical Ecology*, Harper and Row, New York.

- Mc CARROLL D., 1993**, Modelling late Holocene snow avalanche activity: incorporating a new approach to lichenometry, *Earth Surface Processes and Landforms*, 18: 527-539.
- Mc CARROLL D., MATTHEWS J.A., HAKESBY R.A., 1995**, Late Holocene snow-avalanche activity in Southern Norway: interpreting lichen size-frequency distributions using an alternative to simulation modelling, *Earth Surface Processes and Landforms*, 20: 465-471.
- McCUNE B., 1977**, Vegetation development on a low elevation talus slope in western Montana, *Northwest Science*, 51: 198-207.
- MAC DOWELL F.D.H., 1972**, Growth of Marquis wheat. II. Carbon dioxide dependence, *Canadian Journal of Botany*, 62: 9-14.
- MICHAUD J., 1950**, Emploi des marques dans l'étude des mouvements du sol, *Rev. Géomorph. Dynam.* 1: 180-189.
- MICHAUD J., CAILLEUX A., 1950**, Vitesses des mouvements du sol au Chambeyron (Basses Alpes), *C. R. Séances Acad. Sci., Paris*, 230: 314-315.
- MITCHEL J.M., Jr., 1977**, The changing climate, in Geophysics Study Committee (ed.), *Energy and climate*, National Academy of Science, Studies in Geophysics, Washington DC: 51-58.
- MOIROUD A., GONNET J.F., 1977**, *Jardins de glaciers*, éd. Allier, Grenoble, 127 p.
- MOLAU U., 1993**, Relationships between flowering phenology and life history strategies in tundra plants, *Arctic and Alpine Research*, 25: 391-402.
- MOUGIN P., 1910**, *Etudes glaciologiques*, t. 1, Paris, Direction Générale des Eaux et Forêts, Service des forces hydrauliques, Imprimerie Nationale.
- MOUGIN P., 1934**, *Etudes glaciologiques*, t. 6 et 7, Paris, Ministère de l'Agriculture, Imprimerie Nationale.
- MUSSELMAN R.C., (ed.), 1994**, The glacier lakes ecosystems experiment site, *USDA General Technical Report RM-249*, Fort Collins, Colorado, USA, 94 p.
- MUXART T., 1978**, Note sur l'agressivité potentielle des eaux de percolation de différents sols dans le Vercors, en fonction de la couverture végétale, *Revue de Géographie Alpine*, 66: 173-181.
- MYNENI RB., KEELING C., TUCKER CJ., ASARAR G., NEMANI RR., 1997**, Increased plant growth in the northern latitudes from 1981 to 1991, *Nature*, 386: 698-701.
- NAVEH Z., 1982**, Landscape ecology as an emerging branch of human ecosystem, *Science, Adv. Ecol. Res.*: 189-247.
- NEGRE R., 1968**, La végétation du bassin de l'One - Rochers et éboulis, *Portugaliae Acta Biologica*, 9 (3-4): 196-290.
- NIEUWENHUIZEN M.E., VAN STEIJN H., 1990**, Alpine debris flows and their sedimentary properties. A case study from the French Alps, *Permafrost and Periglacial Processes*, 1: 111-128.
- NOBLE F., 1985**, *Contribution à l'étude des formations superficielles des espaces supraforestiers oriento-pyrénéens*, Thèse de 3^{ème} cycle, Université Toulouse III, 292 p.
- NYBERG R., LINDH L., 1990**, Geomorphic features as indicators of climatic fluctuations in a periglacial environment, Northern Sweden, *Geografiska Annaler*, 72A (2): 203-210.
- NYBERG R., RAPP A., 1998**, Extreme erosional events and natural hazards in Scandinavian Mountains, *Ambio*, 27: 292-299.
- OETLI M., 1905**, *Beiträge zur Ökologie der Felsflora Untersuchungen aus dem Curfirsten und Sentisgebiet*, Botanische Exkursionen und pflanzengeographische Studien in der Schweiz, Heft III mit 4 Tafeln, Zurich: 1-171.
- OOSTWOOD WIJENES D.J., ERGENZINGER P., 1997**, Rainfall simulations and soil temperature measurements at steep marly slopes in the Draix Experimental Research Basin, Actes du séminaire "Les bassins versants expérimentaux de Draix, Laboratoire d'étude de l'érosion en montagne", Draix-le-Brusquet-Digne, 22-24 octobre 1997, Cemagref Editions, Antony: 143-154.
- OZENDA P., 1985**, *La végétation de la chaîne alpine dans l'espace montagnard européen*, Masson, 331 p.
- OZENDA P., BOREL J.L., 1991**, *Les conséquences écologiques possibles des changements climatiques dans l'arc alpin*, Rapport FUTURALP n°1, 49 p.

- OZENDA P., BOREL J.L., 1995**, Possible responses of mountain vegetation to a global climatic change: the case of Western Alps, in GUISSAN *et al.* (eds) *Potential ecological impacts of climate change in the Alps and Fennoscandian mountains*, Ed. Conserv. Jard. Bot. Genève: 137-144.
- PACHE G., AIME S., MICHALET R., 1996**, A simple model for the study of the altitudinal rainfall gradient applied to the tyrolian orographic complex, *Rev. Ecol. Alpine*, 3: 13-20.
- PACHE G., 1998**, *Les humus forestiers du massif de la Chartreuse: de l'approche macro-écologique à l'approche micro-écologique*, Thèse de 3^{ème} cycle, Université Joseph Fourier, Grenoble 1, 110 p.
- PAGNEY P., 1988**, *Les climats de la France*, Masson, Paris, 288 p.
- PANCZA A., 1979**, *Contribution à l'étude des formations périglaciaires dans le Jura*, Thèse de Doctorat, Université de Neuchâtel, Suisse, 187 p.
- PARIZEAU M.H., 1997**, *La biodiversité, tout conserver ou tout exploiter*, Paris, Bruxelles, Sciences Ethiques Sociétés, De Boeck Université, 214 p.
- PATUREL M., VALEROY S., 1997**, *Eléments pour la réalisation d'un Atlas Climatique de l'Isère*, Grenoble, IGA-UJF, Mémoire de Maîtrise, 195 p.
- PAWLOWSKI B., 1970**, Remarque sur l'endémisme dans la flore des Alpes et des Carpathes, *Vegetatio*, 21: 181-243.
- PAYETTE S., DESHAYE J., GILBERT H., 1982**, Tree seed populations at the treeline in Rivière aux Feuilles area, northern Québec, Canada, *Arctic and Alpine Research*, 14 (3): 215-221.
- PEARCY R.W., BJORKMAN O., 1983**, *Physiological effects in CO₂ and Plants. The response of Plants to Rising Levels of Atmospheric Carbon Dioxide*. Ed. E.R. Lemon, Westview Press, Boulder, USA, 65-105.
- PECH P., 1986**, Essais de quantification de l'ablation en moyenne et haute montagne à partir d'analyses volumétriques: l'exemple de l'Ossola (Alpes Centrales, Italie du Nord, 46° lat.N), *Rev. Géomorph. Dynam.* 35: 11-20.
- PECH P., 1991**, Végétation et processus morphogéniques périglaciaires à l'étage alpin du massif français du Dévoluy, *Notes et comptes-rendus du groupe de travail «Régionalisation du Périglaciaire»*, Fasc. XVI: 51-57.
- PECH P., 1993**, Groupements végétaux et processus morphogéniques sur des versants de haute montagne alpine (Val d'Ossola et Dévoluy), Actes du 116^{ème} Congrès National des Sociétés Savantes « *Sciences Naturelles et montagnes* », Editions du C.T.H.S., Paris: 161-171.
- PECH P., 1995b**, *La géodynamique des versants en haute montagne alpine – Approche des bilans qualitatifs et quantitatifs*, Thèse d'habilitation. Grenoble 1, 343 p.
- PECH P., 2000**, Mise en évidence du cône apical dans le déclenchement des coulées de débris alpines du Dévoluy (Hautes Alpes, France), *Bull. Assoc. Fr. Péri.* Vol 7, n° XXV: 65-67.
- PECH P., JOMELLI V., 2001**, Rôle du cône apical dans le déclenchement des coulées de débris alpines du massif du Dévoluy (Hautes Alpes, France), *Géographie Physique et Quaternaire*, 1: 47-61.
- PEREZ F.L., 1985**, Surficial talus movement in an Andean Paramo of Venezuela, *Geogr. Ann.* 67 A(3-4): 221-237.
- PEREZ F.L., 1986**, Talus texture and particle morphology in a North Andean paramo, *Z. Geomorph.* 30 (1): 15-34.
- PEREZ F.L., 1987**, Soil moisture and the upper altitudinal limit of giant paramo rosettes, *J. Biogeogr.* 14: 173-186.
- PEREZ F.L., 1988**, The movement of debris on a high Andean talus, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 32 (1): 77-99.
- PEREZ F.L., 1989**, Talus fabric and particle morphology on Lassen Peak, California, *Geogr. Ann.* 71 A (1-2): 43-57.
- PEREZ F.L., 1991**, Soil moisture and the distribution of giant Andean rosettes on talus slopes of a desert paramo, *Clim. Res.* 1: 217-231.

- PEREZ F.L., 1993**, Talus Movement in the High Equatorial Andes: A Synthesis of Ten Years of Data, *Permafrost and Periglacial Processes*, 4: 199-215.
- PEREZ F.L., 1994**, Geobotanical influence of talus movement on the distribution of caulescent Andean rosettes, *Flora*, 189: 353-371.
- PEREZ F.L., 1995**, A High-Andean toposequence: The geocology of caulescent paramo rosettes, *Mountain Research and Development*, 15 (2): 133-152.
- PEREZ F.L., 1998a**, Conservation of soil moisture by different stone covers on alpine talus slopes (Lassen, California), *Catena*, 33: 155-177.
- PEREZ F.L., 1998b**, Talus fabric, clast morphology, and botanical indicators of slopes processes on the Chaos Crags (California Cascades, USA), *Géographie Physique et Quaternaire*, 52 (1): 47-68.
- PETITCOLAS V., 1998**, *Dendroécologie comparée de l'épicéa, du mélèze, du pin cembro et du pin à crochets en limite supraforestière de la forêt dans les Alpes françaises: influence de la variabilité macro-écologique*. Thèse de doctorat, Grenoble 1, 233 p.
- PETIT-RENAUD G., 1990**, L'évolution récente du climat en France, *Revue de Géographie de Lyon*, 65 (2): 138-144.
- PETERS R.L. and DARLING J.D.S., 1985**, The greenhouse effect and nature reserves: global warming would diminish biological diversity by causing extinctions among reserve species, *Bioscience*, 35: 707-717.
- PICKETT S.T.A., WHITE P.S., 1985**, *The ecology of natural disturbance and patch dynamics*, Academic Press, New York, 472 p.
- PISSART A., 1964**, Vitesse des mouvements du sol au Chambeyron (Basses Alpes), *Biuletyn. Peryglacjalny*, 14: 303-309.
- PISSART A., 1972**, Vitesse des mouvements de pierres dans des sols et sur des versants périglaciaires au Chambeyron (Basses Alpes), *In Symposium international de Géomorphologie « Processus périglaciaires étudiés sur le terrain »*, Les congrès et colloques de l'Université de Liège, Université de Liège, 67: 251-268.
- PISSART A., SCHEPERS J.L., LAURANT A., 1981**, Etude statistique des déplacements de cailloux superficiels dans un milieu périglaciaire de haute montagne, la haute vallée du Chambeyron (Basses Alpes), *Rech. Géogr. Strasbourg*, 16-17: 137-142.
- PORTER S.C., OROMBELLI G., 1982**, Late-glacial ice advances in the Western Italian Alps, *Boreas*, 11: 125-140.
- POSSINGHAM H.P., 1993**, *Impact of elevated atmospheric CO₂ on biodiversity mechanistic population dynamic perspective*, 41: 11-21.
- POULIN L., 1994**, *Géomorphologie dynamique des versants en Chartreuse méridionale: l'exemple du sommet de Chamechaude (2082 m)*, Mémoire de Maîtrise, Grenoble, Institut de Géographie Alpine, 176 p.
- PRENTICE, I.C., BARTLEIN P.J., WEBB III T., 1991**, Vegetation and climate change in Eastern North America since the last glacial maximum, *Ecology*, 72: 2038-2052.
- PRICK A., 1999**, *Etude de la cryoclastie et de l'haloclastie par méthode dilatométrique*, Mémoire de la Classe des sciences, Académie Royale de Belgique, 3^{ème} Série, t. XIX, 311p.
- RAHN P.H., 1969**, The relationship between natural forested slopes and angles of repose for sand and gravel, *Geol. Soc. Am. Bull.* 80: 2123-2128.
- RAMEAU J.C., MANSION D., DUME G., 1993**, *Flore forestière française: guide écologique illustré », tome 2 « Montagnes »*, Paris, ENGREF, Institut pour le développement forestier, Ministère pour le développement de l'agriculture et de la pêche, 2421p.
- RAPP A., 1960a**, Litterature on slope denudation in Finland, Iceland, Norway, Spitsbergen and Sweden, *Z. Geomorph., Suppl.* 1: 33 -42.
- RAPP A., 1960b**, Recent development of mountain slopes in Kärkevagge and surrounding, Northern Scandinavia, *Geografiska Annaler*, 42A: 73-200.
- RAPP A., 1960c**, Talus slopes and mountain walls at Tempelfjorden, Spitsbergen. A Geomorphological study of the denudation of slopes in an Arctic locality. *Norsk Polarinst. Skr.* 119: 1-96 + 20 pl.

- RAPP A., 1986**, Slope process in high latitudes, *Progress in Physical Geography*, Edward Arnold, 1: 51-68.
- RATHGEBER C., ROCHE P., 2003**, Spatio-temporal growth dynamics of a subalpine *Pinus uncinata* stand in the French Alps, *C. R. Biologies* 326: 305-315.
- REBETEZ M., LUGON R., BAERISWYL P.A., 1997**, Climatic change and debris flows in high mountain regions: the case study of the Ritigraben Torrent (Swiss Alps), *Clim. Change*, 36: 371-389.
- RECORBET C., 1993**, *Elaboration de la carte géomorphologique du massif Septentrional de la Chartreuse* (1/25 000), Mémoire de Maîtrise, IGA, UJF, 167 p.
- REYNAUD L., 1999**, *La dynamique de quelques glaciers français depuis le siècle dernier*, Société Hydrotechnique de France, section glaciologie-nivologie, Grenoble.
- REYNAUD L. et VINCENT C., 2000**, Relevés de fluctuations sur quelques glaciers des Alpes françaises, *La Houille Blanche* 5: 79-86.
- RICHARD L., PAUTOU G., 1982**, *Alpes du Nord et Jura Méridional, Notice détaillée des feuilles, (48) Annecy (54) Grenoble*, Carte de la végétation de la France au 1: 200000, Paris, Editions du CNRS, 316 p.
- RIOUX J., QUEZEL P., 1949**, Contribution à l'étude des groupements rupicoles endémiques des Alpes maritimes, *Vegetatio* 2: 1-13.
- RISSER P.G., 1987**, Landscape ecology: state of the art, in TURNER M.G. (ed.), *Landscape heterogeneity and disturbance*, Ecological Studies, Springer, New York, 64: 3-14.
- RITTER J., MATTHIEU D., 1976**, Nouvelles remarques sur les relations entre les associations végétales et la géomorphologie, *Phytocoenologia*, 3: 375-424.
- ROBERT Y., 1997**, *Erosion et colonisation végétale dans les bad-lands marneux des Alpes du Sud: l'exemple du bassin du Saignon*, Mémoire de Maîtrise, IGA, Univ. Joseph Fourier, Grenoble 1, 135 p.
- ROBERT Y., CORONA C., ARQUES S., 2003**, *Cycles érosifs et bilans sédimentaires sur une ravine marneuse des Alpes de Haute Provence (bassin de Draix), Essai de modélisation selon les différentes unités fonctionnelles*. Communication et présentation d'un poster à la Journée Nationale des Jeunes Géomorphologues - Rennes, 29 mars 2003.
- ROGNON P., 1983**, Quelques crises climatiques des douze derniers millénaires, *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, Paris, 494: 145-155.
- ROLLAND C., CADEL G., SCHUELLER J., 1995**, Typologie forestière des pinèdes à crochets du Briançonnais et intérêt dendroécologique, *Ecologie*, 26 (4): 195-213.
- ROLLAND C., DESPLANQUE C., MICHALET R., 2000**, Extreme tree rings in spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and fir (*Abies alba* Mill.) stands in relation to climate, site, and space in the Southern French and Italian Alps, *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 32 (1): 1-13.
- ROMME, W.H., TURNER M.G., 1991**, Implications of global climate change for biogeographic patterns in the greater Yellowstone ecosystem, *Conserv. Biol.* 5: 373-386.
- ROSIQUE T., 1997**, Détritisme et morphogenèse à la fin du Würm dans les Alpes françaises méridionales, *Quaternaire*, 8 (1): 39-48.
- ROUGERIE G., 1960**, *Le façonnement actuel des modelés en Côte d'Ivoire forestière*, Thèse Lettres, Mémoires de l'I.F.A.N., Dakar, 542 p.
- ROUGERIE G., 1967**, *Biogéographie des montagnes*, C.D.U., S.E.D.E.S, Paris, 191 p.
- ROUGERIE G., BEROUTCHACHVILI N., 1991**, *Géosystèmes et paysages-Bilan et méthodes*, Paris, Armand Colin, 302 p.
- ROUTLEDGE R.D., 1979**, Diversity indices: wich ones are admissible? *Journal of Theoretical Biology* 76 : 503-515.
- ROVERA G., 1978**, *Biogéographie végétale des versants en Chartreuse centrale, orientale et septentrionale*, Grenoble, IGA-UJF, Mémoire de Maîtrise, 180 p.
- ROVERA G., 1990**, *Géomorphologie dynamique et aménagement des versants en moyenne Tarentaise (Savoie: communes de Granier, Aime, Mâcot-La Plagne et Champagny). Une contribution à l'étude de l'érosion naturelle et anthropique des Alpes*, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 465 p.

- ROVERA G., 1997**, L'ébouilisation des corniches de calcaire urgonien dans le massif de la Grande Chartreuse (Alpes du Nord), *Bull. Assoc. Fr. Péri.* Vol 4, XXII: 13-27.
- ROVERA G., 2001**, Quelle place pour le gel dans l'ablation des calcaires, calcaires schisteux et marno-calcaires dans les Alpes, *Bull. Assoc. Fr. Péri.*, Vol 8, n° XXVI: 25-38.
- ROVERA G., NATON H.-G., 2000**, Remplissage sédimentaires et rythmes de l'ébouilisation des blocs calcaires erratiques de l'Aulp du Seuil (massif de la Grande Chartreuse) : comparaison entre les caractéristiques tardiglaciaires, holocènes et actuelles, *Géologie Alpine*, Mém. H.S. 31 : 13-20.
- ROVERA G., ROBERT Y., 2005**, Conditions climatiques hivernales et processus d'érosion périglaciaires dans les bad-lands marneux de Draix (800 m, Alpes du Sud, France), *Géographie Physique et Quaternaire* (accepté mars 2005).
- ROVERA G., WLERICK L., CORONA C., 2003**, *Erosion et dynamique de la végétation sur gypse dans les Réserves biologiques domaniales du Petit Mont Blanc et de la Dent du Villard*, in Etude sur le gypse (collectif), Office National des Forêts, Parc National de la Vanoise, 1-14.
- RÜBEL E., 1912**, *Pflanzengeographische Monographie der Berninagebietes, Mit einer synökologischen Karte einer farbigen Kunstdruck*, 58 Vegetationsbildern und 20 Textfiguren, Leipzig, 615 p.
- SANDERS L., 1989**, *L'analyse statistique des données en géographie*, Reclus, 267 p.
- SCHEIDEGGER A.E., 1961**, Theory of rock movement on scree slopes, *J. Alberta Soc. Petrol. Geol.* 9: 131-140.
- SCHERRER B., 1983**, *Techniques de sondage en écologie*, in FRONTIER S., Stratégies d'échantillonnage en écologie, Masson, collection écologie 17: 63-162.
- SCLAFERT T., 1926**, *Le Haut-Dauphiné au Moyen Age*, Thèse de Doctorat ès Lettres, 765 p.
- SCHLYTER P., JÖNSSON P., NYBERG R., PERSSON P., RAPP P., JONASSON C., REHN J., 1993**, Geomorphic process studies related to climate change in Kärkevagge, Northern Sweden-status of current research, *Geografiska Annaler*, 75A, 1-2: 55-60.
- SCHROETER C., 1908**, *Das Pflanzenleben der Alpen. Eine Schilderung der Hochgebirgsflora*: 681- 738.
- SCHROETER C., 1925**, *Das Pflanzenleben der Alpen. Eine Schilderung der Hochgebirgsflora*, Zurich: 667-738.
- SCHUMM S., A., 1967**, Painted or marked rocks: On the movement of surface markers, *Rev. Géomorph. Dyn.* 17: 160.
- SCLAFFERT T., 1926**, *Le Haut-Dauphiné au Moyen Age*, Paris, Recueil Sirey, 765 p.
- SCOTT P.A., HANSELL R.I.C., FAYLE D.C.F., 1987**, Establishment of white spruce populations and responses to climate change at the treeline, Churchill, Manitoba, Canada, *Arctic and Alpine Research*, 19 (2): 45-51.
- SELBY M.J., 1982**, Controls on the stability and inclinations of hillslopes formed on hard rock, *Earth Surf. Processes and Landf.* 7: 449-467.
- SERVE L., 1989**, *Recherches écologiques sur quelques groupements végétaux de l'étage alpin des Pyrénées orientales*, Thèse Doct. ès-Sci. Nat., Université de Perpignan, Perpignan, 658 p.
- SHANNON C.E., WEAVER W., 1949**, *The mathematical theory of communication*, Urbana IL, University of Illinois Press.
- SHRODER J.F., 1978**, Dendrogeomorphological analysis of mass movement on Table Cliffs Plateau, Utah, *Quaternary Research*, 9: 168-185.
- SIGAFOOS R.S., 1951**, Soil instability in tundra vegetation, *Ohio J. Sci.* 51: 281-298.
- SMITH J., 1956**, Some moving soils in Spitsbergen, *J. Soil. Sci.* 7: 10-21.
- SNOGERUP S., 1971**, Evolutionary and plant geographical aspects of chasmophytic communities, In Davis P.H., Harper P.C. et HEDGE I.C. (Eds), *Plant life of South-West Asia*, *Bot. Soc. Edinburgh*: 157-170.
- SOMSON P., 1983**, *Contribution à l'étude de la végétation des pierriers et éboulis pyrénéens dans ses relations avec la dynamique du modelé support*. Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Toulouse, 230 p.
- SOMSON P., BAUDIERE A., 1986**, Les milieux d'éboulis oriento-pyrénéens: analyse critique, *Coll. intern. Bot. Pyr.*, La Cabanasse: 443-465.

- SOUTADE G., 1975**, Coulée de blocaille et éboulis lités fonctionnels (Terregalls) à la Coma de Finestrelles (Pyrénées méditerranéennes, *Rev. Géomorph. Dyn.* 1: 1-12.
- SOUTADE G., 1980**, *Modèle et dynamique actuelle des versants supraforestiers des Pyrénées orientales*, Thèse d'état, Bordeaux III, Imprimerie coopérative du Sud-Ouest, Albi, 452 p.
- STATHAM I., 1973**, Scree slope development under conditions of surface particle movement, *Inst. Brit. Geogr. Trans.* 59: 41-53.
- STATHAM I., 1976a**, A scree slope rockfall model, *Earth Surf. Proc. and Landf.* 1: 43-62.
- STATHAM I., 1976b**, Debris flows on vegetated screes in the Black Mountain, Carmarthenshire, *Earth Surf. Proc. and Landf.* 1: 173-180.
- STATHAM I., 1977**, Angles of repose, angles of shearing resistance and angles of talus slopes, a reply, *Earth Surf. Proc. and Landf.* 2: 437-440.
- STOCK R. F., 1968**, *Morphology and development of talus slopes at Ekalugad Fiord, Baffin Island, N. W. T.*, Unpubl. BA Thesis, Dept. of Geography, Univ. of Western Ontario, 84 p.
- STUART CHAPIN F., al., 2000**, Consequences of changing biodiversity, *Nature*, 405: 234-242.
- TANSLEY A.G., 1911**, *Types of British vegetation*, Cambridge University Press, Cambridge.
- TANSLEY A.G., 1935**, The use and abuse of vegetational concepts and terms, *Ecology* 16: 284-307.
- TESSIER L., DE BEAULIEU J.L., COUTEAUX M., EDOUARD J.L., PONEL P., ROLANDO C., THINON M., THOMAS A., TOBOLSKI K., 1993** – Holocen paleoenvironments at the timberline in the French Alps – multidisciplinary approach, *Boreas*, 22: 244-254.
- THEURILLAT J.P., 1995**, Climate change and the alpine flora: some perspectives, in GUISAN *et al.* (eds) *Potential ecological impacts of climate change in the Alps and Fennoscandian mountains*, Ed ; Conserv. Jard. Bot. Genève: 121-127.
- THEVENON O., 1999**, *Les changements climatiques récents en montagne: l'exemple du massif de l'Oisans*, Mémoire de Maîtrise, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble 1, 120 p.
- TIHAY J.-P., 1984**, Les éboulis et leur environnement géomorphologique autre que celui des glaciers rocheux, Actes du Colloque tenu le 8 janvier 1983 à Paris "Éboulis et environnements géographiques passé et actuel": 21-29.
- TRANQUILINI W., 1979**, *Physiological ecology of the alpine timberline*, Ecological studies 31, Springer Verlag, 137 p.
- TRICART J., 1950**, *Le modèle périglaciaire*, C.D.U., S.E.D.E.S, Paris.
- TRICART J., 1962**, *L'épiderme de la terre, Esquisse d'une géomorphologie appliquée*, Masson, Paris, 167 p.
- TRICART J., CAILLEUX A., 1967**, *Le modèle des régions périglaciaires*, S.E.D.E.S., Paris 512 p.
- TRICART J., 1982**, Géographie/écologie, *Hérodote « Ecologies/Géographie »*, 26: 47-66.
- TROLL C., 1950**, *Die geographische Landschaft und ihre Erforschung*, Studium Generale (Heidelberg), 3: 163-181.
- TROLL C., 1968a**, *The cordilleras of the tropical Americas. Aspects of climatic, phytogeographical and agrarian ecology, Geocology of the Mountainous Regions of the Tropical Americas*, C. TROLL (ed.), Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn, 15-56.
- TROLL C., 1968b**, Landschaftsökologie. In Tuxen, R., ed., *Pflanzensoziologie und Landschaftsökologie*, The Hague: Junk, 1-21.
- TROLL C., 1971**, Landscape ecology (geo-ecology) and bio-ecology, a terminology study, *Geoforum*, 8: 43-46.
- TROLL C., 1973**, The upper timberlines in different climatic zones, *Arctic and Alpine Research*, 5 (3): A3-A18.
- TURC D., 1998**, *Géodynamique et bio-rhexistase des versants schisteux des Alpes internes: l'exemple de l'adret de Mizoën (vallée de la Romanche, Isère)*. Mémoire de Maîtrise, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble 1, 188 p.
- TUTIN T.H., HEYWOOD V.H., BURGESS N.A., VALENTINE D.H., WALTERS S.M., WEBB D.A., 1964-1980**, *Flora Europea*, vols. 1-5, Cambridge University Press, Cambridge U.K.

- VALLA F., 1989**, Forty years of mass-balance observations on glacier de Sarennes, French Alps, Congrès de LOM (Norvège), *Annals of Glaciology*, 13: 269-272.
- VAN DER HAMMEN T., 1974**, The pleistocene changes of vegetation and climate in tropical South America, *J. of Biogeography*, 1: 3-26.
- VANPEENE BRUHIER S., 1998**, *Transformation des paysages et dynamiques de la biodiversité végétale. Les écotones, un concept clé pour l'étude des végétations post-culturelles. L'exemple de la commune d'Aussois (Savoie)*, Thèse de Doctorat, ENGREF, Tomes I et II.
- VANPEENE BRUHIER S., BRUN J.J., 1998**, Species richness: a multilevel concept, In BUNCE B., DOVER J. (eds) *Key concepts in landscape ecology*. Proceedings of the European IALE Conference, Held at Myerscough college, Lancashire, UK, 3-5 sept 1998: 5 p.
- VAN UFFORD L.M.Q., 1909**, *Etude écologique de la flore des pierriers*, Thèse Lausanne, 80 p.
- VAN BURKALOW A., 1945**, Angle of repose and angle of sliding friction: an experimental study, *Bull. Géol. Soc. of America*, New York, 56: 667-708.
- VAN STEIJN H., DE RUIG J., HOOZEMANS F., 1988**, Morphological and mechanical aspects of debris flows in parts of the Frenche Alps, *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., 32: 143-161.
- VAN STEIJN H., BERTRAN P., FRANCOU B., HETU B., TEXIER J.P., 1995**, Models for genetic and environmental interpretation of stratified slope deposits: review, *Permafrost and Periglacial Processes*, 6: 125-146.
- VETTER J., 2004**, *Contribution d'un code de calcul météorologique méso-échelle à la climatologie des pluies en zone de relief*, Thèse de 3^{ème} cycle, spécialité "Mécanique des Milieux Géophysiques et Environnement", Institut National Polytechnique de Grenoble, 177 p.
- VEYRET P., VEYRET G., 1967**, *Au coeur de l'Europe: les Alpes*, Flammarion, 546 p.
- VEYRET P., VEYRET G., 1979**, *Atlas et géographie de la France moderne: les Alpes françaises*, Flammarion, 316 p.
- VIVIAN R., 1975**, *Les glaciers des Alpes occidentales. Etude géographique. L'emprise de la glaciation actuelle et ses fluctuations récentes; le rôle des eaux, l'aménagement du paysage montagnard par les glaciers*, Imprimerie Allier, Grenoble, 513 p.
- WALLISER R., 1977**, *Systèmes et modèles. Introduction critique à l'analyse de systèmes*, Seuil, 247 p.
- WARDLE P., 1972**, Plant succession on greywacke grave land scree in the subalpine belt in Canterbury, New Zealand, *J. Bot.* 10: 387-398.
- WARMING E., GRAEBNER P., 1918**, *Eug. Warming's Lehrbuch der ökologischen Pflanzengeographie Dritte umgearbeitete Auflage* 988 Seiten, 64 Seiten Auswahl der Litteratur mit 395 Abbildungen, Berlin.
- WARMING E., VAHL M., 1925**, Translated into English by GROOM, PERCY and BALFOUR, ISAAC BAYLEY. *Oecology of Plants, an Introduction to the Study of Plant Communities*, Second impression, Oxford University Press, 422 p.
- WARREN WILSON J.**, Vegetation patterns associated with soil movement on Jan Mayen Island, *J. Ecol.* 40: 249-264.
- WEAVER J.E., 1919**, The ecological relations of roots, *Carnegie Inst. of Washington Publ*, 286: 1-128.
- WEBB III, T., KUTZBACH J.E., STREET-PERROT F.A., 1985**, *20 000 years of global climate change: paleoclimatic research plan*, Global Change, T.F. Malone, and J.G. Roederer, (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, 182-218.
- WHALLEY W. B., 1984**, Rockfalls, In *Slope Instability*, Edited by D. BRUNSDEN AND D. B. PRIOR, John Wiley & Sons Ltd: 217-256.
- WHITEHOUSE I.E., Mc SAVENEY M.J., 1983**, Diachronous talus surfaces in the Southern Alps, New Zealand, and their applications to talus accumulations, *Arctic and Alpine Research*, 1: 53-64.
- WHITEMAN D., 2000**, *Mountain Meteorology*, Oxford University Press, 355 p.
- WIENS J.A., 1995**, Landscape mosaics and ecological theory, in HANSSON L., FAHRIG L., MERRIAM G. 1995, *Mosaic landscapes and ecological processes*, Chapman et Hall, IALE studies in landscape ecology: 1-26.

-
- WILSON E.O. (ed.), 1988**, *Biodiversity*, National Academy Press Washington D.C., 521 p.
- WILSON P., 1990**, Clast size variations on talus: some observations from Northwest Ireland, *Earth Surf. Processes and Landf.* 15: 183-188.
- WOODWARD F.I., THOMPSON G.B., Mc FEE I.F., 1991**, The effects of Elevated Concentrations of Carbon Dioxide on Individual Plants, Populations, Communities and Ecosystems, *Annals of Botany*, 67: 23-38.
- WU J., 1999**, Hierarchy and scaling: extrapolating information along a scaling ladder, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 25 (4): 367-380.
- ZIMMERMANN M., HAEBERLI W., 1992**, Climatic Change and Debris Flow Activity in High-Mountain Areas. A Case Study in the Swiss Alps, *Catena, Suppl.* 22: 59-72.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

I. Thématique de recherche	6
II. Hypothèses et objectifs	6
III. Intérêt et portée scientifiques des résultats.....	8
IV. Plan de la thèse	9

PREMIERE PARTIE : Les talus d'éboulis semi-végétalisés de moyenne montagne : cadre théorique et terrain d'application.....10

CHAPITRE 1 : L'état des connaissances.....11

I. Les talus d'éboulis : études géomorphologiques, phytosociologiques et écologiques11

1.1. Les apports de la géomorphologie11

1.2. Les apports de la botanique12

1.2.1. Le courant naturaliste..... 12

1.2.2. Le courant phytosociologique13

1.2.3. Le courant actuel : la géomorphologie « naturaliste »14

II. Eboulis et terminologies17

2.1. Les phases d'évolution du géosystème corniche-talus d'éboulis : éboulisation et processus morphoclimatiques17

2.1.1. Éboulisation et processus morphoclimatiques.....17

2.1.2. Les remaniements post-dépositionnels.....19

2.2. Quelle définition pour le talus d'éboulis nivéo-périglacière ?20

2.2.1. Le talus d'éboulis : une construction polygénique.....20

2.2.1.1. Généralités..... 20

2.2.1.2. Intervention de la gravité et du frottement des matériaux.....22

2.2.2. Caractéristiques des talus d'éboulis de l'étage nivéo-périglacière.....23

2.3. Le talus d'éboulis : un milieu défini par des composantes climatiques, édaphiques et biologiques25

2.3.1. l'approche phytosociologique de l'éboulis25

2.3.2. L'approche écologique de l'éboulis27

2.4. Conclusion28

III. Les changements environnementaux en montagne29

3.1. Fluctuations climatiques et changement global.....29

3.1.1. Du postglaciaire à la fin du petit âge glaciaire (P.A.G).....29

3.1.2. La validation scientifique du « global change ».....31

3.1.2.1. Le réchauffement atmosphérique.....31

3.1.2.2. Les précipitations.....34

3.1.2.3. Modification de la couverture neigeuse.....36

3.1.3. Les tendances observées dans le massif de la grande Chartreuse.....38

3.1.3.1. L'évolution thermique.....38

A. Données générales.....38

B. Température minimales et maximales.....43

C. Une diminution dans la fréquence et l'intensité du gel.....45

3.1.3.2. Les précipitations.....47

3.1.3.3. L'enneigement.....50

3.1.4. Conclusion.....53

3.2. Les effets morphogéniques et biologiques du réchauffement climatique.....54

3.2.1. Effets du réchauffement climatique sur les processus géomorphologiques et morphogéniques en montagne.....54

3.2.1.1. Synthèse des travaux effectués en haute montagne.....54

3.2.1.2. Synthèse des travaux effectués dans l'étage nivéo-périglacière.....54

3.2.1.3. Effets du réchauffement climatique sur le fonctionnement gravitaire et nival des talus d'éboulis en milieu nivéo-périglacière.....55

A. Incidences sur le fonctionnement gravitaire.....55

B. Incidences sur le fonctionnement avalancheux.....	55
3.2.2. Effets du réchauffement climatique sur la végétation.....	57
3.2.2.1. Les enseignements issus des données paléocologiques.....	57
3.2.2.2. La réponse écophysologique.....	57
A. Accroissement de la productivité des végétaux et augmentation de la pression partielle de CO ₂ : des résultats incertains.....	58
B. Végétation d'altitude et augmentation des températures : la primauté des effets indirects.....	58
C. Réponse de la végétation à la modification des précipitations : Importance de la durée de la couverture neigeuse.....	59
3.2.2.3. Distribution géographique et réactions migratoires.....	60
A. Déplacements des étages de végétation : menaces sur les écosystèmes de haute altitude.....	60
B. Une migration individuelle des espèces.....	61
C. Evolution de la biodiversité.....	62
3.3. Les changements anthropiques dans les Alpes françaises du Nord.....	63
3.4. Conclusion.....	64
CHAPITRE 2 : Bases théoriques pour une étude géo-écologique des mosaïques biorhexistatiques d'éboulis et de leur évolution dynamique.....	65
I. La Théorie de la biorhexistatie.....	65
1.1. Biorhexistatie et modelage paysager.....	66
1.2. La biorhexistatie comme facteur de biodiversité.....	67
II. Les apports de l'écologie du paysage.....	68
2.1. Généralités.....	68
2.2. L'éco-complexe : un ensemble d'écosystèmes en interaction.....	69
2.3. Les éléments de la mosaïque paysagère.....	70
2.4. L'écotone : un nouveau concept de l'écologie du paysage.....	71
2.4.1. Définition.....	71
2.4.2. Un concept applicable aux mosaïques biorhexistatiques d'éboulis.....	72
III. La biodiversité : un concept omniprésent, complexe et dynamique.....	74
3.1. Un concept polysémique.....	74
3.2. Biodiversité et niveau de perception.....	76
IV. Conclusion.....	76
CHAPITRE 3 : Le terrain d'application : Le massif de la Chartreuse (Parc Naturel Régional et Réserve Naturelle des Hauts).....	77
I. Localisation du terrain d'étude.....	77
II. Géomorphologie structurale et géomorphologie dynamique externe.....	80
2.1. La structure géologique.....	80
2.1.1. Une stratigraphie marquée par une alternance de calcaires et de marnes.....	82
2.1.2. Le faciès urgonien.....	82
2.2. Géomorphologie dynamique externe.....	84
2.2.1. Le modelé karstique.....	84
2.2.2. Le modelé périglaciaire.....	84
2.2.3.1. Les corniches de calcaire urgonien.....	85
2.2.3.2. Les talus d'éboulis.....	85
III. Un climat de moyenne montagne humide et fraîche.....	87
3.1. Les précipitations.....	87
3.2. Les températures.....	88
3.3. L'opposition adret/ubac.....	89
3.4. Les vents.....	89
IV. Des conditions bioclimatiques favorables à la dynamique végétale.....	91
4.1. La végétation actuelle.....	91

4.2. Les groupements d'éboulis	92
V. Les conséquences du déclin agro-sylvo-pastoral sur l'évolution de l'utilisation du sol des « hauts » de versant	93
5.1. Quelques données historiques	93
5.1.1. Du Moyen Age à la Renaissance : un massif en autarcie	93
5.1.2. Du XVI^{ème} au XVIII^{ème} siècle : l'âge du charbonnage	94
5.1.3. Les mutations socio-économiques récentes	94
5.2. L'exploitation agro-pastorale	95
5.2.1. Les basses clairières agricoles	95
5.2.2. Les alpages	96
5.3. L'évolution de l'utilisation du sol sur les « hauts » de versant	97
5.3.1. Les documents cadastraux	97
5.3.1.1. <i>La cadastration sarde (1728-1738)</i>	97
5.3.1.2. <i>Le cadastre général parcellaire ou « napoléonien »</i>	98
5.3.2. Méthode d'élaboration des cartes diachroniques d'occupation des sols	99
5.3.2.1. <i>Les informations disponibles sur l'occupation des sols</i>	99
5.3.2.2. <i>Le choix des classes d'occupation des sols</i>	100
5.3.3. Evolution qualitative de l'occupation des sols sur les « hauts » de versant	101
5.3.3.1. <i>Caractéristiques de l'occupation des sols sur la période 1820-1914</i>	102
5.3.3.2. <i>Evolution de l'occupation des sols sur la période 1914-1960</i>	104
Conclusion de la première partie	107

DEUXIEME PARTIE : Méthodologie pour une étude géo-écologique des mosaïques biorhexistatiques d'éboulis.....108

CHAPITRE 4 : Analyse systémique des mosaïques biorhexistatiques.....109

I. Une démarche systémique pour l'étude des mosaïques biorhexistatiques.....109

1.1. L'utilité de l'approche systémique.....109

1.2. L'approche pluriscale et spatio-temporelle : les niveaux d'organisation et les échelles d'observation.....110

1.2.1. La théorie de la hiérarchie.....110

 1.2.1.1. *Principes*.....110

 1.2.1.2. *Les paramètres scalaires et les critères non scalaires*.....111

 A. le choix de l'échelle d'observation.....111

 B. Le choix des critères non scalaires.....111

1.2.2. Application aux mosaïques biorhexistatiques d'éboulis.....111

II. La stratification de l'échantillonnage.....114

III. Approche spatiale et dynamique des mosaïques biorhexistatiques à l'échelle des écocomplexes.....117

3.1. Cartographie diachronique de l'occupation des sols.....118

3.2. Cartographie diachronique des physionomies végétales.....118

3.2.1. Traitements des documents topographiques et photographiques.....120

 3.2.1.1. *ortho-rectification des données*.....120

 3.2.1.2. *Classification supervisée : cartographie automatique*.....122

3.2.2. Les documents cartographiques.....122

 3.2.2.1. *Cartographie des états successifs des types physionomiques*.....122

 A. La diversité spatiale.....123

 B. La complexité spatiale.....124

 3.2.2.2. *Cartographie diachronique des types physionomiques*.....125

3.3. Cartographie géodynamique et physionomique.....126

3.4. La définition des unités phyto-morphologiques.....127

CHAPITRE 5 : Protocoles d'étude et descripteurs utilisés à l'échelle de la station et de la parcelle.....129

I. Morphométrie, géodynamique de surface et suivi morphoclimatique.....131

1.1. Etude topo-sédimentologique des talus d'éboulis	131
1.1.1. Les mesures de pente	131
1.1.1.1. <i>Les profils en long</i>	131
1.1.1.2. <i>Les profils transversaux</i>	132
1.1.2. Morphométrie	132
1.2. Géodynamique de surface	134
1.2.1. Choix de la méthode et échantillonnage	134
1.2.2. Critères de positionnement et caractéristiques des marquages	135
1.2.2.1. <i>Critères de positionnement des marquages</i>	135
1.2.2.2. <i>Caractéristiques des marquages</i>	136
1.2.3. Méthode de suivi et quantification	137
1.2.3.1. <i>Suivi de la déstructuration des marquages : appréciation qualitative et quantitative</i>	137
A. Ortho-rectification des photographies.....	137
B. Photogrammétrie des ortho-images.....	137
1.2.3.2. <i>Quantification des vitesses de déplacement des fragments</i>	139
1.2.4. Le cas particulier du suivi topomicrométrique	139
1.2.4.1. <i>Description sommaire</i>	140
1.2.4.2. <i>Le suivi topomicrométrique</i>	141
1.3. Le suivi microclimatique	142
1.3.1. L'équipement stationnel	143
1.3.2. Les paramètres microclimatiques mesurés : intérêts morphoclimatiques et morphodynamiques	145
1.3.2.1. <i>Les régimes thermiques</i>	145
1.3.2.2. <i>Les données pluviométriques et nivales</i>	146
A. Les précipitations.....	146
B. La neige.....	146
1.4. Critiques et limites des méthodes utilisées	147
1.4.1. La brièveté du temps d'observation	147
1.4.2. Les limites des dispositifs de mesure	147
1.5. Les apports de la dendrochronologie	148
II. Approche phyto-écologique et évaluation de la phytodiversité	151
2.1. Etude floristique	151
2.1.1. Justification de la méthodologie utilisée : la technique du transect	151
2.1.1.1. <i>Transect ou placette ?</i>	152
2.1.1.2. <i>Le choix de la taille des placettes</i>	152
2.1.1.3. <i>Le choix de la position du transect</i>	153
2.1.1.4. <i>Le positionnement sur le terrain</i>	153
2.1.1.5. <i>Le choix de la longueur du transect</i>	154
2.1.2. Les relevés phyto-écologiques	154
2.1.2.1. <i>Les facteurs biotiques</i>	154
2.1.2.2. <i>Les facteurs abiotiques</i>	156
2.1.3. Analyse des données	157
2.1.3.1. <i>Les indices et les regroupements d'information floristique</i>	157
A. Les indices de biodiversité.....	157
a) La diversité spécifique : les indices de Shannon-Weaver (1949) et Hill (1973).....	159
b) La similarité : l'indice de Dice, une autre façon de mesurer la diversité β	163
c) La richesse spécifique.....	164
B. La rareté.....	166
C. Le caractère indicateur des espèces.....	167
a) Les valeurs écologiques indicatrices de Landolt.....	167
b) Les types biologiques de Raunkiaer.....	167
2.1.3.2. <i>Analyse univariée des relevés phyto-écologiques</i>	168
A. L'analyse des distributions simples.....	168
B. Les spectres des groupes fonctionnels.....	168
2.1.3.3. <i>Analyse bi-variée</i>	168
2.1.3.4. <i>Un traitement de synthèse : Analyse Factorielle des correspondances et Classification Ascendante Hiérarchique</i>	169
A. L'analyse factorielle des correspondances (AFC).....	169
B. La classification ascendante hiérarchique.....	169

Conclusion de la Deuxième partie.....	171
TROISIEME PARTIE : Résultats et discussion.....	172
CHAPITRE 6 : Structure et dynamique des mosaïques biorhexistatiques d'éboulis à l'échelle des écosystèmes.....	173
I. Analyse spatiale et phyto-morphologique des mosaïques biorhexistatiques.....	173
1.1. L'écosystème de la Grande Sure.....	173
1.2. L'écosystème du Grand Som.....	176
1.3. L'écosystème des « Pelloux ».....	178
1.4. L'écosystème de l'Aulp du Seuil.....	180
1.5. L'écosystème de La Plagne.....	185
1.6. Analyse spatiale comparée de la fragmentation du type physiognomique « secteur rhexistatique ».....	192
II. Analyse dynamique des mosaïques biorhexistatiques d'éboulis.....	194
2.1. L'évolution de la structure de l'écosystème de la Grande Sure.....	194
2.1.1. Etat de la mosaïque biorhexistatique en 1956.....	194
2.1.2. Etat de la mosaïque biorhexistatique en 2003.....	196
2.1.3. Evolution de la végétation entre 1956 et 2003 : les enseignements du diachronisme.....	196
<i>2.1.3.1. L'évolution des surfaces occupées par les types physiognomiques entre 1956 et 2003.....</i>	<i>196</i>
<i>2.1.3.2. L'évolution de la structure de la mosaïque biorhexistatique.....</i>	<i>199</i>
A. L'évolution des périmètres des unités physiognomiques.....	199
B. Evolution du nombre de taches.....	200
C. L'évolution de la complexité de la mosaïque biorhexistatique entre 1956 et 2003 : l'indice de forme de Patton.....	201
D. La diversité spatiale de la mosaïque biorhexistatique.....	202
2.2. L'évolution de la structure de l'écosystème du Grand Som.....	202
2.2.1. Etat de la mosaïque biorhexistatique en 1920.....	202
2.2.2. Etat de la mosaïque biorhexistatique en 1956.....	203
2.2.3. Etat de la mosaïque biorhexistatique en 2001.....	205
2.2.4. Evolution de la végétation entre 1920 et 1956.....	206
<i>2.2.4.1. L'évolution des surfaces occupées par les types physiognomiques entre 1920 et 1956.....</i>	<i>206</i>
<i>2.2.4.2. L'évolution de la structure de la mosaïque biorhexistatique entre 1920 et 1956.....</i>	<i>208</i>
A. L'évolution des périmètres des unités physiognomiques.....	208
B. Evolution du nombre de taches.....	209
C. L'évolution de la complexité de la mosaïque biorhexistatique entre 1956 et 2003 : l'indice de forme de Patton.....	209
D. La diversité spatiale de la mosaïque biorhexistatique.....	210
2.2.5. Evolution de la végétation entre 1956 et 2001.....	211
<i>2.2.5.1. L'évolution des surfaces occupées par les types physiognomiques entre 1956 et 2001.....</i>	<i>211</i>
<i>2.2.5.2. L'évolution de la structure de la mosaïque biorhexistatique entre 1956 et 2001.....</i>	<i>213</i>
A. L'évolution des périmètres des unités physiognomiques.....	213
B. Evolution du nombre de taches.....	215
C. L'évolution de la complexité de la mosaïque biorhexistatique entre 1956 et 2001 : l'indice de forme de Patton.....	215
D. Evolution de la diversité spatiale de la mosaïque biorhexistatique entre 1956 et 2001.....	216
2.3. L'évolution de la structure de l'écosystème des Pelloux.....	218
2.3.1. Etat de la mosaïque biorhexistatique en 1956.....	218
2.3.2. Etat de la mosaïque biorhexistatique en 1993.....	219
2.3.3. Evolution de la végétation entre 1956 et 1993.....	219
<i>2.3.3.1. L'évolution des surfaces occupées par les types physiognomiques entre 1956 et 1993.....</i>	<i>219</i>
<i>2.3.3.2. L'évolution de la structure de la mosaïque biorhexistatique.....</i>	<i>223</i>
A. L'évolution des périmètres des unités physiognomiques.....	223
B. Evolution du nombre de taches.....	224
C. L'évolution de la complexité de la mosaïque biorhexistatique entre 1956 et 1993 : l'indice de forme de Patton.....	224
D. La diversité spatiale de la mosaïque biorhexistatique.....	225
2.4. L'évolution de la structure de l'écosystème de l'Aulp du Seuil.....	226

2.4.1. Etat de la mosaïque biorhexistatique en 1956	226
2.4.2. Etat de la mosaïque biorhexistatique en 2001	226
2.4.3. Evolution de la végétation entre 1956 et 2001	228
2.4.3.1. <i>L'évolution des surfaces occupées par les types physiologiques entre 1956 et 2001</i>	228
2.4.3.2. <i>L'évolution de la structure de la mosaïque biorhexistatique entre 1956 et 2001</i>	229
A. L'évolution des périmètres des unités physiologiques.....	229
B. Evolution du nombre de taches.....	231
C. L'évolution de la complexité de la mosaïque biorhexistatique entre 1956 et 1993 : l'indice de forme de Patton.....	231
D. La diversité spatiale de la mosaïque biorhexistatique.....	232
2.5. L'évolution de la structure de l'éco-complexe de La Plagne	233
2.5.1. Etat de la mosaïque biorhexistatique en 1911	233
2.5.2. Etat de la mosaïque biorhexistatique en 1978	234
2.5.3. Etat de la mosaïque biorhexistatique en 2001	235
2.5.4. Evolution de la végétation entre 1911 et 1978	237
2.5.4.1. <i>L'évolution des surfaces occupées par les types physiologiques entre 1911 et 1978</i>	237
2.5.4.2. <i>L'évolution de la structure de la mosaïque biorhexistatique entre 1911 et 1978</i>	241
A. L'évolution des périmètres des unités physiologiques.....	241
B. Evolution du nombre de taches.....	242
C. L'évolution de la complexité de la mosaïque biorhexistatique entre 1956 et 2003 : l'indice de forme de Patton.....	243
D. Evolution de la diversité spatiale de la mosaïque biorhexistatique entre 1911 et 1978.....	244
2.5.5. Evolution de la végétation entre 1978 et 2001	245
2.5.5.1. <i>L'évolution des surfaces occupées par les types physiologiques entre 1978 et 2001</i>	245
2.5.5.2. <i>L'évolution de la structure de la mosaïque biorhexistatique entre 1978 et 2001</i>	248
A. L'évolution des périmètres des unités physiologiques.....	248
B. Evolution du nombre de taches.....	249
C. L'évolution de la complexité de la mosaïque biorhexistatique entre 1978 et 2001 : l'indice de forme de Patton.....	250
D. Evolution de la diversité spatiale de la mosaïque biorhexistatique entre 1978 et 2001.....	251
2.6. Conclusion : une réponse différente de la végétation à la déprise pastorale et au réchauffement climatique	252
CHAPITRE 7 : Analyse phyto-écologique : vers une typologie fonctionnelle des mosaïques biorhexistatiques d'éboulis	254
I. Caractérisation mésologique des mosaïques biorhexistatiques	254
1.1. Les caractéristiques abiotiques	254
1.1.1. Premiers enseignements : l'analyse des distributions simples	254
1.1.2. L'analyse bivariée. La stabilité du substrat : un facteur déterminant pour l'évolution de la couverture pédologique sur talus d'éboulis	258
1.2. Les descripteurs de la végétation	259
1.2.1. Les apports de l'analyse des distributions simples	259
1.2.1.1. <i>Quelques considérations générales</i>	259
1.2.1.2. <i>L'analyse de la fréquence des espèces : le diagramme rangs-fréquences</i>	259
A. L'éco-complexe de La Plagne.....	264
B. L'éco-complexe de l'Aulp du Seuil.....	265
C. L'éco-complexe des Pelloux.....	266
D. L'éco-complexe du Grand Som.....	266
E. L'éco-complexe de la Grande Sure.....	267
1.2.1.3. <i>Répartition des espèces selon les types biologiques de Raunkier</i>	267
1.2.1.4. <i>Les valeurs indicatrices de Landolt</i>	270
A. L'éco-complexe de La Plagne.....	270
B. L'éco-complexe de l'Aulp du Seuil.....	270
C. L'éco-complexe des « Pelloux ».....	271
D. L'éco-complexe du Grand Som.....	271
E. L'éco-complexe de la Grande Sure.....	271
1.2.2. L'analyse bivariée	272

1.3. Un traitement de synthèse : l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) et la Classification

Ascendante Hiérarchique (CAH)	273
1.3.1. Les résultats de la CAH	274
1.3.1.1. <i>Les quatre dernières dichotomies</i>	274
1.3.1.2. <i>L'interprétation des classes proposées par la CAH</i>	276
1.3.2. Les résultats de l'AFC	278
1.3.2.1. <i>L'inertie associée au plan factoriel</i>	278
1.3.2.2. <i>Contributions des variables et des modalités aux axes factoriels</i>	278
1.3.2.3. <i>La position des modalités des variables</i>	278
1.3.2.4. <i>L'agencement des relevés sur les plans de l'AFC</i>	281
1.3.2.5. <i>L'interprétation des axes</i>	281
1.4. Evaluation de la phytodiversité des mosaïques biorhexistasiques : diversité et richesse spécifiques	283
1.4.1. La diversité spécifique des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis	283
1.4.1.1. <i>Diversité alpha (α) et régularité : indice de Shannon-Weaver (H) et indice de Pielou (R)</i>	283
A. Diversité α et régularité mesurées à l'échelle des écosystèmes.....	284
B. Diversité α et régularité mesurées à l'échelle des stations « formations périphériques ».....	285
C. Diversité α et régularité mesurées à l'échelle des stations « éboulis ss ».....	285
D. Diversité α et régularité mesurées à l'échelle des parcelles écotones.....	286
1.4.1.2. <i>Diversité bêta (β) et similarité indice de diversité de Hill d'ordre 1 (D_{H1}) et indice de Dice (D_{ij})</i>	287
1.4.2. La richesse des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis	290
1.4.2.1. <i>La richesse locale</i>	290
1.4.2.2. <i>La richesse globale</i>	291
1.4.3. Prise en compte de l'originalité et de la rareté des espèces	291
1.4.3.1. <i>La richesse originale</i>	291
1.4.3.2. <i>Prise en compte de la rareté des espèces</i>	293
A. La rareté absolue.....	293
B. La rareté relative.....	294

II. Typologie affinée et cartographie actuelle des mosaïques biorhexistasiques d'éboulis.....296

2.1. La mosaïque biorhexistasique du Grand Som	296
2.2. La mosaïque biorhexistasique de la Grande Sure	301
2.3. La mosaïque biorhexistasique des Pelloux	303

CHAPITRE 8 : Approche micro-climatique, bioclimatique et géodynamique : contribution à la validation du réchauffement climatique dans l'étage infra-périglaciaire.....306

I. Une ambiance morphoclimatique de moyenne montagne	306
1.1. Les régimes thermiques et leur intérêt morphoclimatique	306
1.1.1. La situation à 945 m (ubac) : La Grande Chartreuse	306
1.1.1.1. <i>L'année 2002-2003</i>	306
1.1.1.2. <i>L'année 2003-2004</i>	310
1.1.2. La situation vers 1647 m (petit adret, exposition WSW) : La Plagne	312
1.1.2.1. <i>L'année 2002-2003 : une année chaude et sèche</i>	312
1.1.2.2. <i>L'année 2003-2004 : une année froide et humide</i>	317
1.1.3. Un étagement thermique de faible ampleur	320
1.1.3.1. <i>L'étagement d'après les températures moyennes</i>	320
1.1.3.2. <i>L'étagement des périodes thermiques intra-annuelles</i>	320
A. La période sans dégel.....	320
B. La période à alternances gel-dégel.....	320
C. La période sans gel.....	321
1.1.3.3. <i>Les fluctuations de l'étagement thermique d'après le gradient vertical</i>	322
A. Les variations saisonnières au cours de l'année 2002-2003.....	323
B. Les variations saisonnières au cours de l'année 2003-2004.....	324
1.2. Le régime pluviométrique	325
1.2.1. La situation à 945 m : La Grande Chartreuse (ubac de fond de vallée)	325
1.2.1.1. <i>L'année 2002-2003</i>	326
1.2.1.2. <i>L'année 2003-2004</i>	327
1.2.2. La situation à 1647 m : La Plagne (petit adret)	328
1.2.2.1. <i>L'année 2002-2003</i>	328

1.2.2.2. L'année 2003-2004.....	329
1.2.3. L'intensité des pluies.....	332
1.2.3.1. L'année 2002-2003.....	332
A. L'été.....	332
B. L'automne.....	333
C. L'hiver.....	334
D. Le printemps.....	334
1.2.3.2. L'année 2003-2004.....	334
A. L'été.....	334
B. L'automne.....	334
C. L'hiver.....	335
D. Le printemps.....	335
E. Le début de l'été 2004.....	335
II. Les caractéristiques des régimes thermiques à 20 cm et -10 cm le long du gradient biorhexistasique : approches bioclimatique et morphoclimatique.....	338
2.1. L'année 2002-2003.....	338
2.1.1. La saison estivale dans l'air à 20 cm.....	338
2.1.2. La saison estivale dans le sol à -10 cm.....	340
2.1.3. L'automne dans l'air à 20 cm.....	342
2.1.4. L'automne dans le sol à -10 cm.....	342
2.1.5. La saison hivernale dans l'air à 20 cm.....	343
2.1.6. La saison hivernale dans le sol à -10 cm.....	344
2.1.7. Le printemps dans l'air à 20 cm.....	345
2.1.8. Le printemps dans le sol à -10 cm.....	345
2.2. L'année 2003-2004.....	346
2.2.1. La saison estivale dans l'air à 20 cm.....	346
2.2.2. La saison estivale dans le sol à -10 cm.....	347
2.2.3. L'automne dans l'air à 20 cm.....	347
2.2.4. L'automne dans le sol à -10 cm.....	348
2.2.5. L'hiver dans l'air (20 cm) et dans le sol (-10 cm).....	348
2.2.6. La saison printanière dans l'air à 20 cm.....	349
2.2.7. Le printemps dans le sol à -10 cm.....	349
III. L'évolution morphodynamique des talus d'éboulis de La Plagne et de l'Aulp du Seuil : principales caractéristiques de la géodynamique de surface en relation avec le gradient biorhexistasique.....	352
3.1. Fonctionnement géodynamique de surface et typologie morphodynamique de la mosaïque biorhexistasique de l'Aulp du Seuil.....	353
3.1.1. Les principaux résultats de l'étude de la géodynamique de surface.....	353
3.1.1.1. La période du 23 novembre 2001 au 30 mars 2002.....	353
3.1.1.2. La période du 30 mars 2002 au 20 mai 2004.....	357
3.1.2. Découpage phyto-morphodynamique de la mosaïque biorhexistasique de l'Aulp du Seuil.....	359
3.2. Fonctionnement géodynamique de surface et typologie morphodynamique de la mosaïque biorhexistasique de La Plagne.....	362
3.2.1. Les principaux résultats de l'étude de la géodynamique de surface : le calendrier des processus morphogéniques.....	362
3.2.1.1. La période du 19 novembre 2001 au 25 mars 2002.....	362
3.2.1.2. La période du 25 mars 2002 au 24 octobre 2002.....	366
3.2.1.3. La période du 24 octobre 2002 au 28 avril 2003.....	368
3.2.2. Découpage phyto-morphodynamique de la mosaïque biorhexistasique de La Plagne.....	373
IV. Contribution à la validation du réchauffement climatique dans l'étage infra-périglaciaire : les apports de la dendrochronologie et de la dendrogéomorphologie.....	379
4.1. Etablissement de la végétation ligneuse sur le tablier d'éboulis.....	379
4.2. Les enseignements issus de l'étude des cicatrices d'impact.....	382
CONCLUSION GENERALE.....	386
I. L'intérêt d'une approche géo-écologique systémique et appliquée.....	386
II. Le rôle fondamental de la biorhexistasie comme élément structurant à différents niveaux d'observation et d'organisation.....	387

	420
III. La pertinence des mosaïques biorhexistatiques d'éboulis de l'étage infra-périglacière comme éléments intégrateurs et révélateurs des changements environnementaux en cours.....	388
IV. La nécessité d'un suivi à long terme.....	388
BIBLIOGRAPHIE.....	390
TABLE DES MATIERES.....	412
TABLE DES ENCARTS.....	421
TABLE DES FIGURES.....	422
TABLE DES GRAPHIQUES.....	425
TABLE DES TABLEAUX.....	427
TABLE DES PHOTOGRAPHIES.....	429
TABLE DES CARTES.....	430
TABLE DES ANNEXES.....	431
ANNEXES.....	Tome 2

TABLE DES ENCARTS

- Encart 1 : La durée du Petit Age glaciaire (<i>in</i> FELTGEN DIDIER, 1998).....	Page 30
- Encart 2 : Les modèles SAFRAN et CROCUS (Météo-France).....	Page 36
- Encart 3 : Les grandes étapes de l'occupation humaine.....	Page 64
- Encart 4 : Nature des données de base et notations (<i>in</i> GOSSELIN ET LAROUSSINIE, 2004)..	Page 158
- Encart 5 : Les notions de diversités alpha (α), bêta (β) et gamma (γ) (<i>in</i> GOSSELIN ET LAROUSSINIE, 2004).....	Page 159

TABLE DES FIGURES

- Figure 1 : Le processus d'ébouilisation (d'après DERRUAU (1974)).....	Page 17
- Figure 2 : Physionomie générale des éboulis (d'après RAPP (1960) modifiée par FRANCOU et HETU (1989)).....	Page 21
- Figure 3 : Variations estimées de la température moyenne estivale par rapport à la température actuelle (ici le 0) en Europe Centrale et variations estimées de la limite supérieure des forêts dans les Alpes.....	Page 30
- Figure 4 : Variations de la température à la surface de la terre au cours des 140 dernières années et du dernier millénaire	Page 32
- Figure 5 : Evolution des températures globale et alpines sur la période 1901-2004.....	Page 34
- Figure 6 : Tendances décennales des précipitations intenses en Suisse (1950-1990) <i>in</i> BENISTON (2000).....	Page 35
- Figure 7 : Evolution de l'enneigement dans les Alpes en cas de doublement de CO ₂ d'ici 2050 (Météo-France).....	Page 37
- Figure 8 : Les éléments constitutifs du paysage.....	Page 71
- Figure 9 : carte géologique simplifiée.....	Page 81
- Figure 10 : Géologie de la Chartreuse orientale.....	Page 83
- Figure 11 : Corniches et talus d'éboulis de calcaire urgonien (1600-2000 m) : principaux types.....	Page 86
- Figure 12 : Démarche d'échantillonnage stratifié descendante (inspirée de FELTGEN-DIDIER, 1998).....	Page 114
- Figure 13 : Le plan d'échantillonnage.....	Page 115
- Figure 14 : Chaîne de traitement de l'ortho-rectification au mosaïcage.....	Page 121
- Figure 15 : Localisation des profils longitudinal et transversal (cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil).....	Page 131
- Figure 16 : Localisation des profils longitudinal et transversal (tablier d'éboulis de La Plagne).....	Page 132
- Figure 17 : Grille (placette) de 100x100 cm surimposée à la surface du talus (Aulp du Seuil, zone distale).....	Page 133
- Figure 18 : Profil longitudinal et transversal (mesures de pente et de granulométrie).....	Page 133
- Figure 19 : Chaîne de traitement des marquages. De l'ortho-rectification à la classification supervisée.....	Page 138
- Figure 20 : Le topomètre laser photographique ®.....	Page 141
- Figure 21 : Localisation de l'équipement microclimatique stationnel (Tablier de la Plagne, 1647m).....	Page 144
- Figure 22 : Localisation des individus échantillonnés et zonation du tablier (LAURENT, 2005).....	Page 150
- Figure 23 : Cheminement d'un transect (gradient biorhexistasique).....	Page 152
- Figure 24 : Détail d'un transect.....	Page 153
- Figure 25 : Positionnement des transects.....	Page 154
- Figure 26 : Fiche de relevés phyto-écologiques.....	Page 155
- Figure 27 : Calcul de la richesse ponctuelle par placette et de la richesse locale (d'après VANPEENE-BRUHIER, 1998, modifié).....	Page 164
- Figure 28 : Calcul de la richesse globale, originale et du fonds commun d'espèces (d'après VANPEENE-BRUHIER, 1998, modifié).....	Page 165
- Figure 29 : Localisation de l'écocomplexe de la Grande Sure.....	Page 173
- Figure 30 : Localisation de l'écocomplexe du Grand Som.....	Page 176
- Figure 31 : Localisation de l'écocomplexe des « Pelloux ».....	Page 178
- Figure 32 : Localisation de l'écocomplexe de l'Aulp du Seuil.....	Page 180
- Figure 33 : Granoclassement de surface : cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil.....	Page 182
- Figure 34 : Localisation de l'écocomplexe de La Plagne.....	Page 185
- Figure 35 : Granoclassement de surface : talus d'éboulis de La Plagne.....	Page 187
- Figure 36 : Distributions de fréquence des modalités des 10 variables abiotiques descriptives des mosaïques biorhexistasiques.....	Page 255
- Figure 37 : Distributions de fréquence des modalités des 9 variables biotiques descriptives des mosaïques biorhexistasiques.....	Page 260
- Figure 38 : Quatre allures typiques de diagrammes rangs-fréquences (FRONTIER et PICHOD-VIALE, 1998; FAURIE <i>et al.</i> , 2003).....	Page 263
- Figure 39 : Diagramme rangs-fréquences de la distribution des espèces sur l'ensemble des écocomplexes ($N = 3540$, $S = 126$).....	Page 264

- Figure 40 : Diagramme rangs-fréquences de la distribution des espèces (Ecocomplexe de La Plagne, $N = 1398$, $S = 90$).....	Page 265
- Figure 41 : Diagramme rangs-fréquences de la distribution des espèces (Ecocomplexe de l'Aulp du Seuil, $N = 701$, $S = 65$).....	Page 265
- Figure 42 : Diagramme rangs-fréquences de la distribution des espèces (Ecocomplexe des Pelloux, $N = 659$, $S = 70$).....	Page 266
- Figure 43 : Diagramme rangs-fréquences de la distribution des espèces (Ecocomplexe du Grand Som, $N = 683$, $S = 78$).....	Page 266
- Figure 44 : Diagramme rangs-fréquences de la distribution des espèces (Ecocomplexe de la Grande Sure, $N = 165$, $S = 40$).....	Page 267
- Figure 45 : Spectre biologique de l'ensemble des espèces répertoriées.....	Page 268
- Figure 46 : Spectre biologique de l'ensemble des espèces répertoriées par écocomplexe.....	Page 269
- Figure 47 : Arbre hiérarchique et interprétation des classes de la Classification Ascendante Hiérarchique.....	Page 275
- Figure 48 : Orientation des variables et position des modalités sur les axes factoriels 1/2.....	Page 279
- Figure 49 : Position des cinq classes de la CAH sur le plan 1-2 de l'AFC.....	Page 280
- Figure 50 : Organisation simplifiée des modalités sur l'axe 1.....	Page 281
- Figure 51 : Organisation simplifiée des modalités sur l'axe 2.....	Page 282
- Figure 52 : Organisation simplifiée des modalités sur les axes 1 et 2.....	Page 282
- Figure 53 : Variations de l'indice de diversité et de la régularité à l'échelle des écocomplexes.....	Page 284
- Figure 54 : Variations de l'indice de diversité et de la régularité à l'échelle des stations « formations périphériques ».....	Page 285
- Figure 55 : Variations de l'indice de diversité et de la régularité à l'échelle des stations « éboulis ss ».....	Page 286
- Figure 56 : Variations de l'indice de diversité et de la régularité à l'échelle des parcelles écotones.....	Page 286
- Figure 57 : Variations de l'indice de diversité de Hill d'ordre 1.....	Page 288
- Figure 58 : Comparaison de la richesse globale des cinq mosaïques biorhexistasiques.....	Page 291
- Figure 59 : Originalité de la flore des cinq écocomplexes.....	Page 292
- Figure 60 : Régime thermique de la Grande Chartreuse (945 m). Températures de l'air maximale, minimale et moyenne décadaires, relevées sous abri (juillet 2002-juin 2004).....	Page 307
- Figure 61 : Intensité et durée du gel, dans l'air, par décade, novembre 2002-avril 2003, Grande Chartreuse (945 m).....	Page 309
- Figure 62 : Cycles de gel-dégel dans l'air, par décade, novembre 2002-avril 2003, Grande Chartreuse (945 m).....	Page 309
- Figure 63 : Intensité et durée du gel, dans l'air, par décade, octobre 2003-avril 2004, Grande Chartreuse (945 m).....	Page 311
- Figure 64 : Cycles de gel-dégel dans l'air, par décade, octobre 2003-avril 2004, Grande Chartreuse (945 m).....	Page 311
- Figure 65 : Régime thermique de La Plagne (1647 m). Températures de l'air maximale, minimale et moyenne décadaires, relevées sous abri (juillet 2002-juin 2004).....	Page 313
- Figure 66 : Etagement des écarts thermiques dans l'air selon l'altitude, de 945 m à 1647 m. Juillet 2002-juin 2004, moyennes décadaires.....	Page 314
- Figure 67 : Etagement des écarts thermiques dans l'air selon l'altitude, de 945 m à 1647 m. Juillet 2002-juin 2004, minima décadaires.....	Page 314
- Figure 68 : Etagement des écarts thermiques dans l'air selon l'altitude, de 945 m à 1647 m. Juillet 2002-juin 2004, maxima décadaires.....	Page 315
- Figure 69 : Intensité et durée du gel, dans l'air, par décade, septembre 2002-mai 2003, La Plagne (1647 m).....	Page 316
- Figure 70 : Cycles de gel-dégel dans l'air, par décade, septembre 2002-mai 2003, La Plagne (1647 m).....	Page 316
- Figure 71 : Intensité et durée du gel, dans l'air, par décade, octobre 2003-mai 2004, La Plagne (1647 m).....	Page 319
- Figure 72 : Cycles de gel-dégel dans l'air, par décade, octobre 2003-mai 2004, La Plagne (1647 m).....	Page 319
- Figure 73 : Gradient thermique vertical entre la Grande Chartreuse (945 m) et La Plagne (1647 m), Juillet 2002-juin 2004, moyennes mensuelles (a) et décadaires (b).....	Page 323

- Figure 74 : Diagramme ombrothermique de la Grande Chartreuse (945 m). Températures et précipitations moyennes mensuelles pour la période 1961-1990.....	Page 325
- Figure 75 : Diagramme ombrothermiques de la Grande Chartreuse (945 m) et de La Plagne (1647 m), données mensuelles (juillet 2002-juillet 2004).....	Page 326
- Figure 76 : Diagramme ombrothermiques de la Grande Chartreuse (945 m), juillet 2002-juillet 2004, moyennes décennales.....	Page 327
- Figure 77 : Diagramme ombrothermiques de La Plagne (1647 m), juillet 2002-juillet 2004, moyennes décennales.....	Page 328
- Figure 78 : Moyennes des cumuls sur 24 h pour chaque station (1987-1995). D'après VETTER (2004).....	Page 331
- Figure 79 : Pourcentage du nombre de jours pluvieux (1987-1995). D'après VETTER (2004).....	Page 331
- Figure 80 : Régime thermique de l'air à 20 cm en fonction du gradient biorthostatique (juillet 2002-juin 2004). Températures moyennes décennales, tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).....	Page 339
- Figure 81 : Régime thermique du sol à -10 cm en fonction du gradient biorthostatique (juillet 2002-juin 2004). Températures moyennes décennales, tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).....	Page 341
- Figure 82 : Localisation des surfaces peintes. Cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil (1650 m).....	Page 355
- Figure 83a : Déstructuration des surfaces peintes. Période du 23 novembre 2001 au 30 mars 2002. Cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil (1650 m).....	Page 356
- Figure 83b : Vitesses moyennes de déplacement. Période du 23 novembre 2001 au 30 mars 2002. Cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil (1650 m).....	Page 356
- Figure 84a : Déstructuration des surfaces peintes. Période du 30 mars 2002 au 20 mai 2003. Cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil (1650 m).....	Page 358
- Figure 84b : Vitesses moyennes de déplacement. Période du 30 mars 2002 au 20 mai 2003. Cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil (1650 m).....	Page 358
- Figure 85 : Phytomorphoséquence transversale au contact du chenal latéral graveleux (Cg) et du bombement central (Bc). Transect latéral (AsAEl, 10 m, 1630 m).....	Page 362
- Figure 86 : Localisation des surfaces peintes (bandes et carrés). Tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).....	Page 363
- Figure 87a : Déstructuration des surfaces peintes. Période du 19 novembre 2001 au 25 mars 2002. Tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).....	Page 364
- Figure 87b : Vitesses moyennes de déplacement. Période du 19 novembre 2001 au 25 mars 2002. Tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).....	Page 364
- Figure 88 : Evolution morphologique de la surface des 4 parcelles topomicrométrées entre le 23/10/02 et le 7/10/02. Impact des précipitations estivale et automnale sur la géodynamique de surface (tablier d'éboulis de La Plagne).....	Page 367
- Figure 89a : Déstructuration des surfaces peintes. Période du 25 mars 2002 au 24 octobre 2002. Tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).....	Page 369
- Figure 89b : Vitesses moyennes de déplacement. Période du 25 mars 2002 au 24 octobre 2002. Tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).....	Page 369
- Figure 90 : Evolution morphologique de la surface des 4 parcelles topomicrométrées entre le 7/10/02 et le 25/04/03. Effet morphogénique de la neige et des processus périglaciaires (tablier d'éboulis de La Plagne).....	Page 371
- Figure 91a : Déstructuration des surfaces peintes. Période du 24 octobre 2002 au 28 avril 2003. Tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).....	Page 372
- Figure 91b : Vitesses moyennes de déplacement. Période du 24 octobre 2002 au 28 avril 2003. Tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).....	Page 372
- Figure 92 : Phytomorphoséquence longitudinale au contact du secteur rhexistatique à <i>Centranthus angustifolius</i> et de la prairie à <i>Calamagrostis varia</i> . Transect longitudinal, La Plagne (LpHE, 12 m, 1600 m).....	Page 376
- Figure 93 : Evolution de la colonisation ligneuse du tablier d'éboulis de La Plagne (1911-2001).....	Page 378
- Figure 94 : Fréquences d'implantation des ligneux sur la période 1945-2003.....	Page 379
- Figure 95 : Structure d'âge (minimal) des populations ligneuses du tablier d'éboulis de La Plagne (modifiées d'après LAURENT, 2005).....	Page 381
- Figure 96 : Données sur la formation de cicatrices par secteur et fréquence pondérée (It) de formation Des cicatrices (a). Ecarts à la moyenne de 1961-1990 (°C), moyennes mobiles des températures (b). Totaux pluviométriques annuels (c) (Poste de la Grande Chartreuse, Météo-France).....	Page 383

TABLE DES GRAPHIQUES

- Graphique 1 : Evolution des températures moyennes annuelles sur la période 1961-2004.....	Page 38
- Graphique 1a : Evolution des températures moyennes annuelles sur la période 1961-1980.....	Page 39
- Graphique 1b : Evolution des températures moyennes annuelles sur la période 1981-2004.....	Page 39
- Graphique 2 : Evolution des écarts à la moyenne des températures moyennes mensuelles de décembre (1961-2004).....	Page 40
- Graphique 3 : Evolution des écarts à la moyenne des températures moyennes mensuelles de janvier (1961-2004).....	Page 40
- Graphique 4 : Evolution des écarts à la moyenne des températures moyennes mensuelles de mars (1961-2004).....	Page 41
- Graphique 5 : Evolution des écarts à la moyenne des températures moyennes mensuelles de mai (1961-2004).....	Page 42
- Graphique 6 : Evolution des écarts à la moyenne des températures moyennes mensuelles d'août (1961-2004).....	Page 42
- Graphique 7 : Evolution des températures moyennes mensuelles décennales.....	Page 43
- Graphique 8 : Evolution des températures moyennes mensuelles des minima journaliers par décennie.....	Page 44
- Graphique 9 : Evolution des températures moyennes mensuelles des maxima journaliers par décennie.....	Page 44
- Graphique 10 : Evolution du nombre annuel de jours de gel moyen sur la période 1960-2003.....	Page 45
- Graphique 11 : Evolution du nombre annuel de jours de gel continu sur la période 1960-2003 (moyennes).....	Page 46
- Graphique 12 : Evolution des précipitations moyennes annuelles sur 40 ans (1961-2003).....	Page 48
- Graphique 13 : Evolution des précipitations moyennes mensuelles de septembre (1961-2003).....	Page 49
- Graphique 14 : Evolution des précipitations moyennes mensuelles d'octobre (1961-2003).....	Page 49
- Graphique 15 : Evolution des précipitations moyennes mensuelles de décembre (1961-2003).....	Page 50
- Graphique 16 : Evolution de la hauteur de neige moyenne sur la période 1961-2002 (col de Porte)....	Page 51
- Graphique 17 : Température hivernale moyenne et nombre de jours où la hauteur de neige au sol est au moins égale à 20cm au Col de Porte (1961-2002).....	Page 52
- Graphique 18 : Diagramme ombrothermique du poste de la Grande Chartreuse (1961-2003).....	Page 87
- Graphique 19 : Degrés de fragmentation des secteurs rhexistasiques.....	Page 193
- Graphique 20 : Evolution de la surface occupée par les types physiionomiques entre 1956 et 2003...Page	197
- Graphique 21 : Evolution de la complexité globale de la mosaïque biorhexistasiq de la Grande Sure.....	Page 201
- Graphique 22 : Evolution de la complexité des types physiionomiques entre 1956 et 2003.....Page	201
- Graphique 23 : Evolution de la diversité spatiale globale entre 1956 et 2003.....Page	202
- Graphique 24 : Evolution de la surface occupée par les types physiionomiques entre 1920 et 1956..Page	206
- Graphique 25 : Evolution de la complexité globale de la mosaïque biorhexistasiq du Grand Som entre 1920 et 1956.....Page	209
- Graphique 26 : Evolution de la complexité des types physiionomiques entre 1920 et 1956.....Page	210
- Graphique 27 : Evolution de la diversité spatiale globale entre 1920 et 1956.....Page	210
- Graphique 28 : Evolution de la surface occupée par les types physiionomiques entre 1956 et 2001...Page	211
- Graphique 29 : Evolution de la complexité globale de la mosaïque biorhexistasiq du Grand Som entre 1956 et 2001.....Page	215
- Graphique 30 : Evolution de la complexité des types physiionomiques entre 1956 et 2001.....Page	216
- Graphique 31 : Evolution de la diversité spatiale globale entre 1956 et 2001.....Page	217
- Graphique 32 : Evolution de la surface occupée par les types physiionomiques entre 1956 et 1993...Page	221
- Graphique 33 : Evolution de la complexité globale de la mosaïque biorhexistasiq des « Pelloux » entre 1956 et 1993.....Page	224
- Graphique 34 : Evolution de la complexité des types physiionomiques entre 1956 et 1993.....Page	225
- Graphique 35 : Evolution de la diversité spatiale globale entre 1956 et 1993.....Page	225
- Graphique 36 : Evolution de la surface occupée par les types physiionomiques entre 1956 et 2001...Page	228
- Graphique 37 : Evolution de la complexité globale de la mosaïque biorhexistasiq de l'Aulp du Seuil entre 1956 et 2001.....Page	232

- **Graphique 38** : Evolution de la complexité des types physiologiques entre 1956 et 2001.....**Page 232**
- **Graphique 39** : Evolution de la diversité spatiale globale entre 1956 et 2001.....**Page 233**
- **Graphique 40** : Evolution de la surface occupée par les types physiologiques entre 1911 et 1978...**Page 237**
- **Graphique 41** : Evolution de la complexité globale de la mosaïque biorhexistatique de La Plagne entre 1911 et 1978.....**Page 243**
- **Graphique 42** : Evolution de la complexité des types physiologiques entre 1911 et 1978.....**Page 243**
- **Graphique 43** : Evolution de la diversité spatiale globale entre 1911 et 1978.....**Page 244**
- **Graphique 44** : Evolution de la surface occupée par les types physiologiques entre 1978 et 2001...**Page 245**
- **Graphique 45** : Evolution de la complexité globale de la mosaïque biorhexistatique de La Plagne entre 1978 et 2001.....**Page 250**
- **Graphique 46** : Evolution de la complexité des types physiologiques entre 1978 et 2001.....**Page 250**
- **Graphique 47** : Evolution de la diversité spatiale globale entre 1978 et 2001.....**Page 251**

TABLE DES TABLEAUX

- Tableau 1 : Augmentation de la température moyenne annuelle dans les stations météorologiques de haute altitude (FELTGEN DIDIER, 1998).....	Page 31
- Tableau 2 : Stations météorologiques Météo France (Massif de la Chartreuse)	Page 38
- Tableau 3 : Evolution du nombre de jours de gel fort (moyennes).....	Page 47
- Tableau 4 : Démarche systémique appliquée aux mosaïques biorhexistasiques d'éboulis.....	Page 113
- Tableau 5 : Données photographiques (date, type et source).....	Page 120
- Tableau 6 : Répartition par éco-complexe du nombre de transects et de placettes réalisés.....	Page 157
- Tableau 7 : Liste des valeurs écologiques indicatrices de Landolt.....	Page 167
- Tableau 8 : Surface occupée par les unités physionomiques en 1956.....	Page 194
- Tableau 9 : Surface occupée par les unités physionomiques en 2003.....	Page 196
- Tableau 10 : Evolution de la surface des types physionomiques entre 1956 et 2003.....	Page 196
- Tableau 11 : Evolution des périmètres des unités physionomiques entre 1956 et 2003.....	Page 199
- Tableau 12 : Evolution du rapport « périmètre/surface » des unités physionomiques entre 1956 et 2003.....	Page 200
- Tableau 13 : Evolution du nombre de taches par unité physionomique entre 1956 et 2003.....	Page 200
- Tableau 14 : Surface occupée par les unités physionomiques en 1920.....	Page 203
- Tableau 15 : Surface occupée par les unités physionomiques en 1956.....	Page 203
- Tableau 16 : Surface occupée par les unités physionomiques en 2001.....	Page 205
- Tableau 17 : Evolution de la surface des types physionomiques entre 1920 et 1956.....	Page 206
- Tableau 18 : Evolution des périmètres des unités physionomiques entre 1920 et 1956.....	Page 208
- Tableau 19 : Evolution du rapport « périmètre/surface » des unités physionomiques entre 1920 et 1956.....	Page 209
- Tableau 20 : Evolution du nombre de taches par unité physionomique entre 1920 et 1956.....	Page 209
- Tableau 21 : Evolution de la surface des types physionomiques entre 1956 et 2001.....	Page 211
- Tableau 22 : Evolution des périmètres des unités physionomiques entre 1956 et 2001.....	Page 214
- Tableau 23 : Evolution du rapport « périmètre/surface » des unités physionomiques entre 1956 et 2001.....	Page 214
- Tableau 24 : Evolution du nombre de taches par unité physionomique entre 1956 et 2001.....	Page 215
- Tableau 25 : Surface occupée par les unités physionomiques en 1956.....	Page 218
- Tableau 26 : Surface occupée par les unités physionomiques en 1993.....	Page 219
- Tableau 27 : Evolution de la surface occupée par les types physionomiques entre 1956 et 1993.....	Page 221
- Tableau 28 : Evolution des périmètres des unités physionomiques entre 1956 et 1993.....	Page 223
- Tableau 29 : Evolution du rapport « périmètre/surface » des unités physionomiques entre 1956 et 1993.....	Page 223
- Tableau 30 : Evolution du nombre de taches par unité physionomique entre 1956 et 1993.....	Page 224
- Tableau 31 : Surface occupée par les unités physionomiques en 1956.....	Page 226
- Tableau 32 : Surface occupée par les unités physionomiques en 1956.....	Page 228
- Tableau 33 : Evolution de la surface occupée par les types physionomiques entre 1956 et 2001.....	Page 228
- Tableau 34 : Evolution des périmètres des unités physionomiques entre 1956 et 2001.....	Page 229
- Tableau 35 : Evolution du rapport « périmètre/surface » des unités physionomiques entre 1956 et 2001.....	Page 231
- Tableau 36 : Evolution du nombre de taches par unité physionomique entre 1956 et 1993.....	Page 231
- Tableau 37 : Surface occupée par les unités physionomiques en 1911.....	Page 233
- Tableau 38 : Surface occupée par les unités physionomiques en 1978.....	Page 235
- Tableau 39 : Surface occupée par les unités physionomiques en 2001.....	Page 235
- Tableau 40 : Evolution de la surface occupée par les types physionomiques entre 1911 et 1978.....	Page 237
- Tableau 41 : Evolution des périmètres des unités physionomiques entre 1911 et 1978.....	Page 242
- Tableau 42 : Evolution du rapport « périmètre/surface » des unités physionomiques entre 1911 et 1978.....	Page 242
- Tableau 43 : Evolution du nombre de taches par unité physionomique entre 1911 et 1956.....	Page 243
- Tableau 44 : Evolution de la surface occupée par les types physionomiques entre 1978 et 2001.....	Page 245
- Tableau 45 : Evolution des périmètres des unités physionomiques entre 1978 et 2001.....	Page 248

- Tableau 46 : Evolution du rapport « périmètre/surface » des unités physiologiques entre 1978 et 2001.....	Page 248
- Tableau 47 : Evolution du nombre de taches par unité physiologique entre 1978 et 2001.....	Page 249
- Tableau 48 : Coefficients de corrélation de Spearman (variables abiotiques).....	Page 258
- Tableau 49 : Indices moyens de Landolt pour l'éco-complexe de La Plagne.....	Page 270
- Tableau 50 : Indices moyens de Landolt pour l'éco-complexe de l'Aulp du Seuil.....	Page 270
- Tableau 51 : Indices moyens de Landolt pour l'éco-complexe des « Pelloux ».....	Page 271
- Tableau 52 : Indices moyens de Landolt pour l'éco-complexe du Grand Som.....	Page 271
- Tableau 53 : Indices moyens de Landolt pour l'éco-complexe de la Grande Sure.....	Page 272
- Tableau 54 : Coefficients de Spearman (variables biotiques/abiotiques).....	Page 273
- Tableau 55 : Matrice de similarité (Stations « formations périphériques »).....	Page 288
- Tableau 56 : Matrice de similarité (Eco-complexes, collections complètes).....	Page 289
- Tableau 57 : Matrice de similarité (Stations « éboulis <i>ss</i> »).....	Page 289
- Tableau 58 : Matrice de similarité (Parcelles écotonales).....	Page 289
- Tableau 59 : Espèces originales par éco-complexe.....	Page 292
- Tableau 60 : Degrés de rareté « relative » des mosaïques biorhexistatiques d'éboulis.....	Page 294
- Tableau 61 : Valeurs remarquables de l'été 2002.....	Page 342
- Tableau 62 : Valeurs remarquables de l'automne 2002.....	Page 342
- Tableau 63 : Valeurs remarquables de l'hiver 2002-2003.....	Page 343
- Tableau 64 : Démarrage de la période végétative (printemps 2003).....	Page 345
- Tableau 65 : Degrés-heures positifs au printemps 2003 et période végétative.....	Page 346
- Tableau 66 : Valeurs remarquables de l'été 2003.....	Page 346
- Tableau 67 : Valeurs remarquables de l'automne 2003.....	Page 347
- Tableau 68 : Début de la période végétative au printemps 2004.....	Page 349
- Tableau 69 : Degrés-heures positifs au printemps 2004 et période végétative.....	Page 350

TABLE DES PHOTOS

- Photo 1 : Versants de La Plagne et du Granier-Tencovaz.....	Page 85
- Photo 2 : Flanc occidental de la Dent de Crolles.....	Page 86
- Photo 3 : Facettes de la paroi favorables à l'haloclastie (efflorescences de sels, en blanc).....	Page 188
- Photo 4 : Eboulement de l'escarpement secondaire du talus d'éboulis de La Plagne (printemps 2004).....	Page 189

TABLE DES CARTES

- Carte n° 1 : Le massif de la Chartreuse et ses espaces protégés (d'après la Charte du PNR de Chartreuse (charte d'objectifs 1995).....	Page 78
- Carte n° 2 : Le massif de la Chartreuse : principales unités passagères.....	Page 79
- Carte n° 3 : Cartographie historique de l'occupation des sols sur les « hauts » de versant du massif de la Chartreuse sur la période 1820-1914.....	Page 103
- Carte n° 4 : Cartographie historique de l'occupation des sols sur les « hauts » de versant du massif de la Chartreuse sur la période 1914-1960.....	Page 106
- Carte n° 5 : Localisation des principaux écosystèmes	Page 119
- Carte n° 6 : Carte phyto-morphologique de l'écosystème de la Grande Sure.....	Page 175
- Carte n° 7 : Carte phyto-morphologique de l'écosystème du Grand Som.....	Page 177
- Carte n° 8 : Carte phyto-morphologique de l'écosystème des « Pelloux ».....	Page 179
- Carte n° 9 : Carte phyto-morphologique de l'écosystème de l'Aulp du Seuil.....	Page 181
- Carte n° 10 : Carte géodynamique et physiologique du cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil (2001)..	Page 184
- Carte n° 11 : Carte phyto-morphologique de l'écosystème de La Plagne.....	Page 186
- Carte n° 12 : Carte géodynamique et physiologique du tablier d'éboulis de La Plagne (2002).....	Page 190
- Carte n° 13 : Physiologie végétale du talus d'éboulis de la Grande Sure (versant occidental) en 1956 et 2003.....	Page 195
- Carte n° 14 : Evolution de la physiologie végétale du talus d'éboulis de la Grande Sure (versant occidental) entre 1956 et 2003.....	Page 198
- Carte n° 15 : Physiologie végétale du talus d'éboulis du Grand Som en 1920, 1956 et 2001.....	Page 204
- Carte n° 16 : Evolution de la physiologie végétale du talus d'éboulis du Grand Som entre 1920 et 1956.....	Page 207
- Carte n° 17 : Evolution de la physiologie végétale du talus d'éboulis du Grand Som entre 1956 et 2001.....	Page 212
- Carte n° 18 : Physiologie végétale du talus d'éboulis des « Pelloux » en 1956 et 1993.....	Page 220
- Carte n° 19 : Evolution de la physiologie végétale du talus d'éboulis des Pelloux entre 1956 et 1993.....	Page 222
- Carte n° 20 : Physiologie végétale du cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil en 1956 et 2001.....	Page 227
- Carte n° 21 : Evolution de la physiologie végétale du cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil entre 1956 et 2001.....	Page 230
- Carte n° 22 : Physiologie végétale du tablier d'éboulis de La Plagne en 1911, 1978 et 2001.....	Page 236
- Carte n° 23 : Evolution de la physiologie végétale du tablier d'éboulis de La Plagne entre 1911 et 1978.....	Page 238
- Carte n° 24 : Evolution de la physiologie végétale du tablier d'éboulis de La Plagne entre 1978 et 2001.....	Page 246
- Carte n° 25 : Mosaïque biorhexistatique du Grand Som.....	Page 297
- Carte n° 26 : Mosaïque biorhexistatique de la Grande Sure.....	Page 302
- Carte n° 27 : Mosaïque biorhexistatique des Pelloux.....	Page 304
- Carte n° 28 : Mosaïque biorhexistatique de l'Aulp du Seuil.....	Page 360
- Carte n° 29 : Mosaïque biorhexistatique de La Plagne.....	Page 374

TABLE DES ANNEXES

- **Annexe A** : Extraits des matrices cadastrales (Cadastré napoléonien) et registre des numéros suivis (Mappe Sarde) 1729-1960. Cartographie à grande échelle de l'occupation du sol des cinq éco-complexes.
- **Annexe B** : Carte diachronique de l'évolution de la physionomie végétale des talus d'éboulis de la Dent de Crolles à l'Alpette entre 1956 et 1993.
- **Annexe C** : Documents photographiques
- **Annexe D** : Granulométrie de surface
- **Annexe E** : Géodynamique de surface et marquages (déstructuration et vitesses de déplacement)- Données brutes-Tablier d'éboulis de La Plagne et cône de l'Aulp du Seuil.
- **Annexe F** : Pas de mesure et points de calage pour les parcelles topomicro-métrées du tablier d'éboulis de La Plagne.
- **Annexe G** : Liste des espèces déterminées (nomenclature de Flora Europea, Tutin *et al.*, 1964-80).
- **Annexe H** : Cartographie de localisation des transects pour chaque éco-complexe.
- **Annexe I** : Valeurs écologiques de Landolt et types biologiques de Raunkiaer (Lauber et Wagner, 2000).
- **Annexe J** : Processus d'haloclastie : surfaces peintes (escarpement secondaire, tablier d'éboulis de La Plagne, 1647 m).
- **Annexe K** : Distributions des fréquences des modalités des variables abiotiques et biotiques descriptives des cinq éco-complexes.
- **Annexe L** : Distributions des fréquences des espèces, par éco-complexe.
- **Annexe M** : Coefficients de corrélation de Spearman.
- **Annexe N** : Principaux résultats de l'AFC.
- **Annexe O** : Indices de diversité spécifique (Shannon-Weaver, régularité, Hill et Dice).
- **Annexe P** : Richesse globale, fond commun d'espèces et coefficients de rareté.
- **Annexe Q** : Détails des régimes thermiques : températures moyennes, minimales et maximales décennales.
- **Annexe R** : Illustrations de terrain
- **Annexe S** : Déstructuration des surfaces peintes et vitesses moyennes de déplacement. Périodes du 28 avril 2003 au 20 novembre 2003 et du 20 novembre 2003 au 20 mai 2004.

ANNEXE A

- **Extraits des matrices cadastrales (Cadastre napoléonien) et du registre des numéros suivis (Mappe Sarde) 1729-1960.**

Communes de Saint-Joseph-de-Rivière, Saint-Julien-de-Raz, Saint-Hilaire-du-Touvet, Saint-Pancrasse, Sarcenas, Chapareillan, Saint-Pierre-de-Chartreuse, Sainte-Marie-du-Mont, Saint-Bernard-du-Touvet, Saint-Pierre-d'Entremont et Entremont-le-Vieux.

- **Cartographie à grande échelle de l'occupation du sol des cinq écocomplexes.**

**Matrices cadastrales et état de sections (Chartreuse)
Archives Départementales de l'Isère**

Versements	Date
2598 W 2873 W 3046 W 3203 W 3333 W 3430 W 3521 W 3541 W 3585 W 3785 W 3971 W 4867 W 6021 W 6525 W 6526 W	XIX
6100	1911
6134 W 6135 W 6136 W 6141 W 6525 W 6526 W	1914-1960

Les états de sections (XIX s) se trouvent dans les versements 6134 W, 6135 W, 6136 W, 6141 W, 6525 W, 6526 W.
Evaluations primitives entre 1833 et 1835 et première révision vers 1911-1960.

Matrices cadastrales

Saint Julien de Raz : 2598 W 410-411 ; 4867 W 316-318
Saint Joseph de Rivière : 2598 W 408 ; 4867 W 312-315
Saint Pierre de Chartreuse : 6525 W 65-76
Saint Pierre d'Entremont : 6525 W 77-87
Saint Pancrasse : 2598 W 440 ; 6135 W 202-204
Saint Hilaire du Touvet : 2598 W 395 ; 4867 W 306-308
Saint Bernard du Touvet : 3333 W 41 ; 6135 W 134-137
Sainte Marie du Mont : 2598 W 472-473 ; 4867 W 365-368 ; 6525 W 64
Chapareillan : 3971 W 1-3 ; 6135 W 17-18 ; 6525 W 7-13
Sarcenas : 3785W30-32 ; 6135W281-220

Plans cadastraux (1800-1950)

Saint Julien de Raz : 4P5/404 (7 feuilles)
Saint Joseph de Rivière : 4P5/402 (13 feuilles)
Saint Pierre de Chartreuse : 4P5/439 (1 feuille)
Saint Pierre d'Entremont : Mappede sarde
Saint Pancrasse : 4P5/432 (10 feuilles)
Saint Hilaire du Touvet : 4P5/392 (17 feuilles)
Saint Bernard : 4P5/364 (10 feuilles)
Sainte Marie du Mont : 4P5/415 (22 feuilles)
Chapareillan : 4P5/75 (5 feuilles)
Sarcenas : 4P5/469 (4 feuilles)

Saint Joseph de Rivière

Section	N° Parcelle	Lieu-Dit	Nature 1820	Propriétaire 1820	Nature 1914	Propriétaire 1914	Nature 1960	Propriétaire 1960
D (4^{ème} feuille)								
	1126	Le Fournet et la forêt du roi	Rochers	Hospital de Grenoble	Rochers	Gouvernement	Rochers	Commune de Saint Joseph de Rivière
	1127	Chorolant	Futaie	Hospital de Grenoble	Futaie	Gouvernement	Futaie	Commune de Saint Joseph de Rivière
	1128	Chorolant	Pâture	Hospital de Grenoble	Pâture	Gouvernement	Pâture	Commune de Saint Joseph de Rivière
	1129	Chorolant	Rochers	Hospital de Grenoble	Rochers	Gouvernement	Rochers	Commune de Saint Joseph de Rivière
	1130	La Grande Vache	Pâture et rochers	Hospital de Grenoble	Pâture et rochers	Gouvernement	Pâture et rochers	Commune de Saint Joseph de Rivière
	1131	La Grande Vache	Pâture	Hospital de Grenoble	Pâture	Gouvernement	Pâture	Commune de Saint Joseph de Rivière

Commentaires : Section D, 6^{ème} feuille = B, 6^{ème} feuille pour 1935 (révision). Le plan révisé figure en rouge sur la feuille (1935). Du bas jusqu'au portail de Chorolant : bois dont bois du Roi.

Saint Julien de Raz

Section	N° Parcelle	Lieu-Dit	Nature 1820	Propriétaire 1820	Nature (1914)	Propriétaire 1914	Nature 1960	Propriétaire 1960
C (2^{ème} Feuille)	201 bis	Sembuis	Rochers	Hospital de Grenoble	Rochers	Gouvernement	Rochers	Commune de Saint Julien de Raz
	202 bis	Sembuis	Rochers	Hospital de Grenoble	Rochers	Gouvernement	Rochers	Commune de Saint Julien de Raz
	206	Sembuis	Bois	Hospital de Grenoble	Bois	Gouvernement	Bois	Commune de Saint Julien de Raz
	211	Jusson	Rochers	Hospital de Grenoble	Rochers	Gouvernement	Rochers	Commune de Saint Julien de Raz
	212 ruisseau des Bouzes	Jusson	Bois	Hospital de Grenoble	Bois	Gouvernement	Bois	Commune de Saint Julien de Raz
	213	Jusson	Bois	Hospital de Grenoble	Bois	Gouvernement	Bois	Commune de Saint Julien de Raz
	214	Jusson	Pâture (Gde Sure)	Hospital de Grenoble	Pâture	Gouvernement	Pâture	Commune de Saint Julien de Raz
	215	Jusson	Pâture (Gde Sure)	Hospital de Grenoble	Pâture	Gouvernement	Pâture	Commune de Saint Julien de Raz
	216	Jusson	Pâture (Gde Sure)	Hospital de Grenoble	Pâture	Gouvernement	Pâture	Commune de Saint Julien de Raz
	217	Jusson	Rochers	Hospital de Grenoble	Rochers	Gouvernement	Rochers	Commune de Saint Julien de Raz
	218	Jusson	Pâture (Gde Sure)	Hospital de Grenoble	Pâture	Gouvernement	Pâture	Commune de Saint Julien de Raz
	219	Jusson	Landes	Hospital de Grenoble	Landes	Gouvernement	Landes	Commune de Saint Julien de Raz
	220	Jusson	Pâture	Hospital de Grenoble	Pâture	Gouvernement	Pâture	Commune de Saint Julien de Raz
	221	Jusson	Pâture	Hospital de Grenoble	Pâture	Gouvernement	Pâture	Commune de Saint Julien de Raz

Commentaires : Alentours de Pierre Taillée classés en « Bois ». Occupation de la Grande Sure correspond à l'actuel : bois + pâture.

Saint Hilaire du Touvet

Section	N° Parcelle	Lieu-dit	Nature 1834	Propriétaire 1834	Nature 1913	Propriétaire 1913	Nature 1960	Propriétaire 1960
A (1^{ère} feuille)	1	Le Truc	Rochers	Commune de St-Hilaire	Rochers	Commune de St-Hilaire	Rochers	Commune de St-Hilaire
	2	Le Truc	Pâture	Commune de St-Hilaire	Pâture	Commune de St-Hilaire	Lande	Commune de St-Hilaire
	3	Le Truc	Bois de broussailles	Commune de St-Hilaire	Broussailles	Commune de St-Hilaire	Broussailles	Commune de St-Hilaire
	4	Le Truc	Bois taillis	Commune de St-Hilaire	Broussaille	Commune de St-Hilaire	Broussaille	Commune de St-Hilaire
	5	Le Truc	Pâture	Commune de St-Hilaire	Pâture	Commune de St-Hilaire	Lande	Commune de St-Hilaire
	6	Le Truc	Bois taillis	Commune de St-Hilaire	Broussailles	Commune de St-Hilaire	Lande	Commune de St-Hilaire
	7	Le Truc	Pâture	Commune de St-Hilaire	Pâture	Commune de St-Hilaire	Lande	Commune de St-Hilaire
A (2^{ème} feuille)	204	L'Herse	Bois taillis	Commune de St-Hilaire	Taillis	Commune de St-Hilaire	Taillis	Commune de St-Hilaire
	205	L'Herse	Bois taillis	Commune de St-Hilaire	Taillis	Commune de St-Hilaire	Taillis	Commune de St-Hilaire
	206	L'Herse	Pâture	Commune de St-Hilaire	Pâture	Commune de St-Hilaire	Lande	Commune de St-Hilaire
	207	L'Herse	Rochers	Commune de St-Hilaire	Rochers	Commune de St-Hilaire	Rochers	Commune de St-Hilaire
	208	L'Herse	Pâture	Commune de St-Hilaire	Pâture	Commune de St-Hilaire	Lande	Commune de St-Hilaire
	209	L'Herse	Bois taillis	Commune de St-Hilaire	Taillis	Commune de St-Hilaire	Taillis	Commune de St-Hilaire
	210	Le Tallu	Bois taillis	Commune de St-Hilaire	Taillis	Commune de St-Hilaire	Taillis	Commune de St-Hilaire
	211	Le Tallu	Bois taillis	Commune de St-Hilaire	Taillis	Commune de St-Hilaire	Taillis	Commune de St-Hilaire
	212	Le Tallu	Pâture	Commune de St-Hilaire	Pâture	Commune de St-Hilaire	Lande	Commune de St-Hilaire
	213	Le Tallu	Rochers	Commune de St-Hilaire	Rochers	Commune de St-Hilaire	Rochers	Commune de St-Hilaire
	214	Le Tallu	Bois taillis	Commune de St-Hilaire	Taillis	Commune de St-Hilaire	Taillis	Commune de St-Hilaire

Section	N° Parcelle	Lieu-dit	Nature 1834	Propriétaire 1834	Nature 1913	Propriétaire 1913	Nature 1960	Propriétaire 1960
C(2^{ème} feuille)	459	Forêt de Sauzay	Bois sapin	Le Gouvernement	Sapin	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts	Sapin	Commune de St-Hilaire
	460	Forêt de Sauzay	Bois sapin	Le Gouvernement	Sapin	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts	Sapin	Commune de St-Hilaire
	461	Forêt de Sauzay	Bois taillis	Le Gouvernement	Futaie de feuillus	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts	Futaie de feuillus	Commune de St-Hilaire
	461bis	Forêt de Sauzay	Bois taillis	Commune de St-Hilaire	Taillis	Commune de St-Hilaire	Taillis	Commune de St-Hilaire
	462	Les Terraux	Pâture	Commune de St-Hilaire	Pâture	Commune de St-Hilaire	Lande	Commune de St-Hilaire
	463	Les Terraux	Rochers	Commune de St-Hilaire	Rochers	Commune de St-Hilaire	Rochers	Commune de St-Hilaire
	464	Les Terraux	Pâture	Commune de St-Hilaire	Pâture	Commune de St-Hilaire	Lande	Commune de St-Hilaire
	465	Les Places et Baurru	Bois taillis	Commune de St-Hilaire	Taillis	Commune de St-Hilaire	Taillis	Commune de St-Hilaire
	466	Les Places et Baurru	Bois taillis	Commune de St-Hilaire	Taillis	Commune de St-Hilaire	Taillis	Commune de St-Hilaire
	469	Les Places et Baurru	Bois taillis	Commune de St-Hilaire	Taillis	Commune de St-Hilaire	Taillis	Commune de St-Hilaire
	475	Les Places et Baurru	Bois taillis	Commune de St-Hilaire	Taillis	Commune de St-Hilaire	Taillis	Commune de St-Hilaire
	476	Frangeat et Pierre Grosse	Bois taillis	Commune de St-Hilaire	Taillis	Commune de St-Hilaire	Taillis	Commune de St-Hilaire
	477	Frangeat et Pierre Grosse	Pâture	Commune de St-Hilaire	Pâture	Commune de St-Hilaire	Lande	Commune de St-Hilaire

Remarques : Section C, 2^{ème} feuille = C1 en 1939

Sarcenas

Section	N° Parcelle	Lieu-Dit	Nature 1820	Propriétaire 1820	Nature 1910-1922	Propriétaire 1910-1920	Nature 1960	Propriétaire 1960
B (Feuille unique)								
	8	Porte	Pâture	Gouvernement	Pâture	Privé	Lande	Privé
	9	Porte	Bois sapin	Gouvernement	Bois sapin	Privé	Futaie	Privé
	10	Porte	Bois sapin	Privé	Taillis	Privé	Taillis	Privé
	11	Porte	Pâture	Privé	Pâture	Privé	Lande	Privé
	16	Porte	Pâture	Privé	Pâture	Privé	Pâture (1957), Lande (1960)	Privé
	19	Chaumechaude	Bois taillis	Commune de Sarcenas	Taillis	Habitants du hameau de Monteul	Taillis	Commune de Sarcenas
	20	Chaumechaude	Bois taillis	Commune de Sarcenas	Taillis	Habitants du hameau de Monteul	Taillis	Commune de Sarcenas
	21	Chaumechaude	Pâture	Commune de Sarcenas	Pâture	Habitants du hameau de Monteul	lande	Commune de Sarcenas
	22	Chaumechaude	Rochers	Commune de Sarcenas	Pâture	Commune de Sarcenas	Lande	Commune de Sarcenas
	23	Chaumechaude	Pâture	Commune de Sarcenas	Pâture	Habitants du hameau de Monteul	Lande	Commune de Sarcenas
	25	Chaumechaude	Bois taillis	Commune de Sarcenas	Taillis	Commune de Sarcenas	Taillis	Commune de Sarcenas
	26	Chaumechaude	Bois taillis	Commune de Sarcenas	Taillis	Commune de Sarcenas	Futaie	Commune de Sarcenas
	27	Le Panon	Bois sapin	Commune de Sarcenas	Pâture	Privé (1910)	Futaie	Privé
	27 bis	Le Panon	Pâture	Commune de Sarcenas	Bois sapin	Privé (1910)	Futaie	Privé
	28	Le Panon	Bois sapin	Commune de Sarcenas	Bois sapin	Privé (1910 et 1922)	Futaie	Privé

Commentaires : feuille correspondant au talus d'éboulis de Chamechaude.

Chapareillan

Section	N° Parcelle	Lieu-Dit	Nature 1835	Propriétaire 1835	Nature 1920	Propriétaire 1920	Nature Après 1960	Propriétaire Après 1960
B								
	31		Bois	Commune Chapareillan	Bois	Commune Chapareillan	Bois	Commune Chapareillan
	32	Abymes de Grenier	Bois, broussailles	Commune Chapareillan	Bois	Commune Chapareillan	Bois	Commune Chapareillan
	33	Montagne de Grenier	Pâturage	Commune Chapareillan	Pâture et bois	Commune Chapareillan	Pâture et bois	Commune Chapareillan
	34	Montagne de l'Alpette	Pâture	Commune Chapareillan	Pâture	Commune Chapareillan	Pâture	Commune Chapareillan
	1	L'Alpette	Pâture	Commune Chapareillan	Pâture	Commune Chapareillan	Rochers	Commune Chapareillan
	2	L'Alpette	Rochers, bois taillis	Commune Chapareillan	Rochers, bois taillis	Commune Chapareillan	Rochers	Commune Chapareillan
	3	L'Alpette	Pâture	Commune Chapareillan	Pâture	Commune Chapareillan	Rochers	Commune Chapareillan
	4	L'Alpette	Pâture	Commune Chapareillan	Pâture	Commune Chapareillan	Rochers	Commune Chapareillan
	5	L'Alpette	Rochers, sapins	Commune Chapareillan	Rochers, sapins	Commune Chapareillan	Rochers	Commune Chapareillan
	6	L'Alpette	Pâture	Commune Chapareillan	Pâture	Commune Chapareillan	Rochers	Commune Chapareillan
	7	L'Alpette	Pâture, sapins	Commune Chapareillan	Pâture, sapins	Commune Chapareillan	Rochers	Commune Chapareillan
	8	L'Alpette	Pâture	Commune Chapareillan	Pâture	Commune Chapareillan	Pâture	Commune Chapareillan
	9	L'Alpette	Sapins	Commune Chapareillan	Pâture	Commune Chapareillan	Rochers	Commune Chapareillan
	11	L'Alpette	Rochers	Commune Chapareillan	Rochers	Commune Chapareillan	Rochers	Commune Chapareillan
	12	L'Alpette	Pâture, sapins	Commune Chapareillan	Pâture, sapins	Commune Chapareillan	Friches	Commune Chapareillan
	13	L'Alpette	Bois, sapins	Commune Chapareillan	Bois, sapins	Commune Chapareillan	Friches	Commune Chapareillan
	14	L'Alpette	Bois, sapins	Commune Chapareillan	Bois, sapins	Commune Chapareillan	Rochers	Commune Chapareillan

Saint Pierre de Chartreuse

Section	N° Parcelle	Lieu-Dit	Nature 1835	Propriétaire 1835	Nature 1914	Propriétaire 1914	Nature 1960	Propriétaire 1960
A (1^{ère} Feuille)	41	Le Sernet	Bois	Le Gouvernement	Bois	Hospital de Grenoble	Futaie résineuse (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (1960)
	50	Le Sernet	Pré	Le Gouvernement représenté par les Chartreux	Pré	Hospital de Grenoble	Pré	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (1960)
	64	Grand Som	Bois	Le Gouvernement	Bois	Hospital de Grenoble	Bois	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (1960)
	103	Combe du Bachaix, Récréation, St Sauveur	Rocher	Le Gouvernement représenté par les Chartreux	Rocher	Hospital de Grenoble	Rocher (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (1960)
	104	Mauvernay	Rocher	Le Gouvernement	Rocher	Hospital de Grenoble	Rocher (1972)	Etat représenté par l'Ordre des Pères Chartreux (1972)
	105	Mauvernay	Pré	Hôpital de Grenoble	Pâture	Hospital de Grenoble	Lande (1972)	Etat représenté par l'Ordre des Pères Chartreux (1972)
	106	Mauvernay	Bois	Le Gouvernement	Bois	Hospital de Grenoble	Futaie mélangée (1972)	Etat représenté par l'Ordre des Pères Chartreux (1972)
	107	Mauvernay	Pré	Hospital de Grenoble	Pâture	Hospital de Grenoble	Lande (1972)	Etat représenté par l'Ordre des Pères Chartreux (1972)
	108	Mauvernay	Pâture-rochers	Hospital de Grenoble	Pâture-rochers	Hospital de Grenoble	Rochers (1972)	Etat représenté par l'Ordre des Pères Chartreux (1972)
	109	Mauvernay	Bois	Le Gouvernement	Bois	Hospital de Grenoble	Futaie résineuse (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (1960)
	110	Mauvernay	Pâture	Hospital de Grenoble	Pâture	Hospital de Grenoble	Lande (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (1960)
	111	Mauvernay	Habert-Pâture	Hospital de Grenoble	Habert-Pâture	Hospital de Grenoble	Lande (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (1960)
	112	Mauvernay	Pâture	Hospital de Grenoble	Pâture	Hospital de Grenoble	Lande (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (1960)
	113	Mauvernay	Terre vaine	Hospital de Grenoble	Terre vaine	Hospital de Grenoble	Lande (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (1960)
	114	Mauvernay	Pâture	Hospital de Grenoble	Pâture	Hospital de Grenoble	Lande (1972)	Etat représenté par l'Ordre des Pères Chartreux (1972)
	115	Le Som	Rocher	Hospital de Grenoble	Rocher nu	Hospital de Grenoble	Rocher (1972)	Etat représenté par l'Ordre des Pères Chartreux (1972)
	116	Le Som	Pâture-rochers	Commune de St Pierre	Pâture-rochers	Commune de St Pierre	Rocher (1972)	Commune de St Pierre
	117	Le Som	Pâture	Hospital de Grenoble	Pâture	Hospital de Grenoble	Lande (1972)	Etat représenté par l'Ordre des Pères Chartreux (1972)
	118	Le Som	Pâture-rochers	Hospital de Grenoble	Pâture-rochers	Hospital de Grenoble	Rocher (1972)	Etat représenté par l'Ordre des Pères Chartreux (1972)
	119	Le Som	Pâture-rochers	Hospital de Grenoble	Pâture-rochers	Hospital de Grenoble	Rocher (1972)	Etat représenté par l'Ordre des Pères Chartreux (1972)
	120	Le Som	Pâture	Hospital de Grenoble	Pâture	Hospital de Grenoble	Rocher (1972)	Etat représenté par l'Ordre des Pères Chartreux (1972)
	121	Le Som	Pâture-rochers	Hospital de Grenoble	Pâture-rochers	Hospital de Grenoble	Rocher (1972)	Etat représenté par l'Ordre des Pères Chartreux (1972)

	122	Bouvina	Terre vaine	Hospital de Grenoble	Terre vaine	Hospital de Grenoble	Rocher (1972)	Etat représenté par l'Ordre des Pères Chartreux (1972)
	123	Bouvina	Pâture	Hospital de Grenoble	Pâture	Hospital de Grenoble	Lande (1972)	Etat représenté par l'Ordre des Pères Chartreux (1972)
	124	Bouvina	Pré	Hospital de Grenoble	Pâture	Hospital de Grenoble	Lande (1972)	Etat représenté par l'Ordre des Pères Chartreux (1972)
	125	Bouvina	Pâture	Hospital de Grenoble	Pâture			
	126	Bouvina	Pâture	Hospital de Grenoble	Pâture	Hospital de Grenoble	Lande (1972)	Etat représenté par l'Ordre des Pères Chartreux (1972)
	127	Bouvina	Pâture-rochers	Hospital de Grenoble	Pâture-rochers	Hospital de Grenoble	Rochers (1972)	Etat représenté par l'Ordre des Pères Chartreux (1972)
	129	Bouvina	Pré	Hospital de Grenoble	Pâture	Hospital de Grenoble	Lande (1972)	Etat représenté par l'Ordre des Pères Chartreux (1972)
	130	Bouvina	Terre vaine	Hospital de Grenoble	Terre vaine	Hospital de Grenoble	Rocher (1972)	Etat représenté par l'Ordre des Pères Chartreux (1972)

Section	N° Parcelle	Lieu-Dit	Nature 1834	Propriétaire 1834	Nature 1914	Propriétaire 1914	Nature 1960	Propriétaire 1960
A (3^{ème} Feuille)	281	La Suiffière	Broussailles	Commune de St-Pierre	Rocher	St Pierre	Rochers (1960)	Commune de St-Pierre
	342	Le Plat, Grd Charvet et la Combe	Terre labourable	Privé	Terre	Privé	Pâture (1939-1960)	Privé
	343	Le Plat, Grd Charvet et la Combe	Pâture	Privé	Pâture	Privé	Terre vaine (1948), Rocher (1964)	Privé
	344	Le Plat, Grd Charvet et la Combe	Terre labourable	Privé	Terre labourable	Privé	Bois (1948), Futaie mélangée (1964)	Privé
	346	Le Plat, Grd Charvet et la Combe	Bat. Ruraux à la Coche	Privé	Bat. Ruraux à la Coche	Privé	Pâture (1939-1960)	Privé
	348	Le Plat, Grd Charvet et la Combe	Terre labourable	Privé	Terre labourable	Privé	Pâture (1948), Lande (1964)	Privé
	349		Pré	Privé	Grange	Privé	Grange (1948), Sol (1964)	Privé
	350	Le Plat, Grd Charvet et la Combe	Terre labourable	Privé	Lande	Privé	Bois (1948), futaie mélangée (1964)	Privé
	351	Le Plat, Grd Charvet et la Combe	Terre labourable	Privé	Bois	Privé	Bois (1948), futaie mélangée (1964)	Privé
	351bis	Le Plat, Grd Charvet et la Combe	Bois	Privé	Bois	Privé	Bois sapin (1948), Futaie résineuse (1964)	Privé
	569	Le Plenay	Rocher	Commune de St-Pierre	Rocher	St Pierre	Rocher (1960)	Commune de St-Pierre
	570	Le Plenay	Bois	Commune de St-Pierre	Bois	St Pierre	Futaie mélangée (1960)	Commune de St-Pierre
	571	Le Plenay	Pâture	Commune de St-Pierre	Pâture	St Pierre	Lande (1960)	Commune de St-Pierre
	572	Rochas May	Bois	Commune de St-Pierre	Bois	St Pierre	Futaie mélangée (1960)	Commune de St-Pierre
	573	Rochas May	Pâture	Commune de St-Pierre	Pâture	St Pierre	Lande (1960)	Commune de St-Pierre
	574	Rochas May	Bois	Commune de St-Pierre	Bois	St Pierre	Futaie mélangée (1960)	Commune de St-Pierre

Section	N° Parcelle	Lieu-Dit	Nature 1834	Propriétaire 1834	Nature 1914	Propriétaire 1914	Nature 1960	Propriétaire 1960
B (5 ^{ème} Feuille)								
	1429	Malacôte	Pâtûre	Hospital de Grenoble	Pâtûre	Hospital de Grenoble	Lande (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et forêts
	1430	Malacôte	Pâtûre	Hospital de Grenoble	Pâtûre	Hospital de Grenoble	Lande (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et forêts
	1431	Malacôte	Bois	Gouvernement	Bois	Hospital de Grenoble	Futaie mélangée (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et forêts
	1432	Malacôte	Bois	Gouvernement	Bois	Hospital de Grenoble	Futaie mélangée (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et forêts
	1433	Malacôte	Pierriers	Gouvernement	Pierriers	Hospital de Grenoble	Rochers (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et forêts
	1434	Malacôte	Rocher (pâtûre raturé)	Hospital de Grenoble	Rocher	Hospital de Grenoble	Rochers (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et forêts
	1435	Bellefont	Pâtûre	Hospital de Grenoble	Pâtûre	Hospital de Grenoble	Lande (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et forêts
	1436	Bellefont	Pâtûre et rochers	Hospital de Grenoble	Pâtûre et rochers	Hospital de Grenoble	Rochers (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et forêts
	1437	Bellefont	Bois et rochers	Gouvernement	Bois et rochers	Hospital de Grenoble	Rochers (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et forêts
	1438	Bellefont	Pâtûre et rochers	Hospital de Grenoble	Pâtûre et rochers	Hospital de Grenoble	Rochers (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et forêts
	1439	Bellefont	Bois et rochers	Gouvernement	Pâtûre	Hospital de Grenoble	Lande (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et forêts
	1440	Le Prayet	Pâtûre	Hospital de Grenoble	Pâtûre	Hospital de Grenoble	Lande (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et forêts
	1441	Le Prayet	Pâtûre	Hospital de Grenoble	Pâtûre	Hospital de Grenoble	Lande (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et forêts
	1442	Le Grand Som	Pâtûre	Gouvernement pour bois et rochers et Hospital de Grenoble pour la pâtûre	Pâtûre	Hospital de Grenoble	Lande (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et forêts
	1443	Le Grand Som	Bois et rochers	Gouvernement	Pâtûre	Hospital de Grenoble	Lande (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et forêts
	1444	Le Grand Som	Terre vaine (pâtûre et rocher raturés)	Hospital de Grenoble	Terre vaine	Hospital de Grenoble	Lande (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et forêts
	1445	La Rajas	Pâtûre et bois	Commune de St-Pierre	Pâtûre-bois	Commune de St-Pierre	Lande (1960)	Commune de St-Pierre
	1446	La Rajas	Terre vaine	Commune de St-Pierre	Terre vaine	Commune de St-Pierre	Lande (1960)	Commune de St-Pierre
	1447	La Rajas	Bois	Commune de St-Pierre	Bois	Commune de St-Pierre	Futaie mélangée (1960)	Commune de St-Pierre
	1448	La Rajas	Bois	Commune de St-Pierre	Bois	Commune de St-Pierre	Futaie mélangée (1960)	Commune de St-Pierre
	1449	Barbe Bison	Bois	Privés	Bois	Privé (1)	Futaie résineuse (1960)	Privé
	1450	Barbe Bison	Pâtûre	Privés	Pâtûre	Privé (13)	Lande (1960)	Privé
	1451	Barbe Bison	Grange et sol	Privé	Grange	Privé	Sol (1960)	Privé
	1452	Barbe Bison	Bois	Privé	Bois	Privé	Futaie résineuse (1960)	Privé
	1453	Barbe Bison	Bois	Privé	Bois	Privé	Futaie résineuse (1960)	Privé
	1454	Barbe Bison	Bois	Privé	Bois	Privé	Futaie résineuse (1960)	Privé
	1455	Plat du Guiers	Bois	Commune de St-Pierre	Bois	Privé	Futaie mélangée (1960)	Commune de St-Pierre
	1456	Plat du Guiers	Bois	Privé	Bois	privé	Futaie résineuse (1960)	Privé
	1457	Source du Guiers	Bois	Privé	Bois taillis	Privé	Futaie mélangée (1960)	Privé

	1458	Source du Guiers	Bois	Commune de St-Pierre	Bois	Commune de St-Pierre	Futaie mélangée (1960)	Commune de St-Pierre
	1459	La Repose et dessous Gd Rocher du Prayer	Pâture	Commune de St-Pierre	Pâture	Commune de St-Pierre	Lande	Commune de St-Pierre
	1460	La Repose et dessous Gd Rocher du Prayer	Bois	Commune de St-Pierre	Bois	Commune de St-Pierre	Bois	Commune de St-Pierre

Section	N° Parcelle	Lieu-Dit	Nature 1834	Propriétaire 1834	Nature 1914	Propriétaire 1914	Nature 1960	Propriétaire 1960
D (4^{ème} Feuille)								
	797	Les Joyeux	Bois	Entremont la ci-devant commune	Bois	Entremont la ci-devant commune	Futaie résineuse (1960)	Commune de St-Pierre
	797bis	Les Joyeux	Rochers	Entremont la ci-devant commune	Rochers	Entremont la ci-devant commune	Rochers (1960)	Commune de St-Pierre
	798	La Buffe	Bois	Privé	Bois	Privé	Futaie résineuse (1960)	Privé
	799	La Buffe	Bois	Entremont la ci-devant commune	Bois	Privé	Futaie résineuse	Commune de St-Pierre
	800	La Buffe	Terre vaine	Entremont la ci-devant commune	Terre vaine	Privé	Lande (1960)	Commune de St-Pierre
	801	La Buffe	Pâture	Privé	Pâture	Privé	Lande (1960)	Privé
	802	La Buffe	Bois (pâturé raturé)	Privé	Bois	Privé	Futaie mélangée (1960)	Privé
	803	La Buffe	Habert	Privé	Habert	Privé	Sol (1960)	Privé
	804	La Buffe	Bois	Entremont la ci-devant commune	Bois	Entremont la ci-devant commune	Futaie résineuse (1960)	Commune de St
	805	La Buffe	Bois	Entremont la ci-devant commune	Bois	Entremont la ci-devant commune	Futaie résineuse (1960)	Commune de St
	806	La Buffe	Pâture	Privé (2)	Pâture	Privé	Lande (1960)	Privé
	807	La Roche du Midi	Pâture	Entremont la ci-devant commune	Pâture	Entremont la ci-devant commune	Lande (1960)	Commune de St-Pierre
	808	La Roche du Midi	Rochers	Entremont la ci-devant commune	Rochers	Entremont la ci-devant commune	Lande (1960)	Commune de St-Pierre
	809	La Roche du Midi	Pâture	Entremont la ci-devant commune	Pâture	Entremont la ci-devant commune	Lande (1960)	Commune de St-Pierre
	810	La Roche du Midi	Rochers (bois raturé)	Entremont la ci-devant commune	Rochers (bois raturé)	Entremont la ci-devant commune	Lande (1960)	Commune de St-Pierre
	811	La Roche du Midi	Rochers	Entremont la ci-devant commune	Rochers	Entremont la ci-devant commune	Lande (1960)	Commune de St-Pierre
	812	La Roche du Midi	Bois	Entremont la ci-devant commune	Bois	Entremont la ci-devant commune	Futaie mélangée (1960)	Commune de St-Pierre
	813	La Roche du Midi	Bois	Entremont la ci-devant commune	Bois	Entremont la ci-devant commune	Futaie mélangée (1960)	Commune de St-Pierre
	814	La Roche du Midi	Bois	Entremont la ci-devant commune	Bois	Entremont la ci-devant commune	Futaie mélangée (1960)	Commune de St-Pierre
	815	La Roche du Midi	Terre vaine	Entremont la ci-devant commune	Terre vaine	Entremont la ci-devant commune	Lande (1960)	Commune de St-Pierre
	816	La Roche du Midi	Pâture	Entremont la ci-devant commune	Pâture	Entremont la ci-devant commune	Lande (1960)	Commune de St-Pierre
	818	Combe mercier	Bois	Privé			Futaie résineuse (1960)	Privé

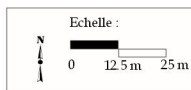
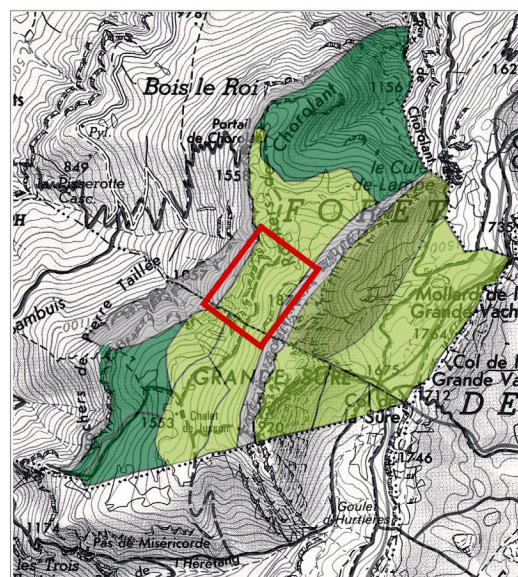
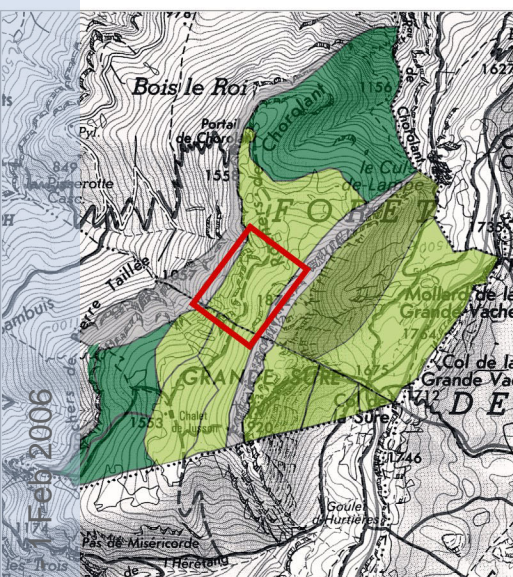
	819	Combe mercier	Bois	Privé	Bois	Privé	Bois (1960)	Privé
	820	Combe mercier	Bois	Privé	Bois	Privé	Futaie résineuse (1960)	Privé
	821	Combe mercier	Bois	Privé	Bois	Privé	Futaie résineuse (1960)	Privé
	822	Combe mercier	Bois	Gouvernement	Bois	Privé	Futaie résineuse (1960)	Privé
	822bis	Combe mercier	Bois	Privé	Bois	Privé	Futaie résineuse (1960)	Privé
	823	Combe mercier	Bois	Entremont la ci-devant commune			Futaie résineuse (1960)	Commune de St-Pierre
	823bis	Combe mercier	Bois	Privé (cottave)	Bois	Privé	Futaie résineuse (1960)	Privé
	824	Combe mercier	Bois	Privé	Bois	Privé	Futaie résineuse (1960)	Privé
	825	Combe mercier	Bois	Privé	Bois	Privé	Futaie résineuse (1960)	Privé
	826	Combe mercier	Bois	Privé	Bois	Privé	Futaie résineuse (1960)	Privé
	826bis	Combe mercier	Bois	Privé	Bois	Privé	Futaie résineuse (1960)	Privé
	827	Combe mercier	Broussaille+pâturage	Privé	Bois	Privé	Futaie résineuse (1960)	Privé
	828	Combe mercier	Bois	Privé	Bois	Privé	Futaie résineuse (1960)	Privé
	829	Combe mercier	Bois	Privé	Bois	Privé	Futaie résineuse (1960)	Privé
	830	Combe mercier	Bois	Privé	Bois	Privé	Futaie résineuse (1960)	Privé

Section	N° Parcelle	Lieu-Dit	Nature 1834	Propriétaire 1834	Nature 1920	Propriétaire 1920	Nature Après 1920	Propriétaire Après 1920
F (1^{ère} Feuille)								
	1	Genieux, la Charmette et Tenaïson	Pâturage	Gouvernement	Pâturage	Hospital de Grenoble	Lande (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts
	2	Genieux, la Charmette et Tenaïson	Pâturage et rochers	Gouvernement	Pâturage et rochers	Hospital de Grenoble	Rochers (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (à partir de 1920)
	3	Genieux, la Charmette et Tenaïson	Pâturage	Gouvernement	Pâturage	Hospital de Grenoble	Lande (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (à partir de 1920)
	4	Genieux, la Charmette et Tenaïson	Pâturage et rochers	Gouvernement	Pâturage et rochers	Hospital de Grenoble	Rochers (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (à partir de 1920)
	5	Genieux, la Charmette et Tenaïson	Pâturage et rochers	Gouvernement	Pâturage et rochers	Hospital de Grenoble	Rochers (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (à partir de 1920)
	6	Genieux, la Charmette et Tenaïson	Bois	Gouvernement	Pâturage	Hospital de Grenoble	Lande (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (à partir de 1920)
	7	La Charmette	Pâturage	Gouvernement	Pâturage	Hospital de Grenoble	Lande (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (à partir de 1920)
	8	La Charmette	Habert	Hospital de Grenoble	Habert	Hospital de Grenoble	Sol (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (à partir de 1920)
	9	La Charmette	Pâturage	Hospital de Grenoble	Pâturage	Hospital de Grenoble	Lande (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (à partir de 1920)
	10	Tenaïson	Pâturage	Hospital de Grenoble	Pâturage	Hospital de Grenoble	Lande (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (à partir de 1920)
	11	Tenaïson	Pâturage	Hospital de Grenoble	Pâturage	Hospital de Grenoble	Lande (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (à partir de 1920)
	12	Tenaïson	Pâturage	Hospital de Grenoble	Pâturage	Hospital de Grenoble	Lande (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (à partir de 1920)
	13	Tenaïson	Pâturage	Hospital de Grenoble	Pâturage	Hospital de Grenoble	Lande (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (à partir de 1920)
	14	Tenaïson	Pâturage	Hospital de Grenoble	Pâturage	Hospital de Grenoble	Lande (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (à partir de 1920)
	15	Tenaïson	Bois	Hospital de Grenoble	Bois	Hospital de Grenoble	Futaie résineuse (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (à partir de 1920)
	16	Tenaïson	Pâturage	Hospital de Grenoble	Pâturage	Hospital de Grenoble	Lande (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (à partir de 1920)





	17	Tenaison	Habert et écuries	Hospital de Grenoble	Masure et pré	Hospital de Grenoble	Sol (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (à partir de 1920)
	18	Tenaison	Bois	Gouvernement	Bois	Hospital de Grenoble	Futaie résineuse (1960)	Etat par l'Administration des Eaux et Forêts (à partir de 1920)

1820-1914

1914-1960



Classes d'occupation du sol

-  Bois
-  Pâture/rochers
-  Pâture
-  Rochers

Sources : Plans et matrices cadastraux napoléoniens (Archives Départementales de l'Isère).

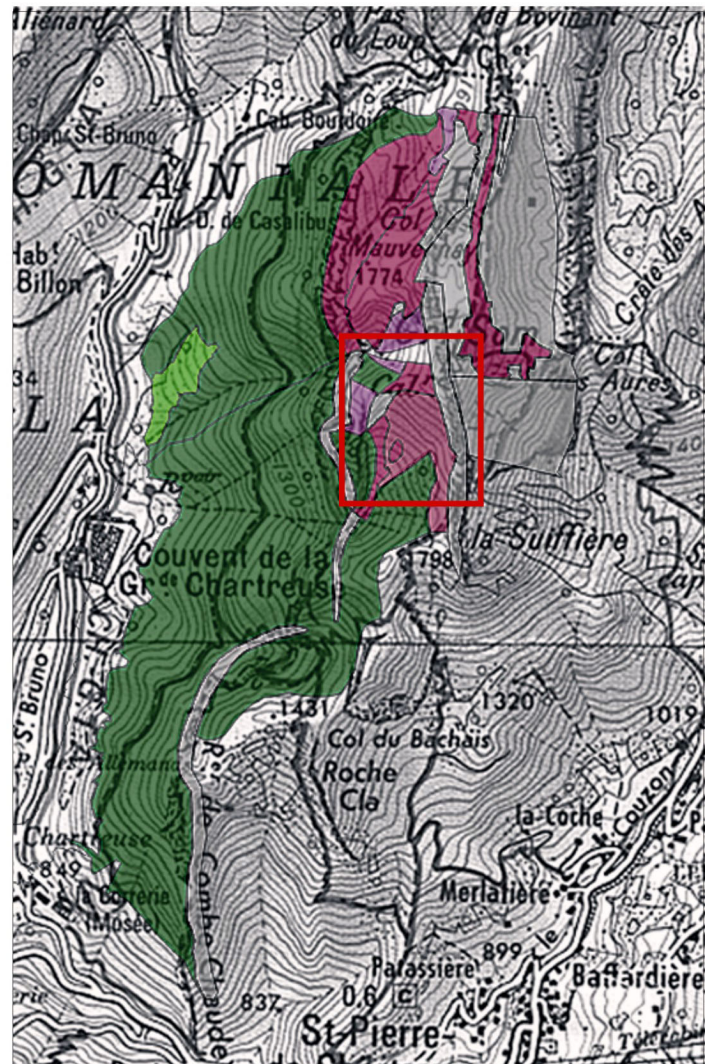
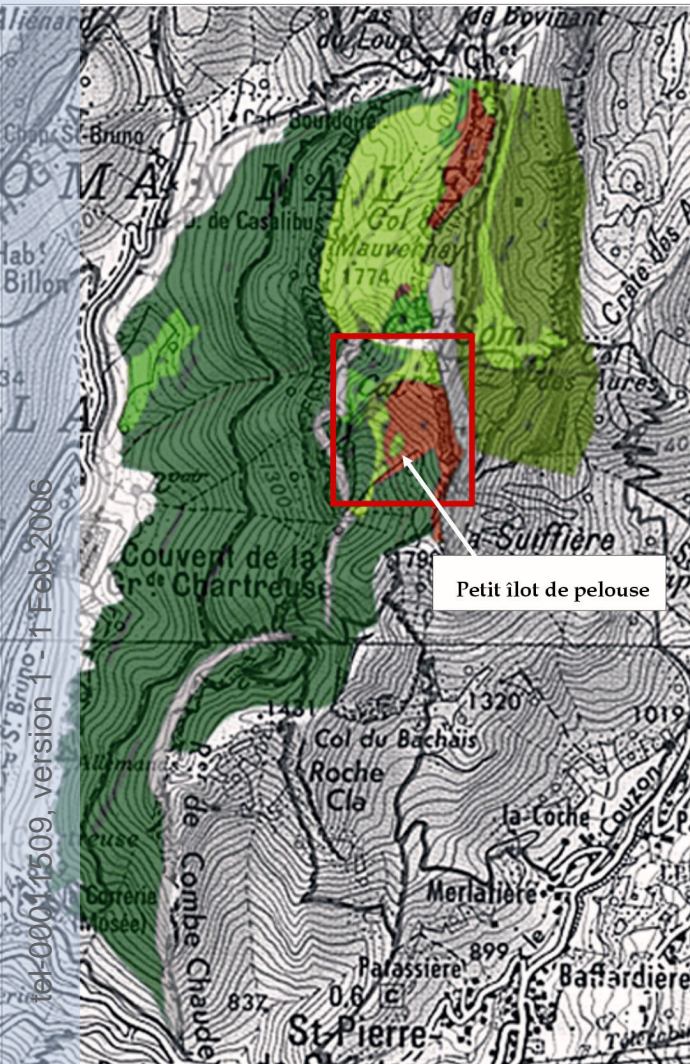
-Section C (2ème feuille), commune de Saint-Julien-de-Raz.

-Section D (4ème feuille), commune de Saint-Joseph-de-Rivière.

Evolution de l'occupation des sols sur les "hauts" de versants du Grand Som sur la période 1820-1960.

1820-1914

1914-1960

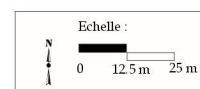


Classes d'occupation du sol

Classes d'occupation du sol (évolution)

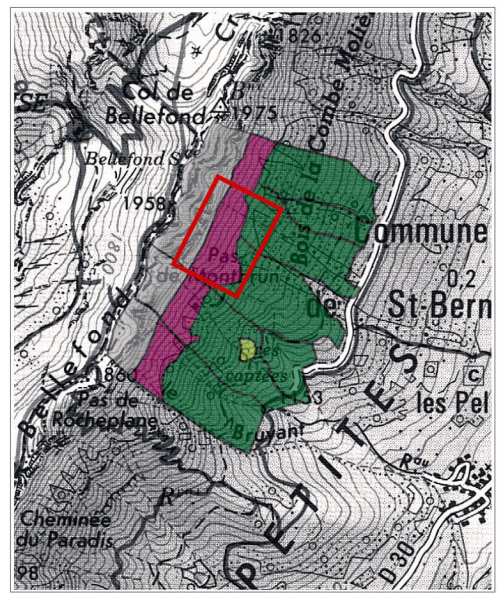
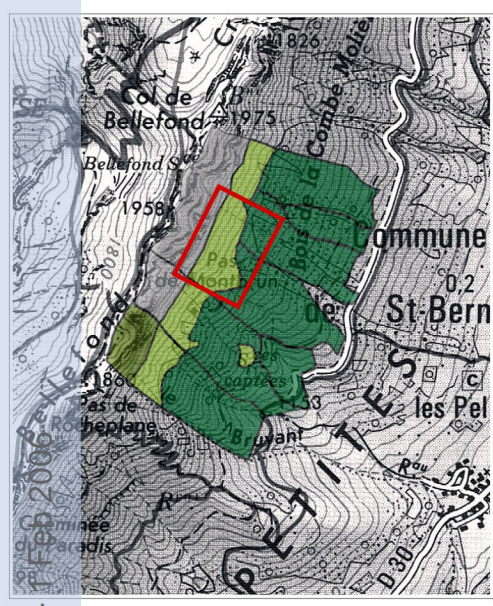
- Bois
- Pâturer/rochers
- Pré
- Pâturer
- Terre vaine
- Rochers

- Pâturer-lande
- Pâturer-pré-lande
- Pâturer-pré-pâturer



1820-1914

1914-1960



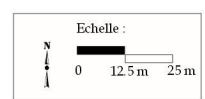
tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2006

Classes d'occupation du sol

- Bois
- Pâture/rochers
- Pâture
- Rochers

Classes d'occupation du sol (évolution)

- Pâture-lande

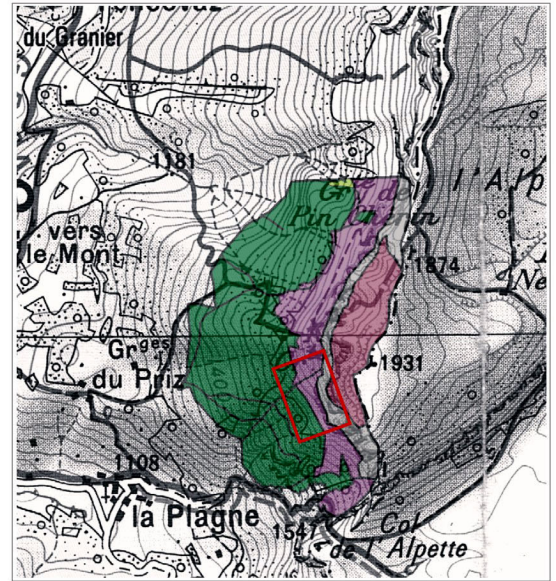
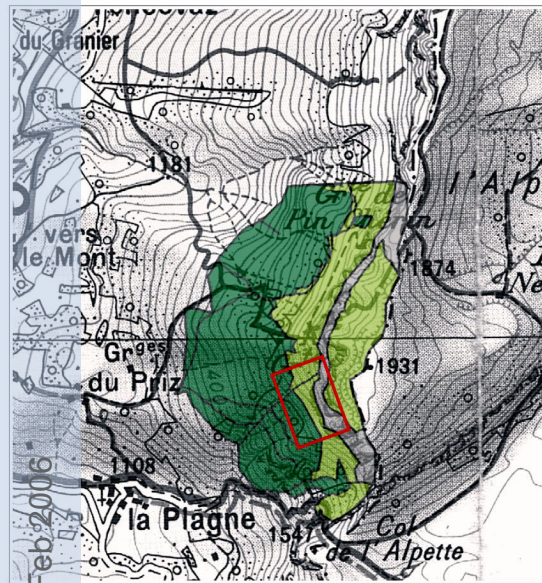


Sources : Plans et matrices cadastraux napoléoniens (Archives Départementales de l'Isère).

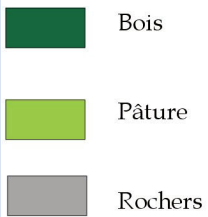
-Section B (1ère feuille), commune de Saint-Bernard-du-Touvet.

1820-1914

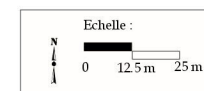
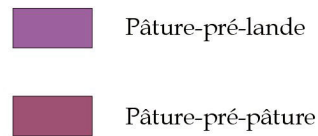
1914-1960



Classes d'occupation du sol



Classes d'occupation du sol (évolution)



Sources : Plans et matrices cadastraux napoléoniens (Archives Départementales de la Savoie).

-Section F (2ème feuille), commune d'Entremont-le-Vieux.

tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2006

Annexe B : Carte diachronique de l'évolution de la physionomie végétale des talus d'éboulis de la Dent de Crolles à l'Alpette entre 1956 et 1993.

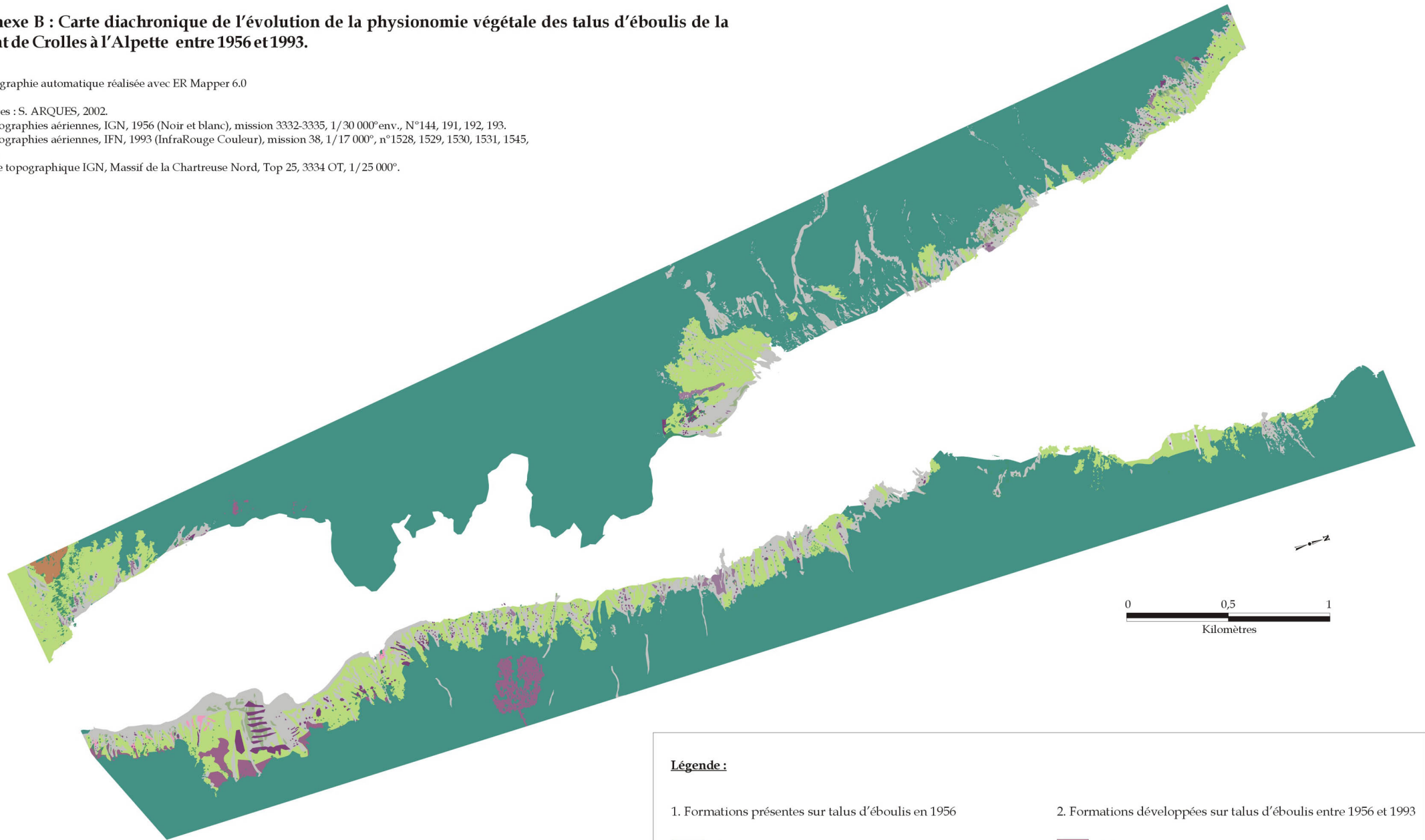
Cartographie automatique réalisée avec ER Mapper 6.0

Sources : S. ARQUES, 2002.

-Photographies aériennes, IGN, 1956 (Noir et blanc), mission 3332-3335, 1/30 000°env., N°144, 191, 192, 193.





-Photographies aériennes, IFN, 1993 (InfraRouge Couleur), mission 38, 1/17 000°, n°1528, 1529, 1530, 1531, 1545, 1546.

-Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Nord, Top 25, 3334 OT, 1/25 000°.







Légende :

1. Formations présentes sur talus d'éboulis en 1956

-  Pelouse
-  Piquetage herbacé
-  Piquetage arbustif
-  Forêt

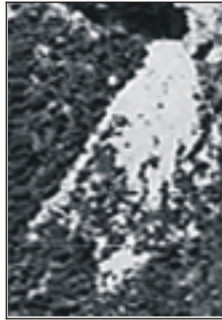
2. Formations développées sur talus d'éboulis entre 1956 et 1993

-  Pelouse
-  Piquetage herbacé
-  Piquetage arbustif
-  Forêt

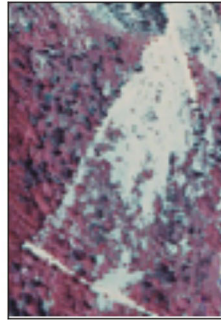
ANNEXE C : Documents photographiques

Cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil

1956



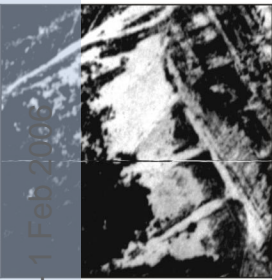
1993



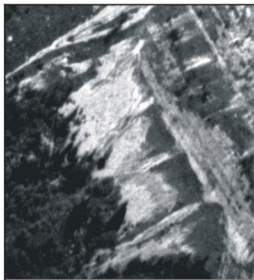
2001



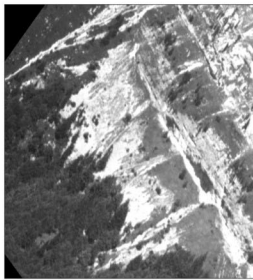
1911



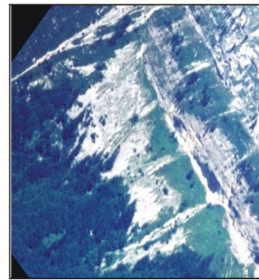
1978



2001



2001

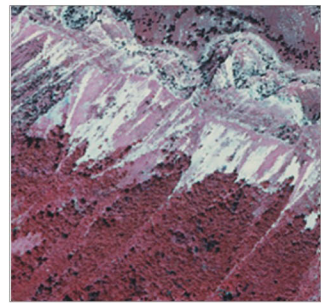


Tablier d'éboulis de La Plagne

1956

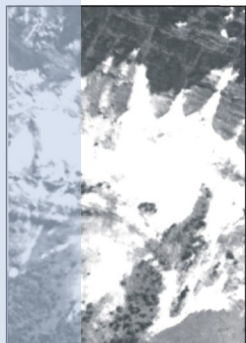


1993

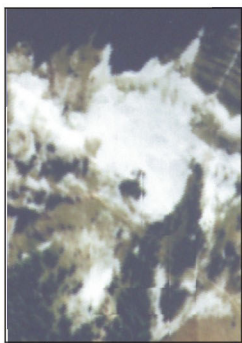


Tablier d'éboulis des Pelloux

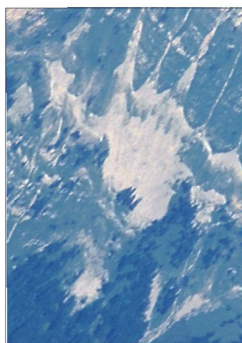
1956



2003



2003

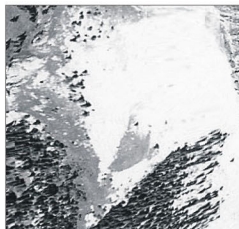


Tablier d'éboulis de la Grande Sure

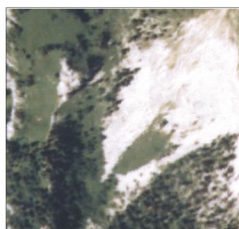
1920



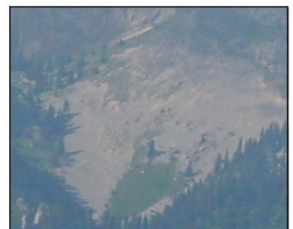
1956



2001



2001



Talus d'éboulis du Grand Som

tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2016

ANNEXE D : Granulométrie de surface

Tablier d'éboulis de La Plagne

Transect TA (moyennes)	L ≤ 20 mm	2 < L ≤ 5 cm	5 < L ≤ 10 cm	10 < L ≤ 25 cm	25 < L ≤ 50 cm	L > 50 cm	Somme
Placettes							
4-7	0	0	8,77	17,08	32,29	54,57	112,71
14-17	0	4,59	8,09	17,40	35,41	56,77	122,26
24-27	0	4,55	7,67	16,19	28,51	0,00	56,92
34-37	0	4,11	7,76	16,29	32,30	0,00	60,46
44-47	1,47	3,3	7,26	14,29	0,00	0,00	26,32

Transect TA (%)	L ≤ 20 mm	2 < L ≤ 5 cm	5 < L ≤ 10 cm	10 < L ≤ 25 cm	25 < L ≤ 50 cm	L > 50 cm	Somme
Placettes							
4-7	0	0	7,78	15,15	28,65	48,42	100
14-17	0	3,75	6,61	14,24	28,96	46,44	100
24-27	0	8	13,47	28,44	50,09	0,00	100
34-37	0	6,8	12,84	26,94	53,42	0,00	100
44-47	5,6	12,53	27,58	54,29	0,00	0,00	100

Transect TB (moyennes)	L ≤ 20 mm	2 < L ≤ 5 cm	5 < L ≤ 10 cm	10 < L ≤ 25 cm	25 < L ≤ 50 cm	L > 50 cm	Somme
Placettes							
54-57	0	3,48	8,12	16,54	32,80	0,00	60,94
64-67	0	0	7,58	16,67	32,44	64,70	121,39
74-77	0	4,28	7,75	17,31	34,26	61,74	125,34
84-87	0	3,24	8,33	18,04	32,16	53,95	115,72

Transect TB (%)	L ≤ 20 mm	2 < L ≤ 5 cm	5 < L ≤ 10 cm	10 < L ≤ 25 cm	25 < L ≤ 50 cm	L > 50 cm	Somme
Placettes							
54-57	0	5,71	13,32	27,14	53,83	0,00	100
64-67	0	0	6,25	13,73	26,72	53,30	100
74-77	0	3,42	6,18	13,81	27,34	49,25	100
84-87	0	2,79	7,19	15,58	27,81	46,63	100

Transect TC (moyennes)	L ≤ 20 mm	2 < L ≤ 5 cm	5 < L ≤ 10 cm	10 < L ≤ 25 cm	25 < L ≤ 50 cm	L > 50 cm	Somme
Placettes							
94-97	0	4,96	7,45	18,47	30,81	56,74	118,43
104-107	0	0	8,44	16,22	29,12	0,00	53,78
114-117	0,98	3,59	7,42	14,89	29,17	0,00	56,05

Transect TC (%)	L ≤ 20 mm	2 < L ≤ 5 cm	5 < L ≤ 10 cm	10 < L ≤ 25 cm	25 < L ≤ 50 cm	L > 50 cm	Somme
Placettes							
94-97	0	4,2	6,5	15,60	25,78	47,92	100
104-107	0	0	15,7	30,15	54,15	0,00	100
114-117	1,76	6,4	13,23	26,57	52,04	0,00	100

Transect TD (moyennes)	L ≤ 20 mm	2 < L ≤ 5 cm	5 < L ≤ 10 cm	10 < L ≤ 25 cm	25 < L ≤ 50 cm	L > 50 cm	Somme
Placettes							
124-127	0	4,42	8,06	16,41	29,42	0,00	58,31
134-137	1,41	3,53	7,29	15,98	30,89	0,00	59,1
144-147	1,62	3,29	7,3	15,94	30,61	70,91	129,67
154-157	0	4,62	8,09	16,08	32,21	63,25	124,25
164-167	2	3,84	7,77	16,68	30,86	0,00	61,15
174-177	1,61	2,93	6,81	14,71	35,58	0,00	61,64
184-187	1,39	3,23	6,53	14,50	39,09	61,78	126,52

Transect TD (%)	L ≤ 20 mm	2 < L ≤ 5 cm	5 < L ≤ 10 cm	10 < L ≤ 25 cm	25 < L ≤ 50 cm	L > 50 cm	Somme
Placettes							
124-127	0	7,58	13,82	28,15	50,45	0,00	100
134-137	2,39	5,97	12,34	27,04	52,26	0,00	100
144-147	1,26	2,54	5,62	12,30	23,60	54,68	100
154-157	0	3,71	6,52	12,95	25,92	50,90	100
164-167	3,27	6,27	12,72	27,28	50,46	0,00	100
174-177	2,62	4,75	11,04	23,87	57,72	0,00	100
184-187	1,09	2,55	5,16	11,47	30,90	48,83	100

Cône de l'Aulp du Seuil

Transect TA (moyennes)	L ≤ 20 mm	2 < L ≤ 5 cm	5 < L ≤ 10 cm	10 < L ≤ 25 cm	25 < L ≤ 50 cm	L > 50 cm	Somme
Placettes							
1 - 14	1,81	3,73	7,44	17,32	37,74	74,31	142,35
17-29	1,49	3,92	7,76	15,94	34,05	52,87	116,03
31-44	0	4	7,24	15,90	30,65	93,30	151,09
45-53	1,56	3,51	6,71	15,54	34,84	60,62	122,78
54-62	1,6	3,43	7,2	14,41	29,76	80,80	137,2
63-72	1,63	3,43	7,17	13,80	28,86	58,62	113,51

Transect TA (%)	L ≤ 20 mm	2 < L ≤ 5 cm	5 < L ≤ 10 cm	10 < L ≤ 25 cm	25 < L ≤ 50 cm	L > 50 cm	Somme
Placettes							
1 - 14	1,28	2,62	5,22	12,16	26,52	52,20	100
17-29	1,28	3,37	6,69	13,74	29,35	45,57	100
31-44	0	2,64	4,79	10,52	20,29	61,76	100
45-53	1,28	2,86	5,46	12,66	28,37	49,37	100
54-62	1,57	2,5	5,24	10,50	21,29	58,90	100
63-72	1,44	3,03	6,31	12,15	25,43	51,64	100

Transect TB (moyennes)	L ≤ 20 mm	2 < L ≤ 5 cm	5 < L ≤ 10 cm	10 < L ≤ 25 cm	25 < L ≤ 50 cm	L > 50 cm	Somme
Placettes							
73-74	1,76	3,78	6,84	13,83	0	0	26,21
75-76	0	3,33	6,87	16,79	0	87,87	114,86
77-78	0	4,97	6,85	15,49	29,74	50,18	107,23
79-80	1,82	3,52	7,08	15,26	44,62	60,8	133,1
81-82	0	4,14	6,61	13,75	29,5	0	54
83-84	0	3,87	6,73	13,15	0	0	23,75

Transect TB (%)	L ≤ 20 mm	2 < L ≤ 5 cm	5 < L ≤ 10 cm	10 < L ≤ 25 cm	25 < L ≤ 50 cm	L > 50 cm	Somme
Placettes							
73-74	6,71	14,42	26,1	52,77	0	0	100
75-76	0	2,89	5,99	14,62	0	76,5	100
77-78	0	4,63	6,4	14,45	27,73	46,79	100
79-80	1,37	2,65	5,32	11,46	33,52	45,68	100
81-82	0	7,66	12,25	25,46	54,63	0	100
83-84	0	16,3	28,34	55,36	0	0	100

ANNEXE E : Géodynamique de surface et marquages (déstructuration et vitesses de déplacement) - Données brutes - Tablier de La Plagne

Marquage	Référentiel	GPS	Type	Taille	Couleur	Pente (en °)	Granulométrie moyenne (cm)	Présence végétale	Mise en place	P1 - 11/01-03/02 Déstructuration (%)	Vitesse (en cm)	P2 - 03/02-10/02 Déstructuration (%)	Vitesse (cm)	Total P1+P2 11/01-10/02 Déstructuration (%)
Z1BR1	N	45,44794 5.91634 (19m)	Bande	70x10	rouge	30	2	O	19/11/2001	20	5,60	*		20
Z1BJ1	N	45,94792 5.91643 (17m)	Bande	40x10	jaune	24	3	O	19/11/2001	3	0,66	*		3
Z1BR2	O	45,44775 5.91658 (25m)	Bande	70x10	rouge	34	1,5	N	19/11/2001	60	22,00	*		60
Z1BJ2	N	45,14769 5.91642 (26m)	Bande	70x10	jaune	21	8	O	19/11/2001	56	4,50	4	45,20	60
Z1BR3	N	45,44799 5.91684 (14m)	Bande	70x10	rouge	36	2	O	19/11/2001	19	6,66	55	68,25	74
Z1BJ3	N	45,44798 5.91693 (15m)	Bande	70x10	jaune	40	5	O	19/11/2001	24	2,00	2		26
Z1BR4	N	*	Bande	70x10	rouge	25	8	O	19/11/2001	15	6,30	35	20,66	50
Z1BR7	N	45,44796 5.91701 (12 m)	Bande	40x10	rouge	28	1	O	19/11/2001	55	42,00	40	23,40	95
Z1BR5	N	45,44759 5.91702 (17 m)	Bande	70x10	rouge	27	10	O	19/11/2001	5 (MR)	0,50	*	*	5
Z1BR6	N	45,44760 5.91706 (12m)	Bande	70x10	rouge	20	15	O	19/11/2001	0 (MR)	0,00	*	*	0
Z1BJ4	N	45,44758 5.91696 (18m)	Bande	70x10	jaune	35	15	O	19/11/2001	0 (MR)	0,00	*	*	0
Z1CJ1	N	45,44762 5.91677 (9m)	Carré	10x10	jaune	30	1,5	N	19/11/2001	1	3,62	*	*	1
Z1CR1	N	45,44763 5.91662 (5m)	Carré	10x10	rouge	21	1	O	19/11/2001	35	25,00	*	*	35
Z1BR8	N	45,44767 5.91658 (5m)	Bande	70x10	rouge	34	6	O	19/11/2001	2	9,80	*	*	2
Z1BR9	O	45,44760 5.91670 (6m)	Bande	30x10	rouge	35	3	N	19/11/2001	65	5,60	*	*	65
Z1BJ5	O	45,44753 5.91661 (6m)	Bande	70x10	jaune	35	3	N	19/11/2001	83	120,00	17	14,20	100
Z1BR10	N	45,44753 5.91666 (6m)	Bande	70x10	rouge	40	1	O	19/11/2001	70	19,60	*	*	70
Z1BR11	N	45,44744 5.91680 (7m)	Bande	70x10	rouge	32	12	O	19/11/2001	0 (MR)	0,00	*	*	0

Marquage	Référentiel	GPS	Type	Taille	Couleur	Pente (en °)	Granulométrie moyenne (cm)	Présence végétale	Mise en place	P1 - 11/01-03/02 Déstructuration (%)	Vitesse (en cm)	P2 - 03/02-10/02 Déstructuration (%)	Vitesse (cm)	Total P1+P2 11/01-10/02 Déstructuration (%)
Z1BJ6	N	45,44728 5,91673 (7m)	Bande	70x10	jaune	24	5	O	19/11/2001	0 (MR)	0,00	*	*	0
C1BR12	O	45,44751 5,91715 (7m)	Bande	70x10	rouge	40	6	N	19/11/2001	35	47,00	55	16,20	91
C1BJ7	N	45,44750 5,91715 (7m)	Bande	70x10	jaune	30	6	O	19/11/2001	65	10,00	30	25,00	95
C1BR13	N	45,44740 5,91716 (6m)	Bande	70x10	rouge	33	10	O	19/11/2001	2 (MR)	0,00	*	*	2
Z2BR16	O	45,44736 5,91708 (9m)	Bande	70x10	rouge	35	8	N	19/11/2001	4 (MR)	0,00	*	*	4
C1BJ8	N	45,44741 5,91702 (7m)	Bande	20x10	jaune	15	2	O	19/11/2001	60	7,20	*	*	60
C1BR14	N	45,44728 5,91699 (7m)	Bande	40x10	rouge	35	2	O	19/11/2001	27 (AB)	1,33	60	13,00	87
C1BJ9	N	45,44728 5,91699 (7m)	Bande	50x10	jaune	30	2,5	O	19/11/2001	40	12,40	*	*	40
Z2BR15	N	*	Bande	70x10	rouge	35	6	O	19/11/2001	30	7,60	*	*	30
Z2BR17	N	*	Bande	20x10	rouge	18	1	O	19/11/2001	15	7,20	*	*	15
Z2BJ10	N	45,44701 5,91720 (25 m)	Bande	70x10	jaune	30	6	O	19/11/2001	5	11,33	60	14,00	65
C2CR10	N	45,44705 5,91458 (14m)	Carré	10x10	rouge	30	1	O	19/11/2001	90	15,00	*	*	90
C2Cj10	N	45,44703 5,91767 (15 m)	Carré	10x10	jaune	19	1,5	O	19/11/2001	50	83,40	50	11,00	100
C2BJ12	O	45,44696 5,91739 (11m)	Bande	70x10	jaune	38	6	N	19/11/2001	70	7,80	*	*	70
C2BR19	N	45,44696 5,91739 (9m)	Bande	60x10	rouge	35	3	O	19/11/2001	30	65,50	60	24,00	90
C2BR18	N	45,44687 5,91719 (7m)	Bande	70x10	rouge	35	4	O	19/11/2001	5	12,75	25	18,75	30
C2BJ11	N	45,44685 5,91718 (7m)	Bande	40x10	jaune	35	4	O	19/11/2001	2 (MR)	0,00	*	*	2
Z3CR11	N	45,44693 5,91736 (12m)	Carré	10x10	rouge	30	1	O	19/11/2001	20	25,60	60	11,00	80
Z3BJ13	N	45,44177 5,91727 (7m)	Bande	70x10	jaune	19	7	O	19/11/2001	5	5,50	*	*	5
Z3BR20	O	45,44174 5,91766 (14 m)	Bande	70x10	rouge	40	5	N	19/11/2001	25	23,40	55	15,00	80
Z3BJ14	N	45,44669 5,91778 (9m)	Bande	70x10	jaune	32	4	O	19/11/2001	15	2,80	*	*	15

Marquage	Référentiel	GPS	Type	Taille	Couleur	Pente (en °)	Granulométrie moyenne (cm)	Présence végétale	Mise en place	P1 - 11/01-03/02 Déstructuration (%)	Vitesse (en cm)	P2 - 03/02-10/02 Déstructuration (%)	Vitesse (cm)	Total P1+P2 11/01-10/02 Déstructuration (%)
Z3BR21	N	45,44662 5,91729 (20m)	Bande	70x10	rouge	35	4	O	19/11/2001	30	37,40	15,00	21,00	45
C3CR12	N	45,44658 5,91783 (9m)	Carré	10x10	rouge	15	5	O	19/11/2001	60	28,33	30,00	6,00	90
C3Bj15	N	45,44652 5,91758 (12m)	Bande	70x10	jaune	32	8	O	19/11/2001	40	2,50	*	*	40
C3BR22	N	45,44654 5,91740 (14m)	Bande	70x10	rouge	30	12	O	19/11/2001	3 (MR, AB)	0,00	*	*	3
C3BJ16	O	45,44652 5,91750 (18m)	Bande	70x10	jaune	34	5	N	19/11/2001	85	11,20	*	*	85
C3BR23	N	45,44701 5,91701 (14 m)	Bande	70x10	rouge	30	15	O	19/11/2001	10 (AB, MR)	0,00	*	*	10
C3BJ17	N	45,44648 5,91730 (5m)	Bande	70x10	jaune	30	14	O	19/11/2001	30 (AB, MR)	1,00	*	*	30
C3BR24	O	45,44639 5,91734 (8m)	Bande	60x10	rouge	35	3	N	19/11/2001	37	40,00	20,00	28	57
C3BR25	N	45,44638 5,91737 (8m)	Bande	70x10	rouge	35	4	O	19/11/2001	1	0,00	10,00	14,33	11
Topomicromètre Rhamnus	N	*	Bande	70x10	rouge	25	1	O	20/07/04	*	*	50,00	9,6	*
Topomicromètre rhexistasie	N	45,44802 5,91700 (12m)	Bande	70x10	rouge	15	4	N	20/07/04	*	*	5,00	3	*
Topomocromètre biostasie	N	45,44809 5,91707 (11m)	Carré	10x10	bleu	10	0,5	O	20/07/04	*	*	20,00	0,5	*
	N		Carré	10x10	rouge	11	2	O	20/07/04	*	*	25,00	1,5	*
Topomicromètre hétérostatie	N	45,44809 5,91707 (11m)	Bande	20x10	rouge	15	4	O	20/07/04	*	*	55,00	4,8	*

N = non

O = oui

RB = nouveau
marquage bleu

AB = arrivée de blocs

* = absence de passe

MR =

RV = nouveau
marquage vertRJ = nouveau
marquage jaunemouvement
rotationnel

Marquage	Nouvelle couleur 11/02	P3a - 10/02 - 04/03 Déstructuration (%)	Vitesse (cm)	P3b - 03/02 - 04/03 Déstructuration (%)	Vitesse (cm)	P4 04/03-11/03 Déstructuration (%)	Vitesse (cm)	Total P1-P4 03/02-11/03 Déstructuration (%)
Z1BR1				60	58,2	20	32,8	100 (RJ)
Z1BJ1				87	34,6	7	24,2	97 (RR)
Z1BR2				40	144	100	58,6	100 (RJ)
Z1BJ2	Z1BB2 (RB)	15	25,8			5	18	20
Z1BR3	Z1BB3 (RB)	30	83			67	79,4	97 (RJ)
Z1BJ3				15	6	26	11	67 (RR)
Z1BR4				10	29	35	32,4	95 (RV)
Z1BR7	Z1BV7 (RV)	60	19			*		60
Z1BR5	*			65	70,6	20	5,75	90 (RV)
Z1BR6	*			5	0% (MR)	5	7,5	10 (RV)
Z1BJ4	*			perdue	*	40	16	40 (RV)
Z1CJ1	*			89	12,6	10	10	100 (RR)
Z1CR1	Z1CB1 (RB)	92	33			8	15	100 (RB)
Z1BR8	*			40	13,4	10	20,6	70 (RV)
Z1BR9	*			35	106	*	38	100 (RB)
Z1BJ5	Z1BV5 (RV)	70	77,6			30	32,6	100 (RB)
Z1BR10	*			25	128,5	5	22,1	100 (RV)
Z1BR11	*			62	10,6	8	15	70 (RJ)
Z1BJ6	*			55	26	45	30	100 (RR)
C1BR12	C1BB12 (RB)	94	41,2			5	33,2	99 (RV)
C1BJ7	C1BV07 (RV)	52	32,8			38	18,8	90 (RR)
C1BR13	*			13	20	55	21,6	70
Z2BR16	*			66	64,8	25	26,4	95 (RV)
C1BJ8	*			perdue	*	*	*	perdue (RR)
C1BR14	C1BB14 (RB)	72	27			26	20	98 (RV)
C1BJ9	*			58	93	2	15	100 (RR)
Z2BJ10	Z2BB10 (RB)	2	25			68	42	70
C2CR10	*			10	perdue	*	*	100 (RV)
C2Cj10	C2CB10 (RB)		*			*	*	100(RR)

Marquage	Nouvelle couleur 11/02	P3a - 10/02 - 04/03 Déstructuration (%)	Vitesse (cm)	P3b - 03/02 - 04/03 Déstructuration (%)	Vitesse (cm)	P4 04/03-11/03 Destructuration (%)	Vitesse (cm)	Total P1-P4 03/02-11/03 Déstructuration (%)
C2BJ12	*			30	61,6	*	*	100 (RR)
C2BR19	C2BV19 (RV)	85	23,4			15	13,2	100 (RV)
C2BR18	*			28	27,6	37	17,2	95 (RV)
C2BJ11	*			88	17	5	38,4	95 (RR)
Z3CR11	Z3CB11 (RB)	87	4,2			13	*	100 (RB)
Z3BJ13	*			50	8,5	15	7	70 (RR)
Z3BR20	Z3BV20 (RV)	22	52			73	33,6	95 (RB)
Z3BJ14	*			81	25,4	4	30	100 (RR)
Z3BR21	Z3BV21 (RV)	25	23			0	*	pas de mouvement
C3CR12	C3CB12 (RB)	95	5			5	3	100 (RV)
C3Bj15	*			55	27	5	20,4	100 (RV)
C3BR22	*			17	9	40	13,8	60
C3BJ16	*			0	50	10	21	95 (RR)
C3BR23	*			40	15	10	8	60

Marquage	Nouvelle couleur 11/02	P3a - 10/02 - 04/03 Déstructuration (%)	Vitesse (cm)	P3b - 03/02 - 04/03 Déstructuration (%)	Vitesse (cm)	P4 04/03-11/03 Destructuration (%)	Vitesse (cm)	Total P1-P4 03/02-11/03 Déstructuration (%)
C3BJ17	*			25	10	15	10	70 (RR)
C3BR24	C3BB24 (RB)	76	71			24	29,6	100 (RV)
C3BR25	*			14	26,6	37	22	62
Topomicromètre Rhamnus	*	35	18,4		18,4	*	*	*
Topomicromètre rhexistase	*	70	30		30	20	65,4	95 (RV)
Topomocromètre biostase	*	83	2		9,6	15	3	100 (RV)
	*	10	1,6		1,6	15	1,5	50 (ref bleu)
Topomicromètre hétérostase	*	41	7,6		7,6	4	24,8	100 (RB)

MR =

mouvement

rotationnel

N = non

O = oui

RB = nouveau
marquage bleu

AB = arrivée de blocs

* = absence de passe

RV = nouveau
marquage vertRJ = nouveau
marquage jauneRR = nouveau
marquage rouge

Marquage	P5 - 11/03-05/04 Déstructuration (%)	Vitesse (cm)	Marquage	P5 - 11/03-05/04 Déstructuration (%)	Vitesse (cm)	Marquage	P5 - 11/03-05/04 Déstructuration (%)	Vitesse (cm)
Z1BR1	32,00	5	C1BR13	94 (AB)	35	C3BR23	95 (AB)	> 100
Z1BJ1	85,00	27	Z2BR16	100,00	0	C3BJ17	2 (MR)	0
Z1BR2	87,00	73,4	C1BJ8	100,00	>100	C3BR24	83,00	37
Z1BJ2	40,00	21,4	C1BR14	91,00	70	C3BR25	65,00	57
Z1BR3	82,00	40,4	C1BJ9	71,00	90	Topomicromètre Rhamnus	*	*
Z1BJ3	52,00	32,6	Z2BJ10	100,00	>100	Topomicromètre rhexistasie	75,00	32,8
Z1BR4	0 (MR)	0	C2CR10	100,00	>100	biostasie	20,00	10
Z1BR7	80 (AB)	6	C2Cj10	100,00	>100		5,00	2
Z1BR5	50 (AB)	0	C2BJ12	100,00	>100	Topomicromètre hétérostasie	65,00	5
Z1BR6	1,00	0	C2BR19	97,00	> 150 (AB)			
Z1BJ4	40,00	5	C2BR18	96,00	4			
Z1CJ1	74,00	10	C2BJ11	90,00	36			
Z1CR1	94,00	17,6	Z3CR11	100,00	>100			
Z1BR8	10,00	10	Z3BJ13	22 (AB)	5			
Z1BR9	90,00	36,8	Z3BR20	14,00	14			
Z1BJ5	67,00	29,6	Z3BJ14	82,00	5			
Z1BR10	100,00	>100	Z3BR21	pas de mouvement	*			
Z1BR11	12 (AB)	0	C3CR12	95,00	>100			
Z1BJ6	5,00	2	C3Bj15	6,00	5			
C1BR12	98 (écroulement)	100	C3BR22	100,00	>100			
C1BJ7	18,00	10	C3BJ16	5,00	5			

Géodynamique de surface et marquages (déstructuration, vitesses de déplacement et ablation) - Données brutes - Cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil

	Référentiel	Type	Taille (cm)	Pente (en °)	Granulométrie moyenne (cm)	Présence végétale	P1 - 11/01-03/02 Déstructuration (%)	Vitesse (cm)	P2 - 03/02 - 05/03 Déstructuration (%)	Vitesse (cm)
ZAPBR1	N	Bande	70x10	38	6	O	47,22	21,80	100 (A)	> 200
ZAPBJ1	O	Bande	70x10	28	4	O	51,38	2,00	100 (A)	> 200
ZAPBJ2	O	Bande	70x10	35	3	N	57,74	10,20	100 (A)	> 200
ZAPCR1	N	Carré	10x10	25	1	O	20	17,00	100 (A)	> 200
ZAPBR2	N	Bande	50x10	30	6	O	26	3,20	100 (A)	> 200
ZAPBJ3	N	Bande	30x10	25	4	O	16,7	0,00	60 (AB)	0,00
ZAPBR3	N	Bande	70x10	25	6	O	26,39	3,80	100 (A)	> 200
ZAPBJ4	N	Bande	70x10	30	4	O	6,94	1,80	97	13,80
ZAPBR4	O	Bande	50x10	26	5	N	14	5,40	100	> 200
ZAPBJ5	O	Bande	70x10	34	5	N	16,9	4,00	57	28,80
ZAPBR5	N	Bande	50x10	25	3	O	9,81	1,80	13	2,00
ZAPBR14	N	Bande	70x10	35	4	O	47,88	3,40	100 (A)	> 200
ZAPCJ6	N	Carré	10x10	15	1	O	20	5,20	100 (A)	> 200
ZAPBR15	N	Bande	70x10	25	3	O	5	2,00	90	25,00
ZMBJ9	N	Bande	40x10	15	3	O	5	2,80	95	50,40
ZMCJ5	N	Carré	10x10	25	1	O	10	0,60	95	15,00
ZMBR11	N	Bande	70x10	35	3	O	11,26	3,40	57	16,50
ZMBR12	N	Bande	70x10	20	3	O	17,64	8,60	72	27,40
ZMCJ4	N	Carré	10x10	30	2	O	10	0,80	17	8,00
ZMBR9	N	Bande	60x10	38	2	O	50,84	9,80	72	29,00
ZMBJ8	O	Bande	70x10	40	2	N	14,49	17,20	90	44,60
ZMBR10	N	Bande	50x10	30	2	O	100	0,00	100	>400
ZMCJ3	N	Carré	10x10	15	1	O	10	2,40	100	>100
ZMBR7	N	Bande	70x10	30	10	O	5,79	0,00	68	20,40
ZMBR8 jaune	N	Bande	70x10	30	6	O	5,71	0,00	10	12,00
ZMBJ6	N	Bande	70x10	20	4	O	14,08	6,60	17	2,00
ZMBJ7	N	Bande	70x10	25	6	O	8,82	*	31	1,00
ZMCJ1	N	Carré	10x10	30	1	O	10	1,20	96	22,00
ZMBR6	O	Bande	70x10	25	5	N	9,85	8,00	perdue	*
ZMCJ2	N	Carré	10x10	25	1	O	10	4,80	perdue	*
ZAPBR13	N	Bande	30x10	25	2	O	100	*	perdue	*

N = non O = oui AB = arrivée de blocs * = absence de passe A = avalanche

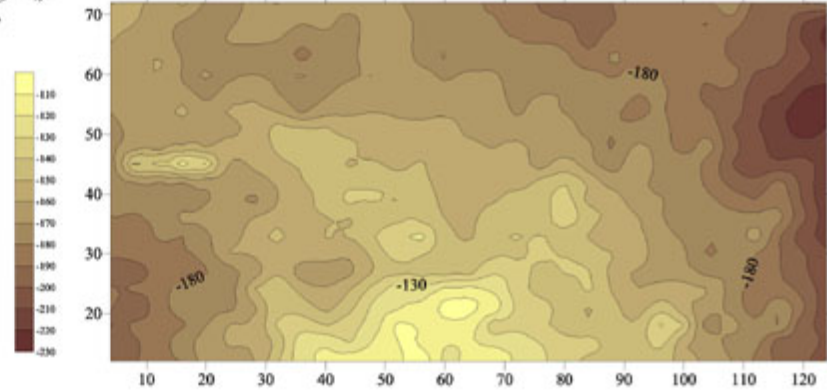
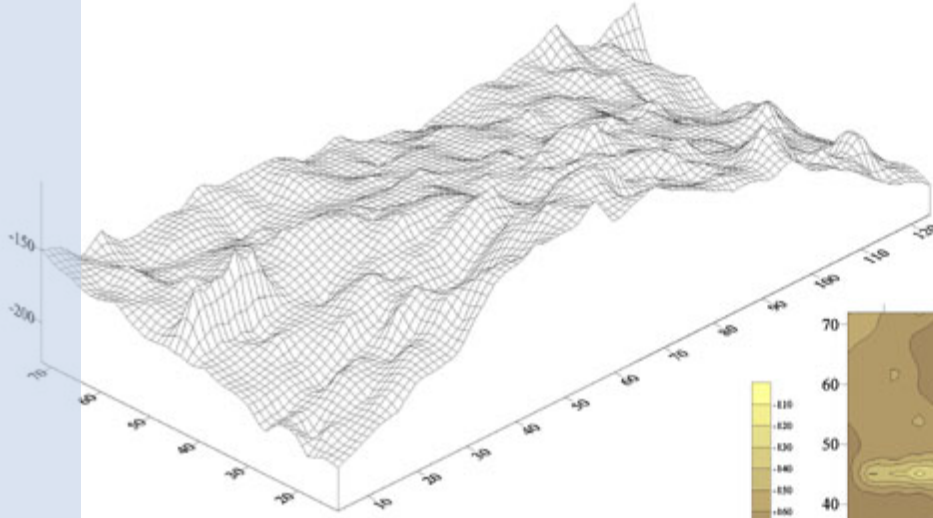
ANNEXE F

Pas de mesure et points de calage pour les parcelles topomicrométrées du tablier d'éboulis de La Plagne

Tablier d'éboulis de La Plagne

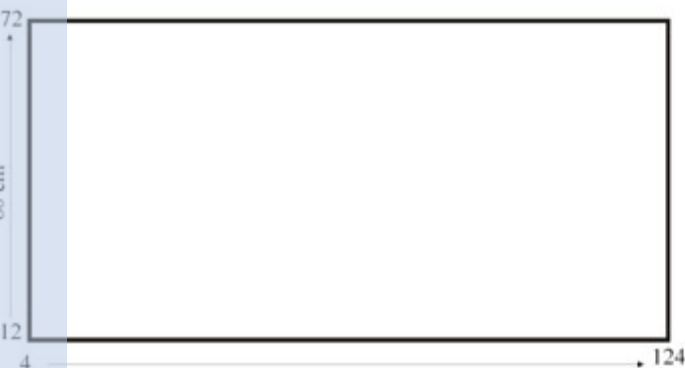
Parcelle topomicrométrée T1

(MNT réalisé sous Surfer 7)



tel-00011509, version 1 Feb 2006

70	-189.33	-154.37	-189.27	-156.55	-171.18	-172.72	-188.24	-171.00	-158.93	-187.37	-186.01	-166.30	-187.06	-179.23	-178.56	-172.74	-186.18	-188.80	-190.15	-199.09	-193.58	-189.59	-186.83	-190.12	-184.43	-181.07	-178.79	-193.42	-201.21	-198.76	-184.82		
6	-156.53	-199.01	-166.16	-170.23	-176.26	-171.83	-187.06	-163.61	-168.90	-166.30	-173.28	-166.82	-162.93	-173.81	-171.99	-177.17	-177.19	-189.45	-188.33	-189.01	-191.80	-192.09	-182.38	-189.56	-182.82	-192.41	-181.86	-198.83	-192.06	-209.64	-219.41		
51	-158.53	-163.71	-164.12	-174.67	-179.20	-187.30	-166.62	-169.85	-176.67	-171.30	-176.15	-180.43	-187.75	-171.47	-172.25	-177.67	-175.89	-179.32	-183.06	-184.06	-194.91	-184.57	-186.77	-182.52	-186.30	-186.17	-191.70	-199.89	-195.02	-212.63	-222.16		
4	-164.34	-169.77	-158.41	-170.76	-173.74	-175.00	-176.01	-175.59	-184.31	-177.12	-173.03	-162.85	-164.89	-172.61	-168.93	-179.57	-173.94	-179.07	-172.07	-177.07	-187.99	-177.78	-184.71	-186.22	-190.50	-178.48	-194.19	-194.86	-199.09	-203.91	-218.91		
2	-183	-165.22	-158.64	-171.29	-168.18	-171.23	-169.83	-171.89	-167.65	-174.19	-170.30	-168.19	-172.41	-167.30	-168.46	-172.85	-172.98	-175.67	-177.26	-182.91	-178.00	-179.73	-188.57	-188.29	-182.87	-201.59	-201.98	-212.16	-214.69				
1	-164	-165.64	-165.53	-168.49	-174.30	-167.78	-161.64	-170.52	-174.57	-171.42	-166.13	-167.87	-161.23	-163.82	-166.41	-166.64	-167.75	-172.48	-170.67	-170.33	-176.81	-169.06	-179.44	-177.94	-183.00	-192.76	-192.58	-207.58	-207.96	-221.29	-234.48		
0	-161.78	-165.73	-155.46	-167.04	-157.32	-158.18	-161.65	-174.37	-164.81	-161.61	-162.30	-166.33	-163.86	-164.66	-164.94	-171.61	-163.07	-171.61	-173.83	-178.44	-183.37	-178.44	-182.98	-189.34	-193.01	-206.16	-218.11	-223.46	-229.86				
70	-165.41	-164.66	-165.88	-161.50	-164.33	-157.22	-145.75	-148.56	-148.39	-137.48	-153.51	-156.91	-154.61	-152.38	-163.48	-161.77	-167.30	-167.30	-162.69	-176.86	-179.43	-176.18	-175.78	-184.55	-185.00	-199.80	-209.01	-216.45	-223.22	-218.64			
51	-167.81	-169.57	-161.48	-163.83	-155.09	-158.07	-147.46	-141.60	-145.52	-145.07	-157.00	-154.77	-153.96	-159.29	-157.34	-161.54	-156.51	-161.75	-163.92	-165.89	-182.26	-168.26	-173.99	-187.63	-173.29	-195.58	-202.43	-217.27	-217.43	-219.42			
4	-173.22	-133.65	-133.67	-121.19	-127.17	-162.02	-157.83	-153.11	-149.42	-140.82	-152.25	-147.68	-154.89	-148.51	-156.64	-157.13	-153.41	-153.13	-166.87	-156.40	-167.89	-175.53	-160.64	-173.27	-170.98	-183.56	-200.14	-207.98	-208.14	-204.61	-213.19		
2	-177.99	-172.52	-174.30	-172.98	-167.99	-166.61	-163.85	-158.43	-149.99	-147.48	-142.95	-141.95	-143.06	-147.35	-154.14	-148.42	-155.32	-158.91	-146.94	-139.91	-150.49	-165.20	-160.30	-172.20	-175.82	-182.50	-194.08	-197.82	-185.59	-203.39	-218.45		
0	-174.42	-171.25	-177.35	-170.57	-166.55	-173.15	-160.11	-156.23	-144.62	-136.45	-138.80	-139.27	-143.15	-152.87	-156.14	-152.10	-140.26	-144.01	-136.79	-153.61	-152.86	-167.45	-169.12	-173.42	-177.24	-183.44	-190.31	-194.02	-202.28	-217.65			
70	-181.87	-178.82	-185.98	-167.27	-167.27	-138.99	-156.19	-149.19	-151.63	-131.75	-148.84	-144.54	-143.89	-130.30	-153.61	-141.37	-149.20	-149.40	-128.28	-143.32	-130.73	-158.38	-169.38	-173.64	-176.35	-177.68	-176.57	-175.17	-196.69	-213.72			
51	-183.52	-179.94	-180.48	-171.34	-167.13	-153.82	-145.80	-160.67	-148.79	-148.83	-139.58	-130.05	-126.22	-145.64	-152.80	-140.05	-138.38	-139.12	-149.08	-150.75	-139.95	-156.73	-166.38	-170.75	-178.72	-176.82	-163.27	-190.56	-208.01	-214.57			
4	-184.62	-181.88	-180.81	-173.52	-157.41	-157.75	-155.41	-151.63	-154.33	-158.18	-147.18	-134.29	-139.08	-144.64	-144.16	-142.00	-144.67	-136.61	-140.50	-144.31	-149.06	-149.46	-169.09	-167.94	-181.91	-177.57	-180.71	-189.73	-198.17	-208.82			
2	-196.87	-188.94	-192.26	-181.89	-175.19	-168.74	-151.69	-168.29	-165.85	-163.26	-150.45	-144.29	-145.32	-145.55	-146.66	-130.87	-136.60	-144.59	-138.18	-139.13	-153.52	-162.07	-162.65	-167.61	-174.64	-178.28	-182.35	-189.34	-198.30	-208.53			
0	-196.23	-183.30	-172.73	-168.99	-173.13	-148.84	-139.23	-133.42	-138.59	-149.87	-133.84	-121.93	-123.88	-116.43	-114.88	-122.90	-136.23	-143.94	-130.53	-136.99	-131.14	-139.65	-137.63	-153.84	-158.14	-174.69	-183.23	-187.87	-193.88	-203.96			
70	-203.19	-184.53	-174.12	-174.81	-173.64	-163.76	-144.64	-144.82	-133.56	-143.51	-127.01	-122.49	-118.40	-106.40	-106.33	-109.37	-131.22	-132.19	-142.33	-151.35	-145.41	-157.88	-144.01	-160.52	-165.32	-173.23	-188.33	-189.01	-187.96	-207.39			
51	-185.43	-185.80	-182.27	-179.60	-158.11	-156.94	-137.46	-133.82	-140.84	-132.29	-123.83	-107.07	-109.95	-113.29	-113.64	-138.84	-132.62	-139.48	-145.51	-149.12	-145.08	-148.87	-127.42	-138.26	-177.13	-163.92	-178.06	-167.94	-199.07	-202.53			
4	-182.48	-184.16	-172.92	-164.09	-158.66	-158.49	-148.71	-122.95	-120.12	-132.22	-118.77	-118.20	-113.83	-119.80	-119.46	-121.83	-122.48	-129.59	-135.04	-134.87	-141.83	-144.88	-137.68	-140.50	-162.33	-175.21	-176.02	-199.49	-193.92	-201.44			
2	-190.94	-182.83	-180.13	-165.61	-164.46	-160.74	-140.79	-122.24	-119.38	-118.82	-112.63	-113.36	-101.89	-123.53	-117.89	-111.99	-123.82	-127.73	-136.14	-143.40	-142.95	-148.33	-141.62	-156.30	-161.26	-168.87	-182.13	-192.52	-198.09	-207.00			



Pas de mesure
En x : 4 cm
En Y : 3 cm

Point de calage

POINT 1 20 68	POINT 8 80 48
POINT 2 20 48	POINT 9 80 28
POINT 3 20 28	POINT 10 110 68
POINT 4 50 68	POINT 11 110 48
POINT 5 50 48	POINT 12 110 28
POINT 6 50 28	
POINT 7 80 68	

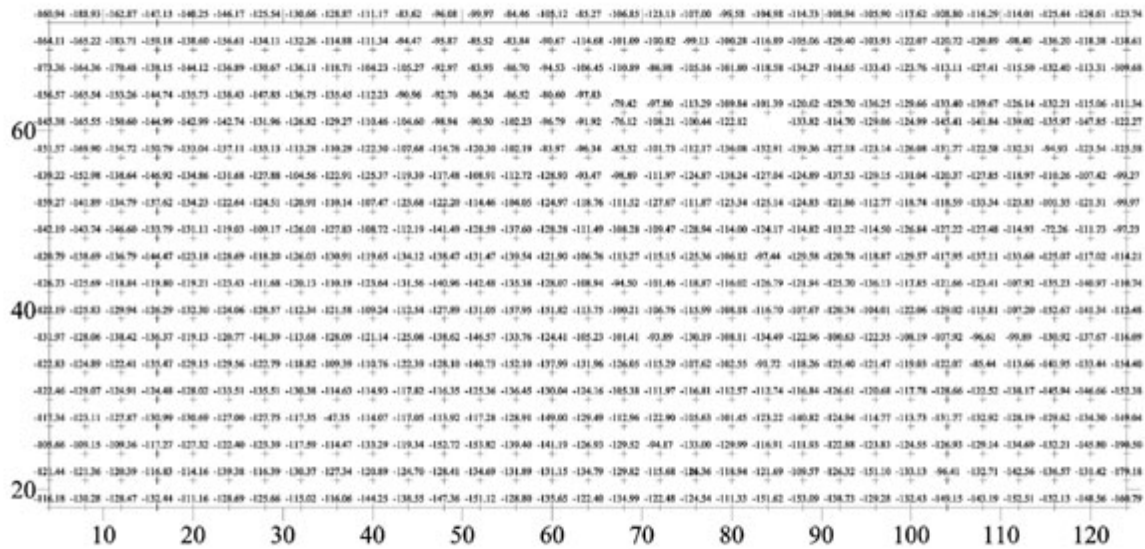
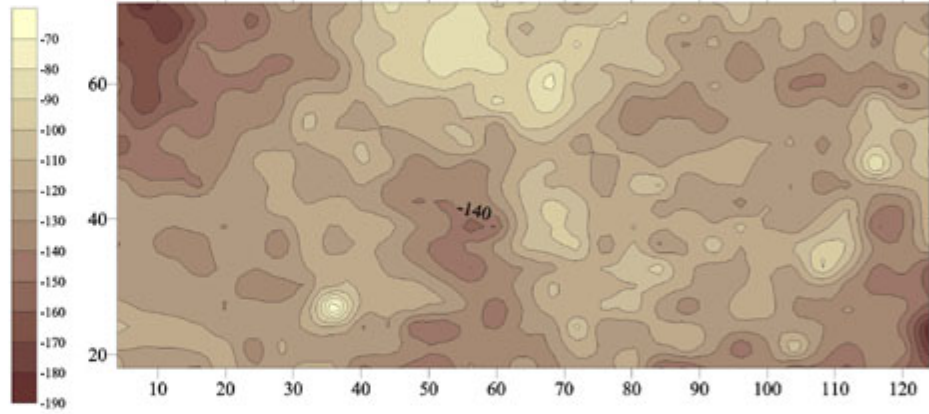
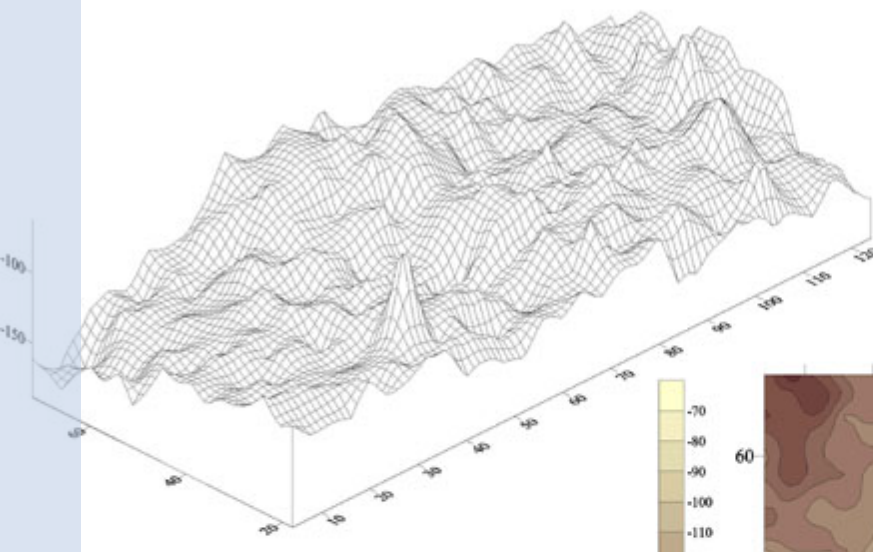


23 7 2002

Tablier d'éboulis de La Plagne

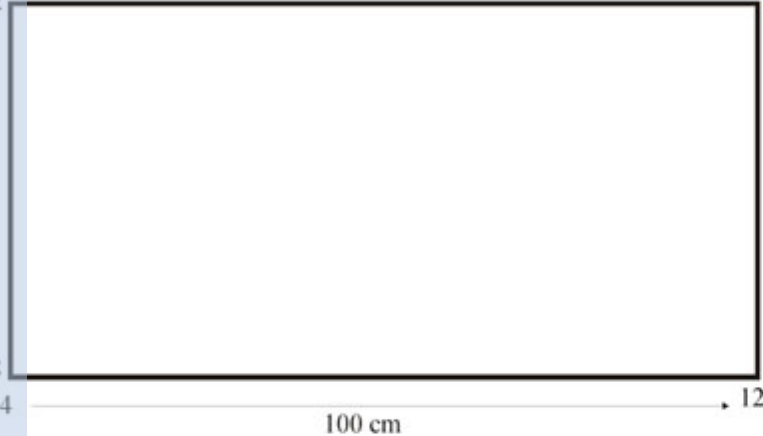
Parcelle topomicrométrée T 2

(MNT réalisé sous Surfer 7)



tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2006

51cm
18
4



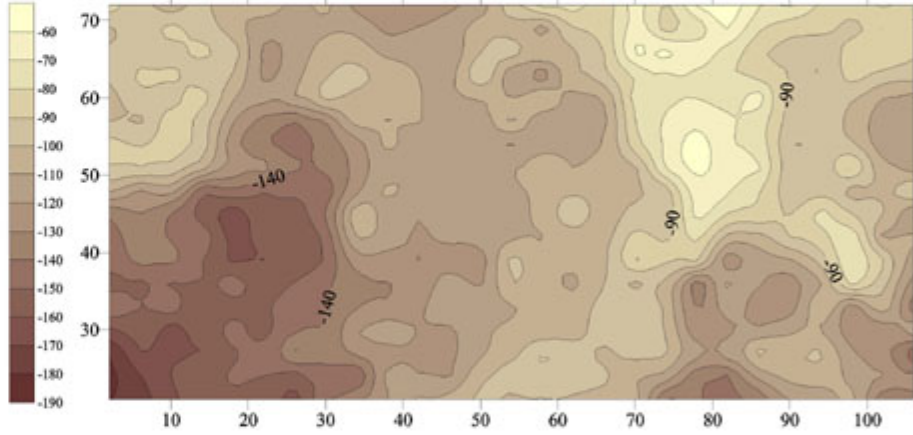
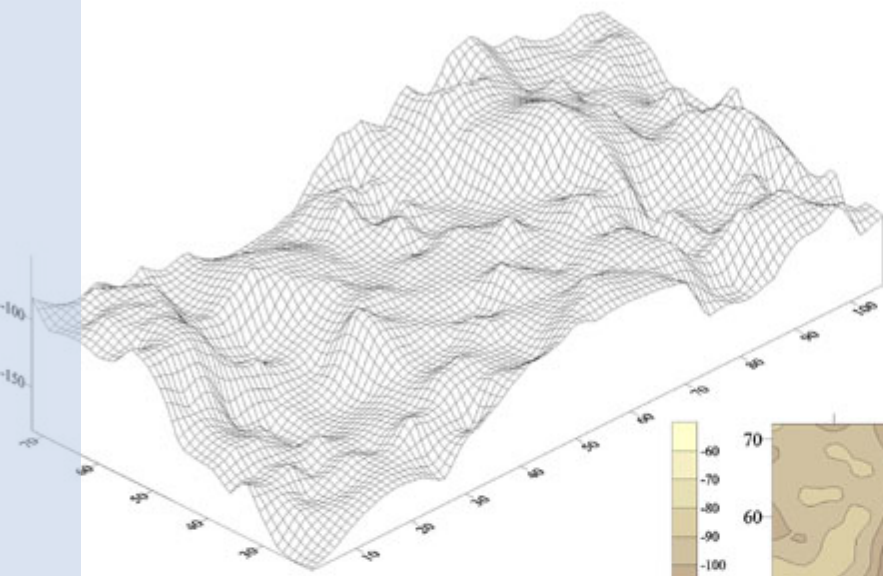
- Pas de mesure**
En x : 4 cm
En Y : 3 cm
- Point de calage**
- | | |
|---------------|-----------------|
| POINT 1 20 68 | POINT 8 80 48 |
| POINT 2 20 48 | POINT 9 80 28 |
| POINT 3 20 28 | POINT 10 110 68 |
| POINT 4 50 68 | POINT 11 110 48 |
| POINT 5 50 48 | POINT 12 110 28 |
| POINT 6 50 28 | |
| POINT 7 80 68 | |



Tablier d'éboulis de La Plagne

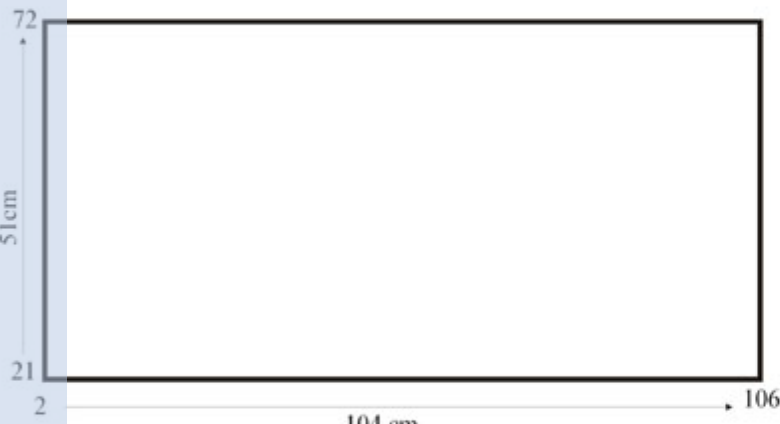
Parcelle topomicrométrée T3

(MNT réalisé sous Surfer 7)



	83.86	-97.48	-107.26	-66.25	-110.00	-101.63	-112.27	-107.08	-123.84	-126.21	-124.58	-123.11	-117.13	-92.21	-75.22	-74.34	-87.83	-44.63	-81.86	-57.27	-52.07	-49.63	-48.59	-41.40	-45.18	-79.02	-44.06	
70	-102.38	-82.36	-85.29	-84.71	-106.39	-117.30	-118.81	-111.90	-112.59	-122.66	-119.48	-113.63	-102.81	-104.79	-118.48	-80.34	-85.27	-85.83	-86.53	-79.05	-59.00	-78.33	-86.80	-86.89	-85.23	-80.81	-86.93	
	-96.00	-96.30	-84.93	-87.17	-92.56	-122.56	-118.07	-105.30	-103.84	-114.44	-113.33	-120.24	-106.71	-93.27	-86.12	-101.44	-96.67	-56.56	-51.29	-41.31	-75.22	-89.52	-83.56	-97.88	-85.68	-79.83	-86.40	
	-86.79	-86.92	-88.02	-97.08	-89.82	-123.65	-114.28	-102.30	-96.81	-101.59	-116.31	-113.78	-83.38	-119.19	-128.96	-100.96	-91.81	-79.83	-72.29	-72.62	-79.68	-84.08	-85.58	-101.69	-84.33	-81.89	-84.01	
60	-102.53	-82.71	-84.84	-84.26	-108.97	-116.13	-118.18	-95.87	-102.23	-106.72	-109.94	-112.24	-110.15	-110.35	-97.30	-115.38	-110.08	-74.80	-72.32	-75.71	-64.00	-66.09	-85.29	-86.96	-105.81	-113.23		
	-100.68	-102.38	-84.38	-84.71	-118.94	-133.43	-148.98	-131.77	-106.44	-110.71	-109.83	-117.29	-114.71	-85.83	-119.41	-111.77	-112.69	-79.52	-89.03	-82.68	-88.18	-75.39	-84.17	-85.83	-102.70	-114.94	-111.32	
	-85.25	-96.89	-86.97	-84.36	-126.18	-139.73	-143.51	-135.09	-125.13	-106.84	-117.04	-118.27	-117.17	-123.78	-114.74	-111.77	-100.69	-83.20	-88.25	-54.97	-89.70	-74.30	-89.86	-89.84	-99.17	-118.33	-134.07	
	-90.78	-88.77	-81.84	-104.87	-123.91	-118.24	-118.38	-136.74	-126.30	-115.81	-115.27	-117.34	-116.14	-110.18	-101.48	-119.29	-105.83	-101.94	-87.37	-86.31	-87.63	-87.79	-86.33	-84.98	-75.64	-106.06	-136.98	
50	-102.08	-122.71	-134.91	-148.58	-141.29	-150.16	-148.54	-147.85	-123.20	-107.76	-109.29	-118.83	-114.55	-111.86	-109.29	-102.42	-103.73	-101.84	-101.87	-84.30	-88.86	-79.80	-97.80	-84.26	-106.33	-101.83	-82.93	
	-119.28	-129.57	-141.15	-153.25	-168.99	-152.29	-152.34	-139.24	-100.70	-117.87	-119.83	-114.70	-114.67	-112.43	-106.74	-88.30	-107.61	-91.40	-89.09	-83.48	-81.31	-81.47	-90.69	-75.80	-89.96	-98.44	-122.65	
	-143.12	-136.53	-141.32	-140.79	-162.33	-155.41	-138.15	-147.38	-106.47	-114.81	-121.37	-117.59	-115.44	-112.48	-110.79	-106.89	-104.71	-86.70	-82.95	-71.15	-103.92	-103.88	-88.89	-84.10	-72.89	-113.59	-107.32	
40	-106.33	-139.97	-137.14	-130.28	-162.60	-148.11	-115.42	-149.48	-124.14	-125.33	-119.31	-124.91	-121.69	-94.04	-106.69	-104.99	-101.63	-78.03	-87.78	-86.32	-126.22	-114.96	-111.23	-86.32	-90.82	-88.78	-134.29	
	-110.84	-132.80	-131.24	-130.06	-143.24	-154.74	-148.44	-141.83	-133.54	-130.57	-128.77	-134.29	-131.85	-99.30	-104.95	-112.80	-99.93	-103.84	-138.14	-107.17	-118.18	-115.87	-112.33	-75.84	-124.81			
	-139.63	-149.80	-142.50	-142.14	-154.00	-158.67	-144.00	-140.48	-131.88	-129.94	-123.84	-148.20	-132.47	-111.41	-130.66	-105.30	-85.32	-90.81	-104.74	-131.27	-113.65	-127.92	-123.00	-97.27	-128.88	-102.17	-137.19	
30	-102.73	-134.54	-161.95	-153.27	-145.76	-154.50	-142.65	-140.28	-119.53	-115.48	-138.88	-122.59	-111.14	-107.87	-106.62	-105.25	-85.79	-84.54	-100.78	-129.21	-123.57	-118.39	-113.19	-111.81	-127.51	-126.98	-131.67	
	-179.89	-139.90	-161.67	-160.28	-151.90	-148.81	-127.78	-134.28	-126.26	-124.43	-121.21	-122.28	-112.16	-104.35	-88.50	-84.63	-102.83	-86.40	-97.98	-131.34	-113.80	-95.97	-100.91	-97.43	-119.31	-127.75	-148.61	
	-182.78	-170.43	-174.53	-152.60	-148.81	-148.81	-154.00	-145.63	-152.18	-134.59	-119.65	-121.27	-102.02	-93.18	-81.46	-87.88	-86.43	-100.99	-113.90	-137.84	-141.90	-116.47	-106.39	-104.72	-113.49	-118.83	-123.11	
	-188.54	-174.72	-182.80	-154.77	-151.70	-154.23	-144.25	-140.63	-131.34	-120.82	-106.63	-106.69	-87.17	-103.00	-100.59	-101.20	-102.74	-106.26	-141.79	-138.26	-142.14	-137.43	-118.10	-117.29	-105.79	-138.32	-131.37	

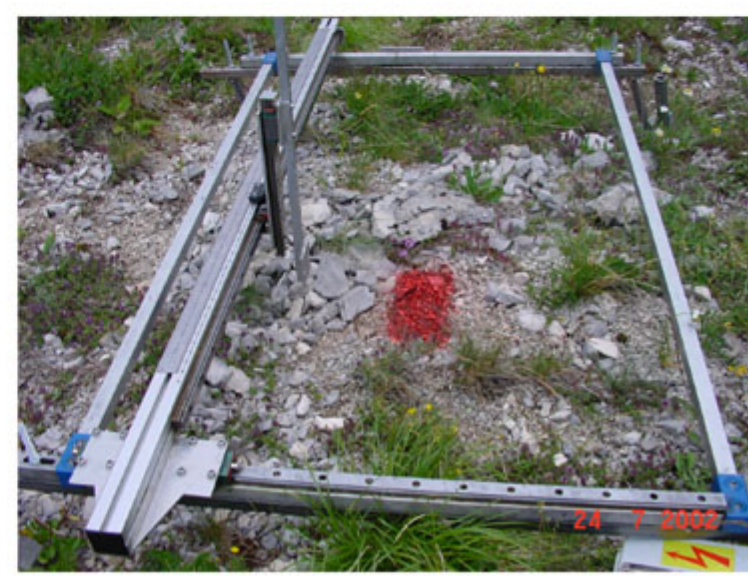
tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2006



Pas de mesure
En x : 4 cm
En Y : 3 cm

1° passe : le 24/07/02

- Point de calage
- POINT 1 10 28
 - POINT 2 40 28
 - POINT 3 70 28
 - POINT 4 98 28
 - POINT 5 24 48
 - POINT 6 50 48
 - POINT 7 78 48
 - POINT 8 104 48
 - POINT 9 98 68
 - POINT 10 64 68
 - POINT 11 34



24 7 2002

ANNEXE G

Liste des espèces déterminées (nomenclature de Flora Europea, TUTIN et al., 1964-80)

Abies alba Mill.

Acer pseudoplatanus

En gras : espèces d'éboulis

Calamagrostis Varia (Schrader) Host

Aconitum vulparia

Alchemilla conjuncta

***Allium narcissiflorum* Vill.**

Amelanchier ovalis Medicus

Anthericum ramosum L.

Anthriscus sylvestris (L.) Hoffman

Anthyllis montana L.

Anthyllis vulneraria L.

Arctostaphylos uva-ursi L. Sprengel

Asperula cynanchica L.

Asplenium viride Hudson

Bartsia alpina L.

Briza media L.

Bromus erectus L.

Calamintha grandiflora L. Moench

***Campanula cochleariifolia* Lam.**

Campanula rotundifolia L.

Carex flacca Schreber

Carex sempervirens Villars

Carlina acaulis forma nana (Degen) Meusel et Werner

Centaurea montana L.

***Centranthus angustifolius* (Mill.) DC**

Cephalanthera longifolia (L.) Fritsch

Cirsium arvense (L.) Scopoli

Clinopodium vulgare L.

Convallaria majalis L.

Coronilla vaginalis Lam.

Corylus avellana L.

Cotoneaster integerrimus (Medicus)

Crepis pyrenaica (L.) Greuter

Dactylis glomerata L.

Daphne mezereum L.

Dianthus monspessulanus L.

Epilobium montanum L.

Epipactis atrorubens (Hoffman) Besser

***Erinus alpinus* L.**

Euphorbia amygdaloïdes L.
Euphorbia cyparissias L.
Euphrasia salisburgensis Hoppe
Fagus sylvatica L.
Festuca ovina L.
Galeopsis angustifolia Hoffmann
Galium anisophyllum Villars
Gentiana verna L.
Gentiana lutea L.
Gentiana angustifolia
Geranium robertianum L.
Geranium sylvaticum L.
***Globularia cordifolia* L.**
Globularia nudicaulis L.
***Gymnocarpium dryopteris* L. Newman**
Helianthemum nummularium L. Miller
Helleborus foetidus L.
Hieracium murorum L.
Hieracium pilosella L.
Hieracium umbellatum L.
Hieracium vulgatum
Hypericum maculatum Crantz s.l.
***Hypericum nummularium* L.**
Juniperus communis L.
Knautia arvensis L. Coulter
Lahtyrus heterophyllus L.
Lamium galeobdolon L.
Lamium purpureum L.
Laserpitium latifolium L.
Laserpitium siler L.
***Leucanthemum adustum* (Koch) Greml**
***Linaria alpina* L.**
Lonicera alpigena L.
Lonicera nigra L.
Lonicera xylosteum L.
Lotus alpinus (DC.) Ramond
Lotus corniculatus L.
***Petasites paradoxus* (Retzius) Baumgarter**
Peucedanum ostruthium (L.) Koch
Phleum pratense L.
Picea abies (L.) Karster
Pimpinella major L. (Hudsor)
Pimpinella saxifraga L.
Pinus uncinata Miller

***Poa cenisia* Alliori**

Phyteuma betonocifolium Vill. = *P. scaposum* R. Schultz

Phyteuma hemisphaericum L.

Polygala chamaebuxus L.

Polygonatum odoratum (Miller) Druce

Prenanthes purpurea L.

Primula acaulis (L.) L.

***Pritzelago alpina* L.**

Pulsatilla alpina (L.) Delarbre

Ranunculus repens L.

***Rhamnus alpina* L.**

Rhinantus alectorolophus (Scopo) Pollich

Rhododendron ferrugineum L.

Ribes alpinum L.

Rosa montana Chaix

Rosa pendulina L.

Rubus idaeus L.

Rumex acetosa L.

***Rumex scutatus* L.**

Salix appendiculata Villars

Salix caprea L.

Salix retusa

Saxifraga rotundifolia L.

Scabiosa columbaria

***Scrophularia juratensis* schleicher**

***Sedum album* L.**

***Senecio doronicum* (L.) L.**

Serratula tinctoria L.

Seseli libanotis (L.) Kock

Sesleria varia (Jacquier) Wettstein

Sideritis hyssopifolia

***Silene vulgaris* (Jordan) Marsden - Jones et Turill**

Sorbus aria L. Crantz

Sorbus aucuparia L.

Sorbus mougeotii Soyer - Will. et Godron

Stachys alopecuros (L.) Bentham

Taraxacum officinale Weber

Teucrium chamaedrys L.

***Teucrium montanum* L.**

***Thalictrum minus* L.**

Thesium alpinum L.

***Thymus praecox* L. Borbas**

Trifolium badium Schreber

Vaccinium myrtillus L.

***Valeriana montana* L.**

Viburnum lantana L.

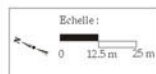
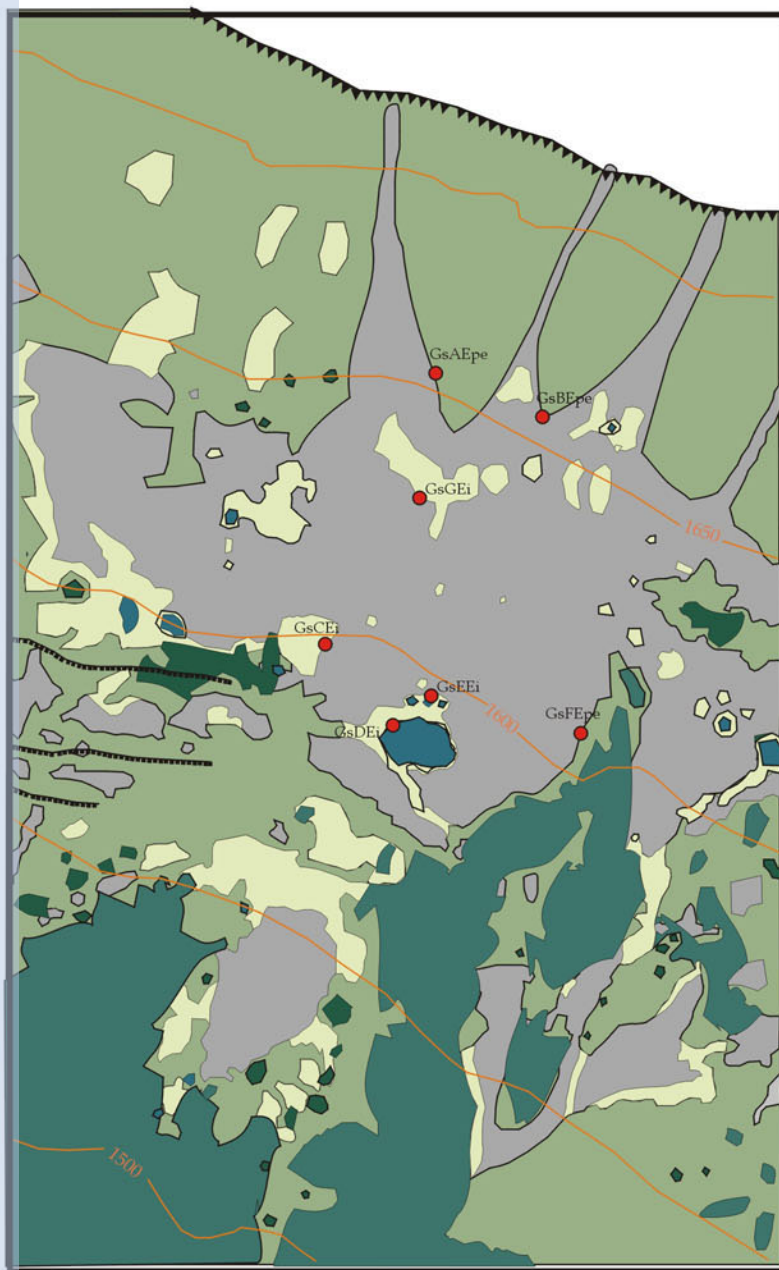
Vicia cracca L.

ANNEXE H

Cartes de localisation des transects phyto-écologiques

Carte de localisation des transects phyto-écologiques (Grande Sûre)

tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2006



Légende :

Classes physiologiques :

Formation (s) ligneuse (s)

Forêt

Formation (s) de transition

Ilot arbustif sur formation végétale

Ilot arbustif sur éboulis

Formation (s) non boisée (s)

Piquetage herbacé

Pelouse

Secteur rhexistasique stabilisé

GsFEpe Transect : les transects dont la longueur est < 10 m sont représentés par le figuré ponctuel.

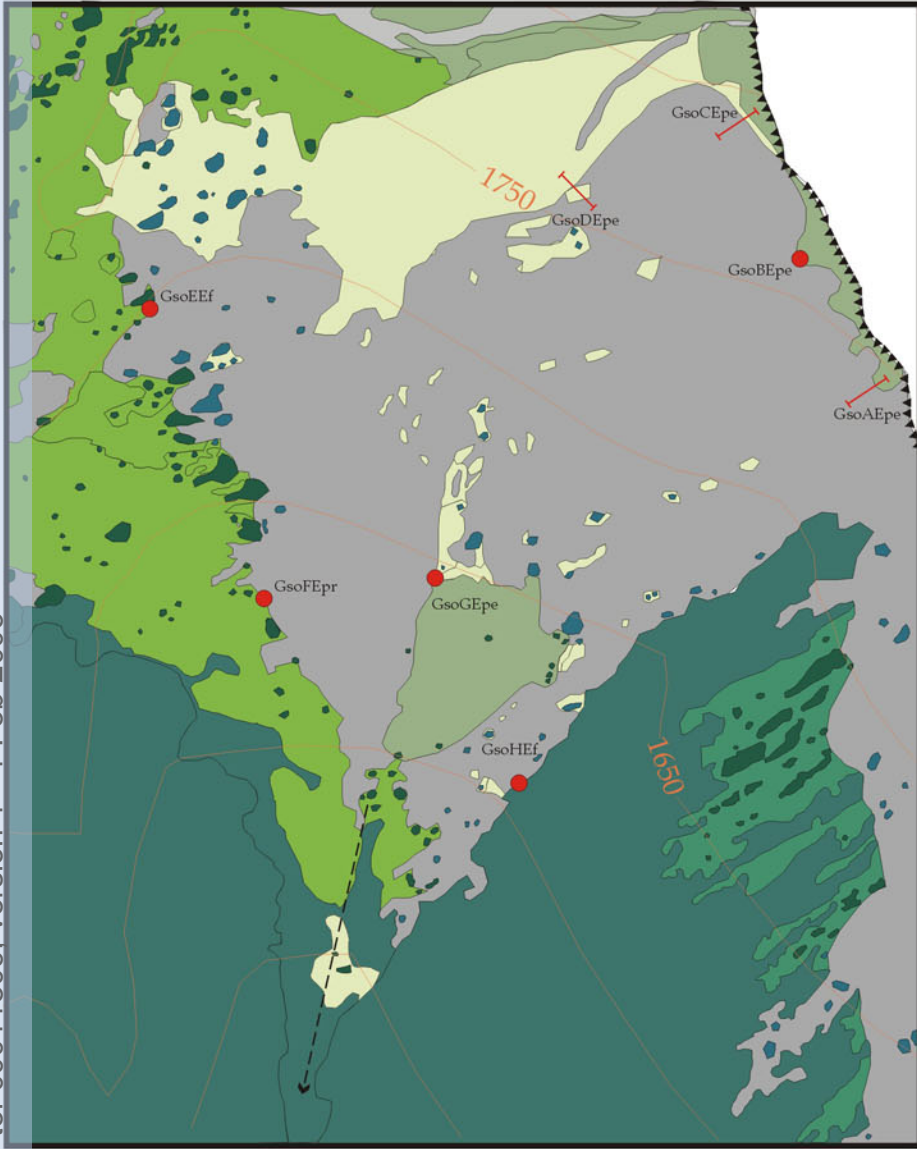
Non cartographié

Sources : S. ARQUES, 2003

-Photographie aérienne, IGN, mission 2003 (couleurs naturelles), n°2345, 1/25 000°.
-Photographie oblique S. ARQUES (2003)
-Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000°, Top 25, OT 3334.

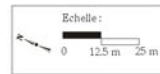
Carte de localisation des transects phyto-écologiques (Grand Som)

tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2006



Sources : S. ARQUES, 2003

- Photographie aérienne, IGN, mission 2001 (couleurs naturelles), n°2737, 1/25 000°.
 - Photographie oblique S. ARQUES (2003)
 - Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000 °, Top 25, OT 3334.



Légende :

Classes physiologiques :

Formation (s) ligneuse (s)

- Forêt
- Lande
- Ilot arbustif sur formation végétale
- Ilot arbustif sur éboulis

Formation (s) non boisée (s)

- Piquetage herbacé
- Pelouse
- Prairie

GsoAEpe Transect : les transects dont la longueur est < 10 m sont représentés par le figuré ponctuel.

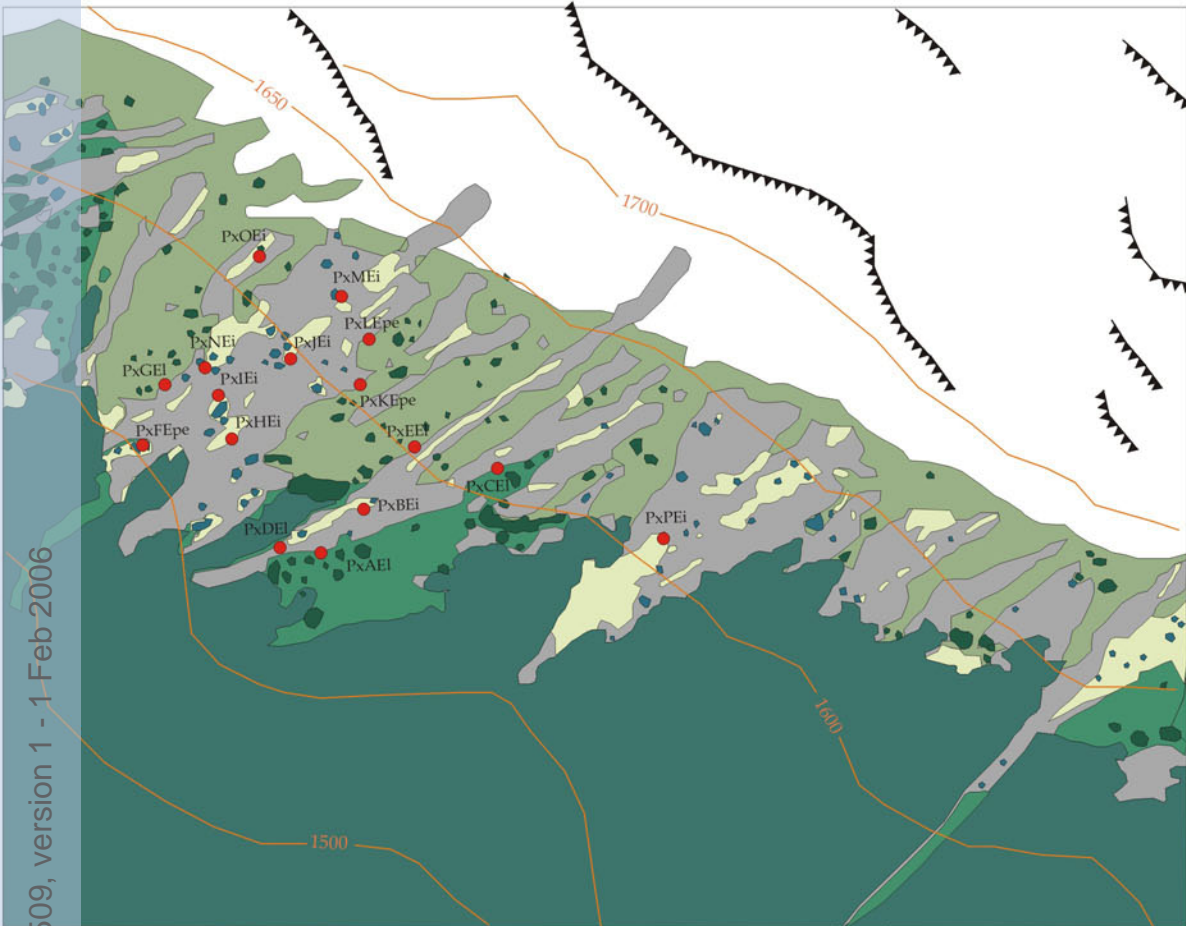
Corniche principale (calcaire urgonien)

Secteur rhexistatique stabilisé

Secteur rhexistatique actif (couloir d'alimentation)

Non cartographié

Carte de localisation des transects phyto-écologiques (Pelloux)



Sources : S. ARQUES, 2003

Photographie aérienne, IFN, mission 1993 (IRC), n°1528, 1/17 000°.

Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000°, Top 25, OT 3334.

tel-0001509, version 1 - 1-Feb-2006

Légende :


Classes physiologiques :


Formation (s) ligneuse (s)

 Forêt

Formation (s) de transition

 Lande

 Ilot arbustif sur formation végétale

 Ilot arbustif sur éboulis

Formation (s) non boisée (s)

 Piquetage herbacé

 Pelouse

PxPEi



Transect : les transects dont la longueur est < 10 m sont représentés par le figuré ponctuel.

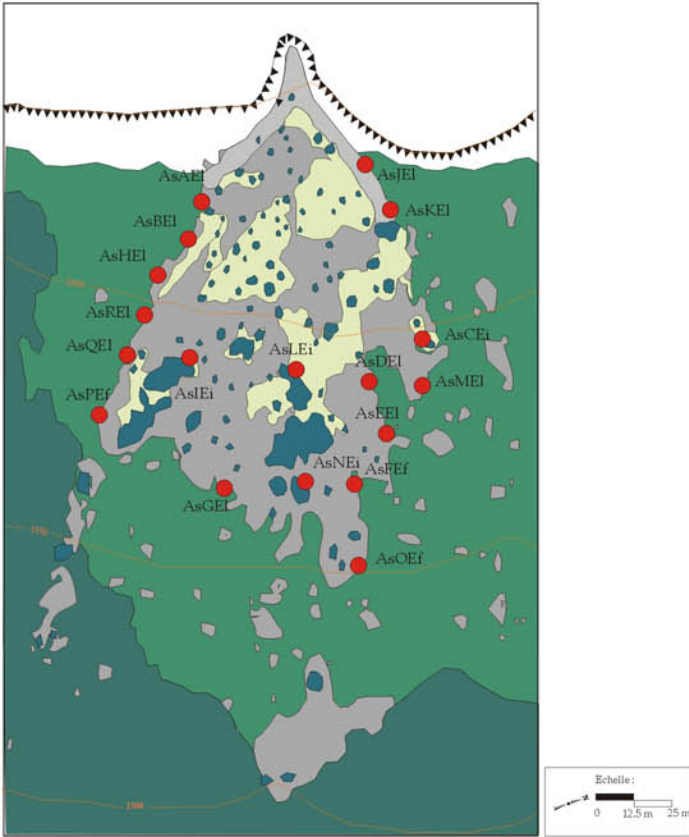


Secteur rhexistasique stabilisé



Non cartographié
(secteurs à vires herbeuses)

Carte de localisation des transects phyto-écologiques (Aulp du Seuil)



Sources : S. ARQUES, 2003

- Photographie aérienne, IFN, mission 1993 (IRC), n°1545, 1/17 000.
- Photographie oblique, S. ARQUES (2001).
- Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000, Top 25, OT 3334.

tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2006

Légende :

Classes phytosociologiques :

Formation (s) ligneuse (s)

Forêt

Formation (s) de transition

Lande arborée

Ilot arbustif sur formation végétale

Ilot arbustif sur éboulis

Formation (s) non boisée (s)

Piquetage herbacé

Secteur rhexistasique stabilisé

Secteur rhexistasique actif

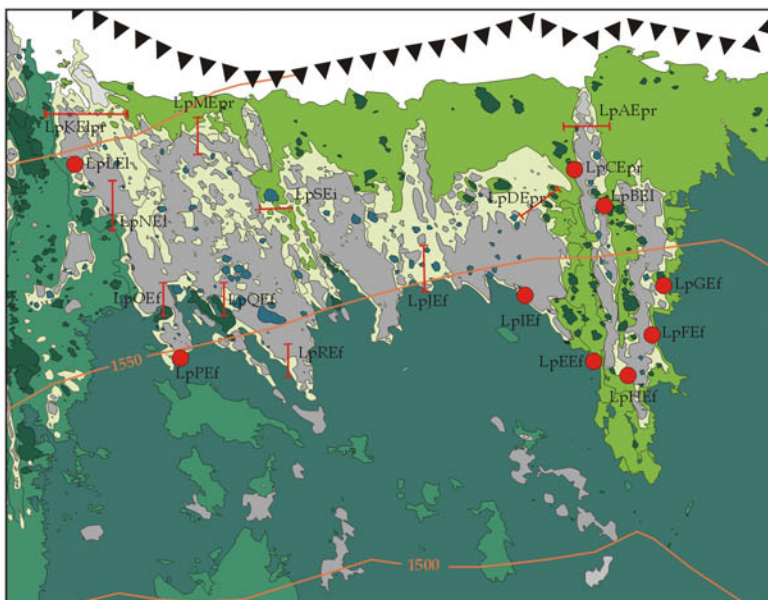
Non cartographié

AsREI



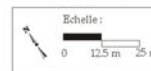
Transect : les transects dont la longueur est < 10 m sont représentés par le figuré ponctuel.

Carte de localisation des transects phyto-écologiques de La Plagne (2001)



Sources : S. ARQUES, 2003

- Photographie aérienne, IGN, mission 2001 (couleurs naturelles), n°1129, 1/25 000.
 - Photographie oblique S. ARQUES (2003)
 - Carte topographique IGN, Massif de la Chartreuse Sud, 1/25 000, Top 25, OT 3334.







tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2006






Légende :

Classes physiologiques :

Formation (s) ligneuse (s)

-  Forêt
-  Lande
-  Ilot arbustif sur formation végétale
-  Ilot arbustif sur éboulis

Formation (s) non boisée (s)

-  Piquetage herbacé
-  Prairie
-  Secteur rhexistasique actif
-  Secteur rhexistasique stabilisé
-  Non cartographié

LpEEf



Transect : les transects dont la longueur est < 10 m sont représentés par le figuré ponctuel.

ANNEXE I

Valeurs écologiques de Landolt et types biologiques de Raunkiaer (LAUBER et WAGNER, 2000)

A. Les valeurs indicatrices de Landolt

1. Valeur d'humidité

Elle indique l'humidité moyenne du sol exigée pendant la période de végétation.

- 1 plantes des sols très secs, indicatrices de sécheresse (xérophiles)
- 2 plantes indicatrices de sécheresse modérée (mésoxérophiles)
- 3 plantes des sols modérément humides (mésophiles à mésohygrocline)
- 4 plantes des sols humides (hygrocline)
- 5 plantes des sols mouillés détrempés (hygrophile)

2. Valeur de réaction

Elle indique quelle acidité (pH) une plante exige. Teneur en ions H_3O^+ du sol (1 : sol acide et pauvre, 5 : sol neutre à alcalin)

- 1 plantes indicatrices d'acidité prononcée (pH 3-4,5)
- 2 plantes indiquant une acidité moyenne (pH 3,5-5,5)
- 3 plantes des sols peu acides (pH 4,5-7,5)
- 4 plantes des sols moyennement riches en base (5,5-8)
- 5 plantes des sols riches en bases, en général calcaires (pH>6,5)

3. Valeur de substances nutritives

Elle indique la teneur exigée ou tolérée en substances nutritives, surtout en azote.

- 1 plante des sols très pauvres en substances nutritives (oligotrophes)
- 2 plante des sols maigres
- 3 plantes croissant sur des sols ni maigres ni fumés (mésotrophes)
- 4 plantes des sols riches en substances nutritives
- 5 plantes des sols surfumés (eutrophes)

4 Valeur de lumière

Indique les besoins relatifs en lumière pendant la période de végétation.

- 1 plantes des stations très ombragées (sciaphiles)
- 2 plantes des stations ombragées (semi-sciaphiles)
- 3 plantes des stations moyennement ombragées (photophiles)
- 4 plantes croissant en pleine lumière, mais supportant temporairement l'ombre (semi-héliophiles)
- 5 plantes ne croissant qu'en pleine lumière (héliophiles)

5 Valeur de température

Indique la température moyenne relative à laquelle la plante est soumise pendant la période de végétation, en fonction de l'altitude notamment.

- 1 plantes typiques de haute montagne et des régions arctiques, en général au-dessus de la limite des forêts, en basse altitude indicatrices de froid (cryophiles).
- 2 plantes des montagnes et des régions boréales, typiques de l'étage subalpin
- 3 plantes soumises à une température équivalente à celle de l'étage montagnard
- 4 plantes soumises à une température équivalente à celle de l'étage collinéen (semi-thermophiles)
- 5 plantes des stations les plus chaudes, à distribution centrée dans l'Europe méridionale (thermophiles)

B. Les types biologiques de Raunkiaer

- 1 *PhanérophYTE vert estival* : plante ligneuse dépassant 4m de haut et perdant ses feuilles ou ses aiguilles en montagne (ex. le hêtre, l'érable).
- 2 *PhanérophYTE sempervirent* : plante ligneuse dépassant 4m de haut et gardant ses feuilles ou ses aiguilles toute l'année (ex : l'épicéa, le houx)
- 3 *NanophanérophYTE vert estival* : buisson de 0,4-4m de haut perdant ses feuilles ou ses aiguilles en automne (ex : le sureau, le noisetier, les rosiers).
- 4 *NanophanérophYTE sempervirent* : buisson de 0,4-4m de haut gardant ses feuilles ou ses aiguilles toute l'année (ex : le buis, le rhododendron).
- 5 *Chaméphyte ligneux* : arbrisseau, de moins de 0,4m de haut dont les bourgeons passent l'hiver au-dessus du sol (ex : la myrtille, le saule réticulé).
- 6 *Chaméphyte herbacé* : plante herbacée dont les bourgeons passent l'hiver au-dessus du sol sur des tiges persistantes (ex : la giroflée).
- 7 *Hémicryptophyte* : plante herbacée dont les bourgeons sont situés au niveau du sol ou juste au-dessous du sol (ex : les fétuques, le pissenlit).
- 8 *Géophyte* : plante herbacée dont les bourgeons passent l'hiver sous le sol, pourvue d'un tubercule, d'un rhizome ou d'un bulbe (ex : l'iris, la jonquille).
- 9 *Thérophyte* : plante annuelle qui meurt après la fructification et qui ne survit que sous forme de graine (ex : le lin, le pâturin annuel, la lentille).
- 10 *Thérophyte -hémicryptophyte* : plante thérophyte dans les contrées chaudes, mais dans nos climats généralement bisannuelle et survivant par une rosette de feuilles (ex : l'onagre bisannuelle, l'herbe à Robert, le myosotis des champs).

Valeurs indicatrices de Landolt et types biologiques de Raunkiaer

Espèce	F	R	N	L	T	Type biologique
<i>Abies alba</i> Mill.	4	0	3	1	3	2
<i>Acer pseudoplatanus</i>	4	3	4	2	3	1
<i>Calamagrostis Varia</i> (Schrader) Host	2	4	2	3	3	7
<i>Aconitum vulparia</i>	4	4	3	2	3	7
<i>Alchemilla conjuncta</i>	3	4	2	4	2	7
<i>Allium narcicifolium</i>	1	3	2	5	3	8
<i>Amelanchier ovalis</i> Medicus	2	4	2	4	3	3
<i>Anthericum ramosum</i> L.	2	4	2	3	3	7
<i>Anthriscus sylvestris</i> (L.) Hoffman	3	3	4	3	3	7
<i>Anthyllis montana</i> L.	1	5	2	4	4	5
<i>Anthyllis vulneraria</i> L.	1	4	3	3	4	7
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i> L. Sprengel	2	3	2	3	2	5
<i>Asperula cynanchica</i> L.	1	4	2	5	3	7
<i>Asplenium viride</i> Hudson	3	4	2	3	2	7
<i>Astrantia major</i> L.	3	4	3	3	2	7
<i>Bartsia alpina</i> L.	4	3	3	4	2	8
<i>Briza media</i> L.	2	3	2	4	3	7
<i>Bromus erectus</i> L.	2	4	2	4	4	7
<i>Calamintha grandiflora</i> L. Moench	3	3	3	2	3	8
<i>Campanula cochleariifolia</i> Lam.	4	4	2	4	2	7
<i>Campanula rotundifolia</i> L.	2	3	2	4	4	7
<i>Cardamine pentaphyllos</i> (L.) Cramtz	3	4	4	2	3	8
<i>Carex flacca</i> Schreber	3	4	2	3	3	8
<i>Carex sempervirens</i> Villars	2	3	2	4	1	7
<i>Carlina acaulis forma nana</i> (Degen) Meusel et Werner	2	2	2	4	3	7
<i>Centaurea montana</i> L.	2	5	2	4	4	7
<i>Centranthus angustifolius</i> (Mill.) DC	2	4	2	3	4	7
<i>Cephalanthera longifolia</i> (L.) Fritsch	3	3	3	3	2	8
<i>Cirsium arvense</i> (L.) Scopoli	2	3	2	3	4	8
<i>Convallaria majalis</i> L.	2	5	2	4	2	5
<i>Coronilla vaginalis</i> Lam.	3	3	3	3	3	3

	F	R	N	L	T	Type biologique
<i>Corylus avellana</i> L.	1	4	3	4	3	3
<i>Cotoneaster integerrimus</i> (Medicus)	1	4	2	4	4	3
<i>Crepis pyrenaica</i> (L.) Greuter	3	3	4	3	4	7
<i>Dactylis glomerata</i> L.	3	4	3	2	3	3
<i>Daphne mezereum</i> L.	2	4	2	3	3	7
<i>Dianthus monspessulanus</i> L.	2	4	2	5	1	5
<i>Dryas octopetala</i> L.	3	3	4	3	3	7
<i>Epilobium angustifolium</i> L.	3	3	3	3	3	7
<i>Epilobium montanum</i> L.	2	4	1	3	3	8
<i>Epipactis atrorubens</i> (Hoffman) Besser	2	5	2	4	2	7
<i>Erinus alpinus</i> L.	3	4	3	2	4	6
<i>Euphorbia amygdaloides</i> L.	2	3	2	4	3	7
<i>Euphorbia cyparissias</i> L.	2	4	2	4	2	9
<i>Euphrasia salisburgensis</i> Hoppe	3	0	3	1	3	1

<i>Fagus sylvatica</i> L.	2	2	2	4	3	7
<i>Festuca ovina</i> L.	3	3	3	3	3	7
<i>Fragaria vesca</i> L.	4	4	4	2	4	1
<i>Galeopsis angustifolia</i> Hoffmann	2	3	2	4	2	7
<i>Galium anisophyllum</i> Villars	3	4	2	4	2	7
<i>Gentiana verna</i> L.	3	4	3	4	2	7
<i>Gentiana lutea</i> L.	3	4	2	4	2	7
<i>Gentiana angustifolia</i>	3	4	2	3	3	10
<i>Geranium phaeum</i> L.	3	3	4	2	3	10
<i>Geranium robertianum</i> L.	3	3	4	3	2	7
<i>Geranium sylvaticum</i> L.	1	5	2	5	2	6
<i>Globularia cordifolia</i> L.	2	5	2	4	2	7
<i>Globularia n udicaulis</i> L.	3	3	2	4	3	8
<i>Gymnocarpium dryopteris</i> L. Newman	3	4	3	3	3	8
<i>Gymnocarpium robertianum</i> (Hoffman) Newman	2	3	2	4	2	5
<i>Helianthemum nummularium</i> L. Miller	2	4	3	2	3	6
<i>Helleborus foetidus</i> L.	2	4	2	4	2	7
<i>Hieracium murorum</i> L.	2	3	2	4	3	7
<i>Hieracium pilosella</i> L.	2	2	2	3	4	7
<i>Hieracium umbellatum</i> L.	3	5	2	4	2	7
<i>Hieracium vulgatum</i>	2	4	2	4	3	6
<i>Hippocrepis comosa</i> L.	2	3	2	3	3	7
<i>Hypericum maculatum</i> Crantz s.l.	4	4	2	4	2	7
<i>Hypericum nummularium</i> L.	2	2	2	4	2	4

	F	R	N	L	T	Type biologique
<i>Juniperus communis</i> L.	2	3	3	4	4	7
<i>Knautia arvensis</i> L. Coulter	3	3	3	3	3	7
<i>Lahtyrus heterophyllus</i> L.	3	3	3	1	3	6
<i>Lamium galeobdolon</i> L.	3	4	4	4	3	10
<i>Lamium purpureum</i> L.	2	4	3	3	3	7
<i>Laserpitium latifolium</i> L.	2	4	2	4	3	7
<i>Laserpitium siler</i> L.	3	4	2	3	2	7
<i>Leucanthemum adustum</i> (Koch) Gremler	4	4	2	5	1	6
<i>Linaria alpina</i> L.	3	4	3	2	2	3
<i>Lonicera alpigena</i> L.	3	3	3	2	2	3
<i>Lonicera nigra</i> L.	3	3	3	3	3	3
<i>Lonicera xylosteum</i> L.	3	4	3	3	2	7
<i>Lotus alpinus</i> (DC.) Ramond	3	3	3	5	1	7
<i>Lotus corniculatus</i> L.	3	4	2	4	2	7
<i>Mercurialis perennis</i> L.	3	4	3	1	3	8
<i>Origanum Vulgare</i> L.	2	3	3	3	4	8
<i>Petasites paradoxus</i> (Retzius) Baumgartner	4	5	3	5	2	8
<i>Peucedanum ostruthium</i> (L.) Koch	3	3	4	3	2	7
<i>Phegopteris connectilis</i> (Michaux) Watt	3	3	3	2	3	8
<i>Phleum pratense</i> L.	3	3	4	4	3	7
<i>Picea abies</i> (L.) Karster	3	0	3	1	2	2
<i>Pimpinella major</i> L. (Hudson)	3	3	4	3	3	7
<i>Pimpinella saxifraga</i> L.	2	3	2	4	3	7
<i>Pinus uncinata</i> Miller	0	0	2	4	3	2
<i>Poa cenisia</i> Allioni	3	4	2	4	2	8
<i>Phyteuma betonocifolium</i> Vill. = <i>P. scaposum</i> R. Schultz	3	2	2	3	2	7

<i>Phyteuma hemisphaericum</i> L.	2	2	2	4	1	7
<i>Polygala chamaebuxus</i> L.	2	4	2	3	2	5
<i>Polygonatum odoratum</i> (Miller) Druce	2	3	3	3	3	8
<i>Polystichum lonchitis</i> (L.) Roth	3	4	3	3	2	7
<i>Prenanthes purpurea</i> L.	3	3	3	2	3	7
<i>Primula acaulis</i> (L.) L.	3	3	3	3	4	7
<i>Pritzelago alpina</i> L.	4	4	2	5	1	7
<i>Pulsatilla alpina</i> (L.) Delarbre	3	4	3	4	2	7
<i>Ranunculus repens</i> L.	4	3	4	3	3	7
<i>Rhamnus alpina</i> L.	2	4	2	3	3	3
<i>Rhinantus alectorolophus</i> (Scopo) Pollich	3	4	3	4	3	9
<i>Rhododendron ferrugineum</i> L.	3	2	2	3	2	4
<i>Ribes alpinum</i> L.	3	4	3	3	2	3
<i>Rosa montana</i> Chaix	1	3	3	4	4	3
<i>Rosa pendulina</i> L.	3	3	3	3	2	3
<i>Rubus idaeus</i> L.	3	3	4	3	3	3

	F	R	N	L	T	Type biologique
<i>Rumex acetosa</i> L.	3	3	3	4	3	7
<i>Rumex scutatus</i> L.	2	3	2	4	2	7
<i>Salix appendiculata</i> Villars	4	3	3	3	2	1
<i>Salix caprea</i> L.	3	3	3	3	3	1
<i>Salix retusa</i>	3	3	3	5	2	5
<i>Saxifraga rotundifolia</i> L.	4	3	4	2	2	7
<i>Scabiosa columbaria</i>	2	4	2	4	4	7
<i>Scrophularia juratensis</i> schleicher	2	5	2	4	3	7
<i>Sedum album</i> L.	1	3	2	5	3	6
<i>Senecio doronicum</i> (L.) L.	3	4	2	4	1	7
<i>Serratula tinctoria</i> L.	1	4	2	4	3	7
<i>Seseli libanotis</i> (L.) Kock	1	4	2	4	3	7
<i>Sesleria varia</i> (Jacquier) Wettstein	2	4	2	4	2	7
<i>Sideritis hyssopifolia</i>	2	5	2	4	2	8
<i>Silene vulgaris</i> (Jordan) Marsden - Jones et Turill	2	4	2	5	1	8
<i>Sorbus aria</i> L. Crantz	2	3	2	3	3	1
<i>Sorbus aucuparia</i> L.	3	2	2	3	3	1
<i>Sorbus mougeotii</i> Soyer - Will. et Godron	2	4	2	3	4	1
<i>Stachys alopecuros</i> (L.) Bentham	3	5	3	3	3	7
<i>Taraxacum officinale</i> Weber	3	3	4	4	4	7
<i>Teucrium chamaedrys</i> L.	1	4	2	3	4	5
<i>Teucrium montanum</i> L.	1	4	2	4	3	5
<i>Thalictrum minus</i> L.	2	4	2	3	2	7
<i>Thesium alpinum</i> L.	3	3	2	4	2	7
<i>Thymus praecox</i> L. Borbas	2	4	2	4	2	5
<i>Trifolium badium</i> Schreber	3	4	3	4	2	7
<i>Urtica dioica</i> L.	3	3	5	3	3	7
<i>Vaccinium myrtillus</i> L.	3	1	2	2	3	5
<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	3	2	2	3	2	5
<i>Valeriana montana</i> L.	3	5	2	3	2	8
<i>Viburnum lantana</i> L.	2	4	2	3	4	3
<i>Vicia cracca</i> L.	3	3	3	4	3	7
<i>Viola calcarata</i> L.	3	3	2	5	1	7

Modalités des valeurs écologiques pour les analyses multivariées (AFC et CAH)

Valeur d'humidité (F) :

1. ≤ 1
2.]1;2]
3.]2;3]
3. > 3

Valeur de réaction (R) :

1. $\leq 2,5$
2.]2,5;3,5]
3.]3,5;4]
4.]4;4,5]
5. $> 4,5$

Valeur de substances nutritives (N) :

1.]2;2,5]
2.]2,5;3]
3. > 3

Valeur de lumière (L) :

1. ≤ 3
2.]3;3,5]
3.]3,5;4]
4. > 4

Valeur de température (T) :

1. ≤ 2
2.]2;3]
3. > 3

Annexe J

Processus d'haloclastie : surfaces peintes

(escarpement secondaire, tablier d'éboulis de La Plagne, 1647 m)

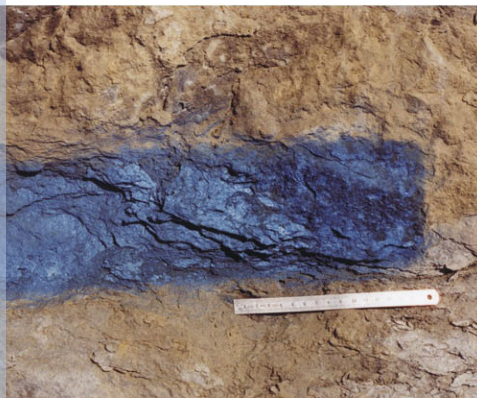
tel-00011509, version 1 - 1 Feb 2006



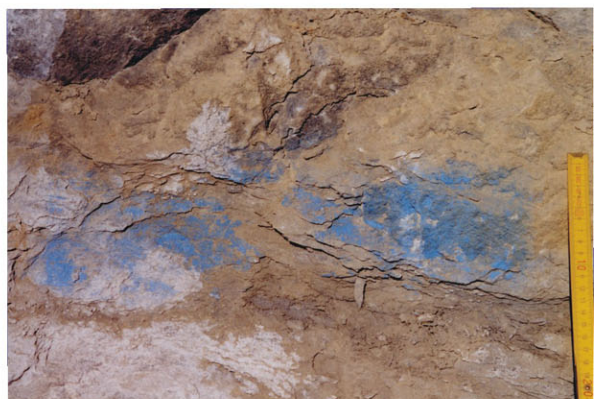
Mars 2002 : facette à calcaire sain



Juillet 2004



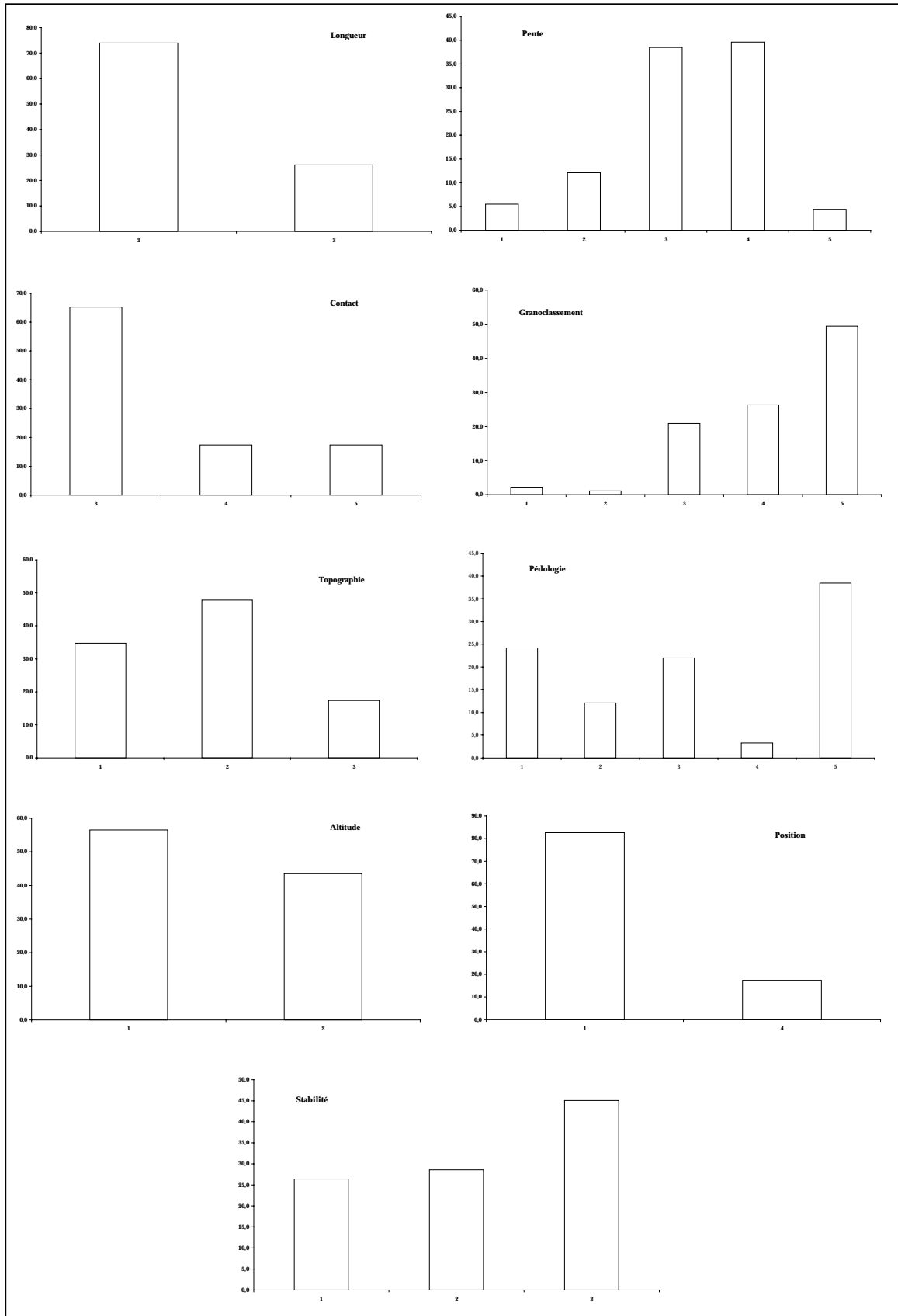
Mars 2002



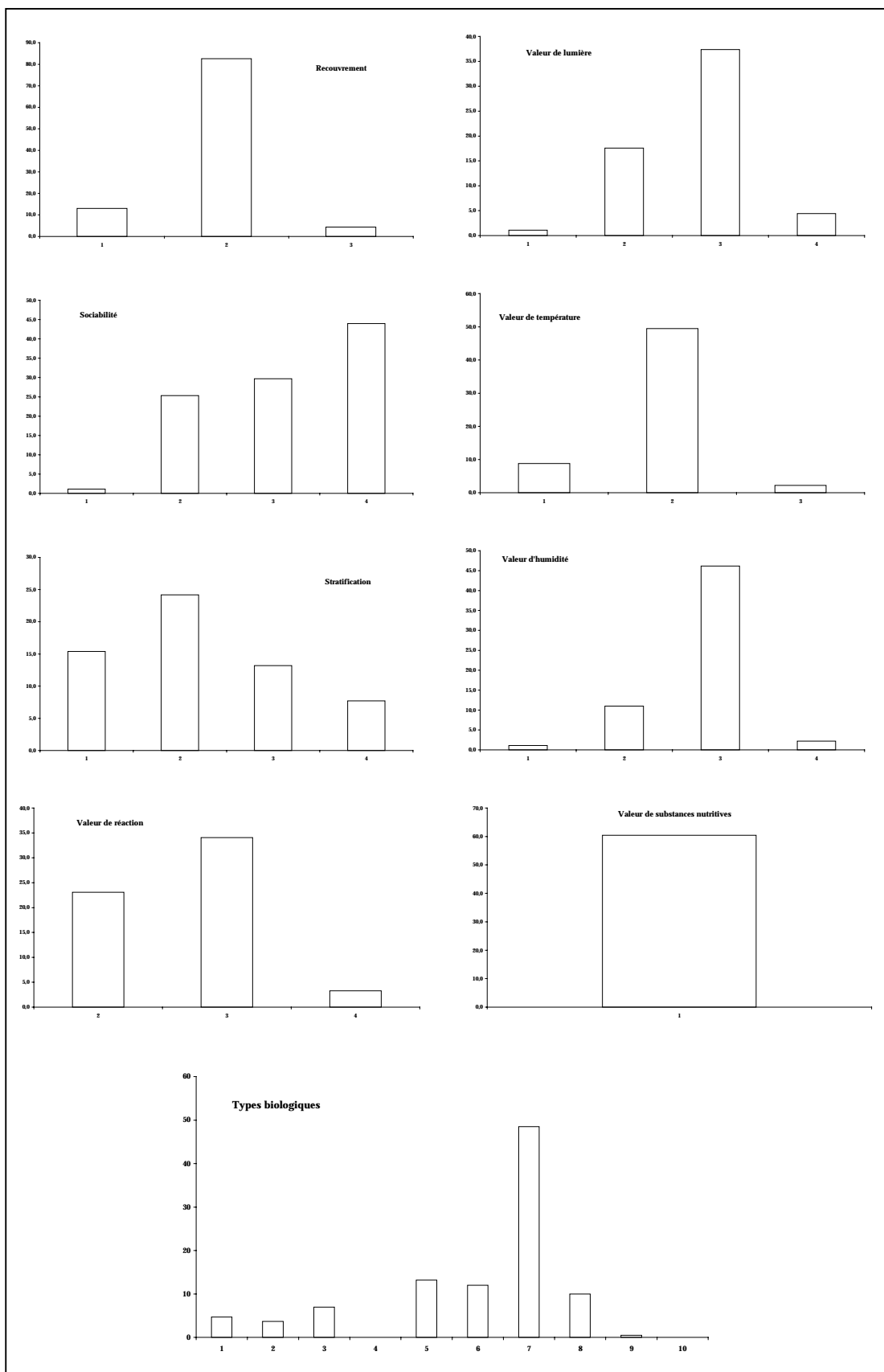
Juillet 2004

Annexe K

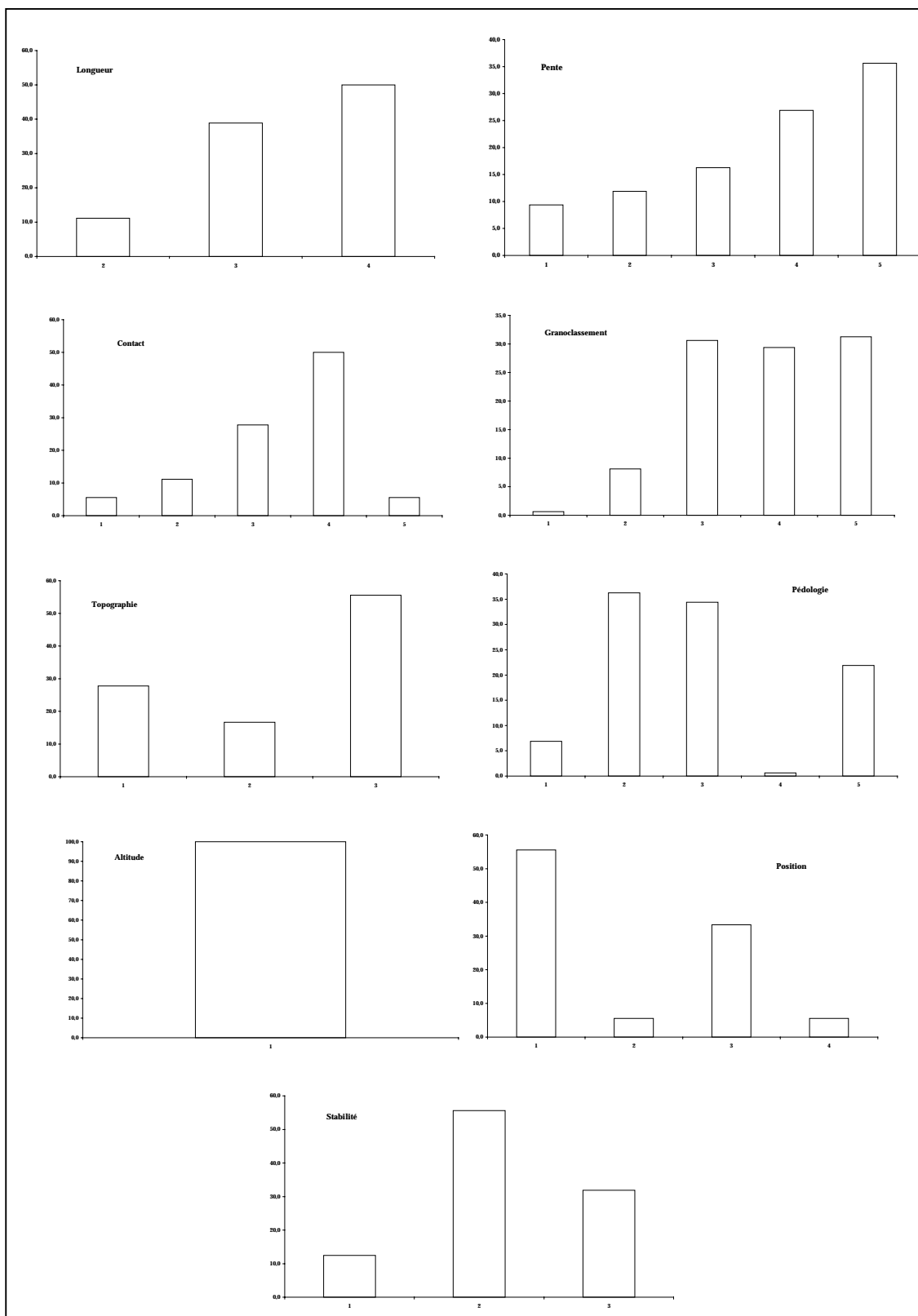
Distributions de fréquences des modalités des variables abiotiques et biotiques descriptives des cinq écosystèmes.



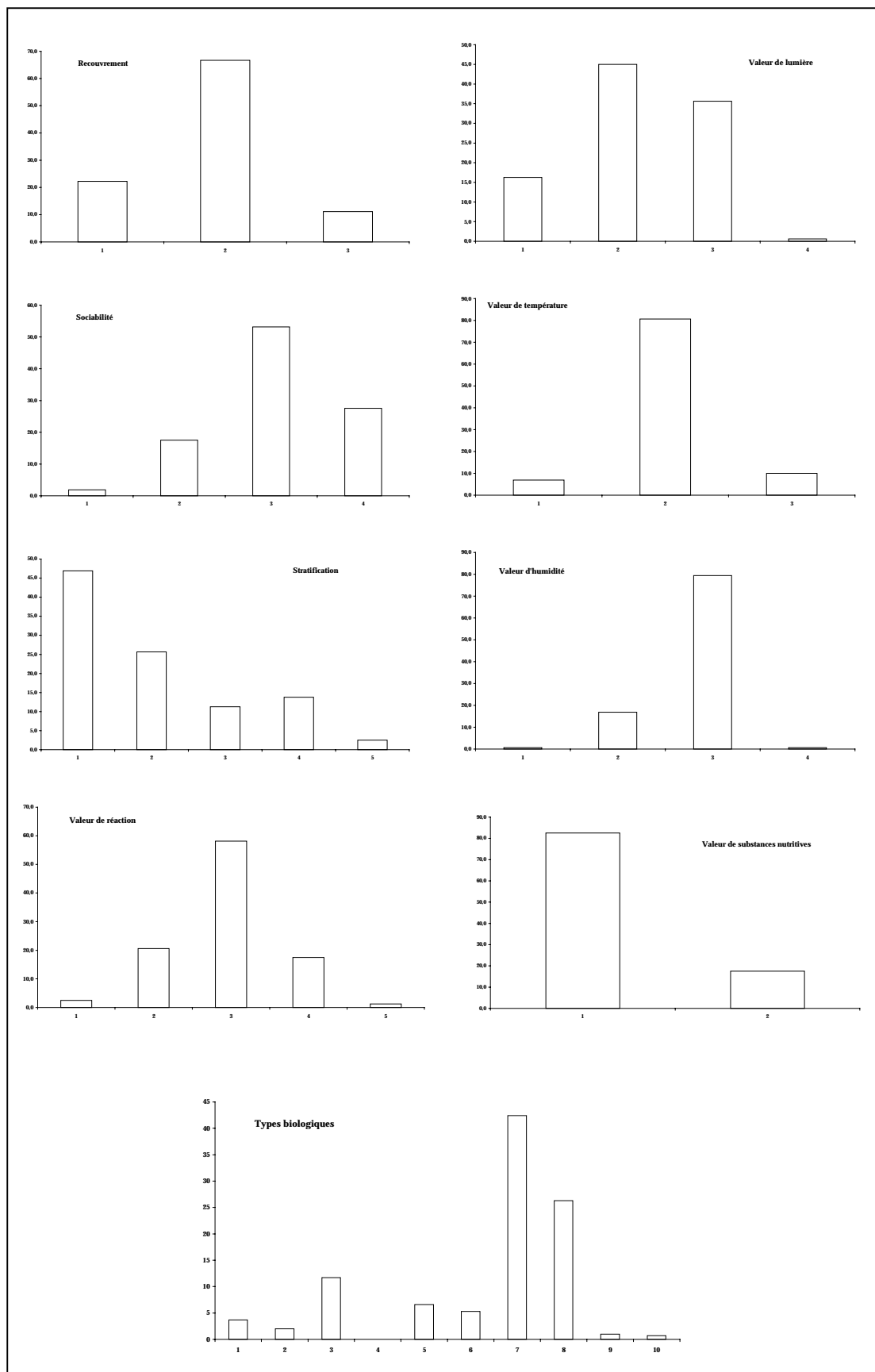
Distributions de fréquences des modalités des 9 variables abiotiques descriptives de la mosaïque biorhexistasique de l'Aulp du Seuil (adret, exposition est)



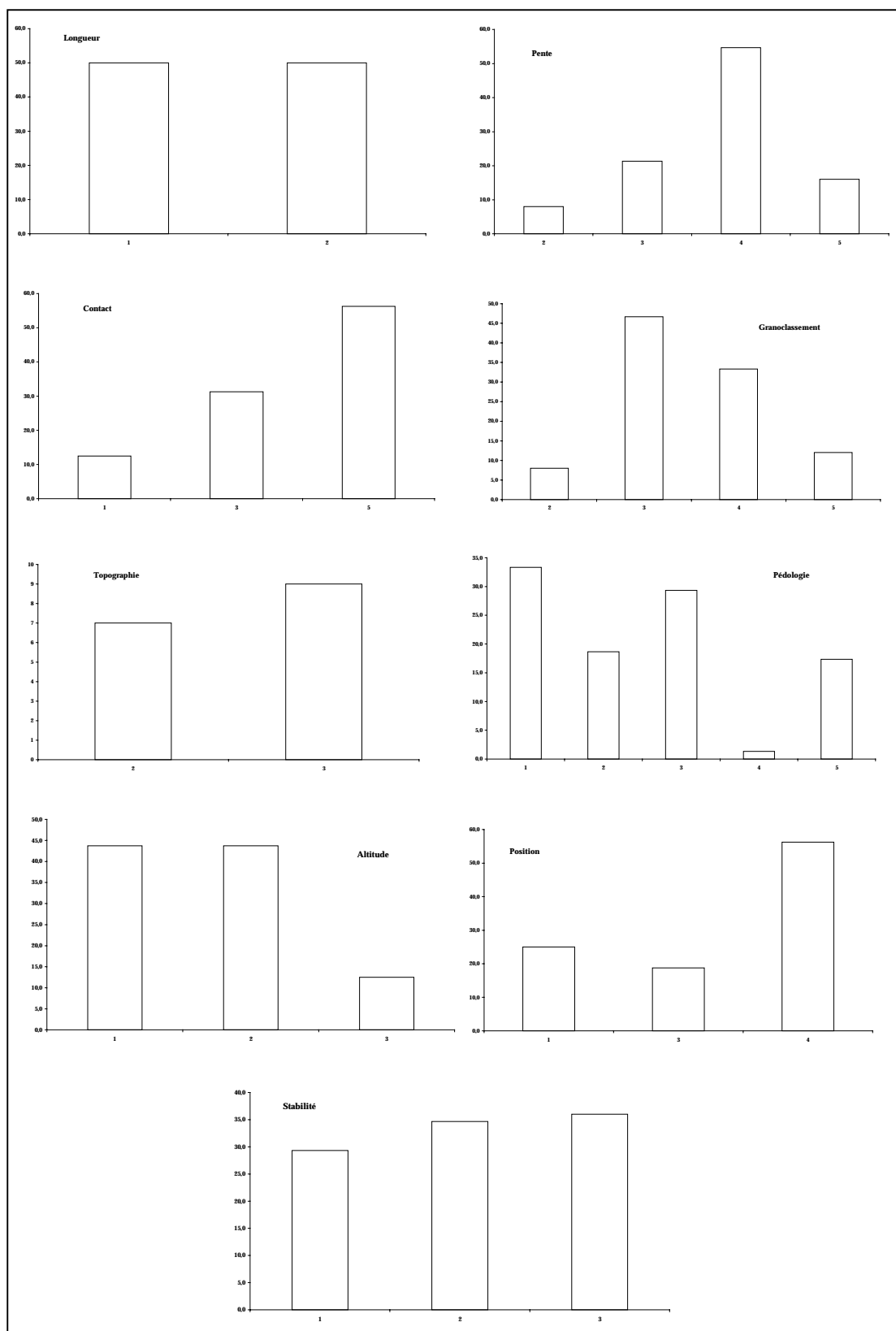
Distributions de fréquences des modalités des 9 variables biotiques descriptives de la mosaïque biorhexistasique de l'Aulp du Seuil (adret, exposition est)



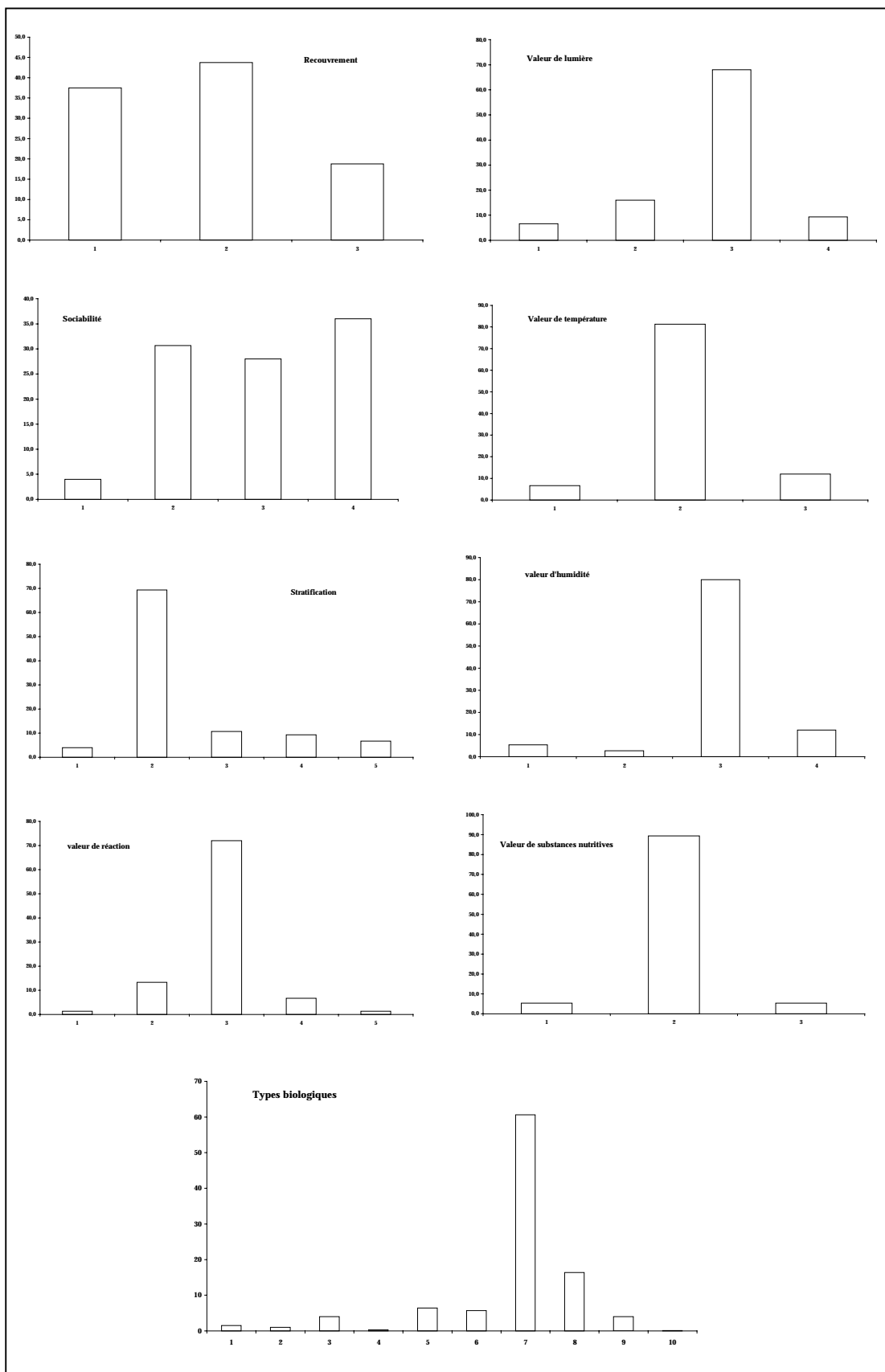
Distributions de fréquences des modalités des 9 variables abiotiques descriptives de la mosaïque biorhexistatique de La Plagne (adret, exposition sud)



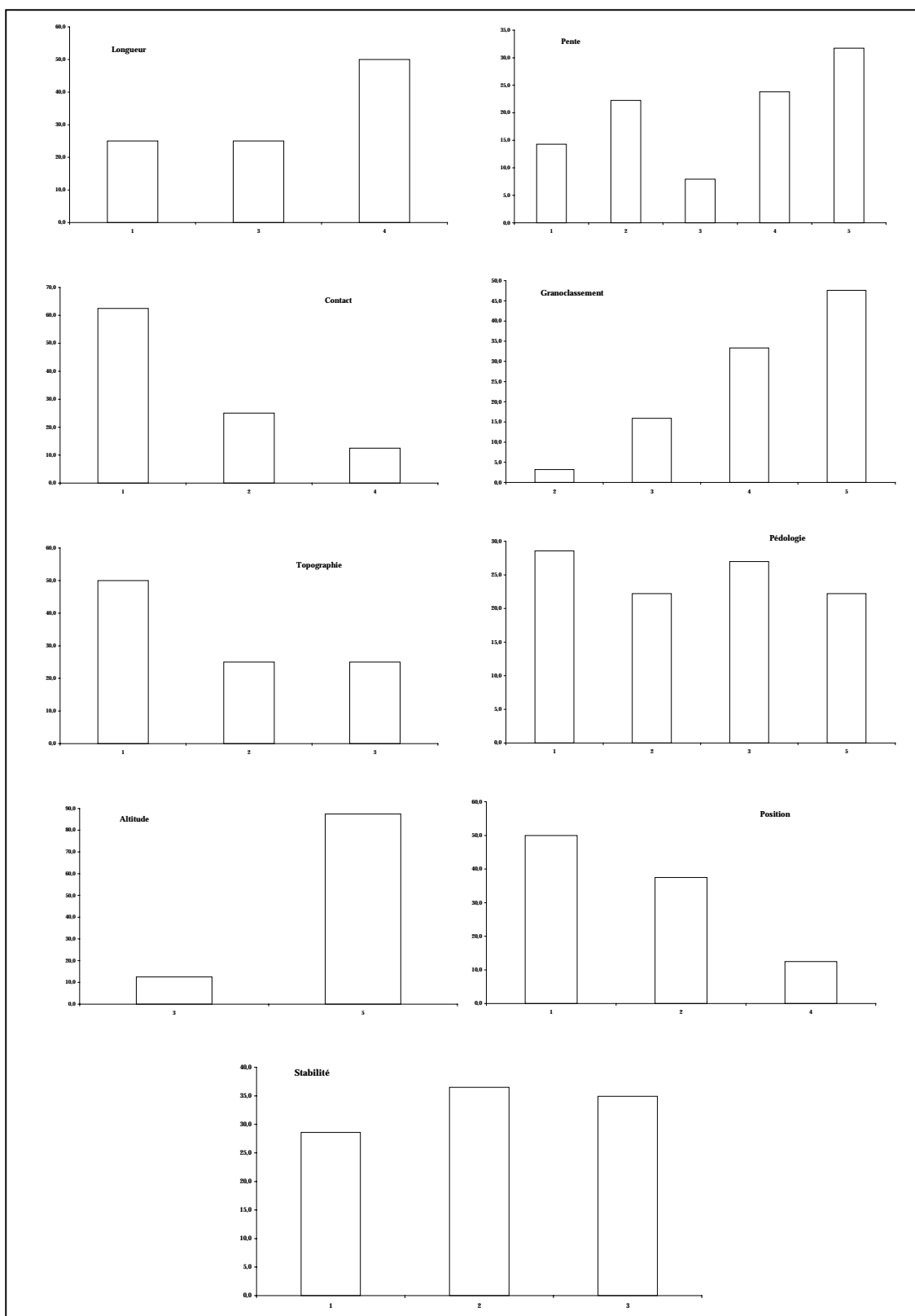
Distributions de fréquences des modalités des 9 variables biotiques descriptives de la mosaïque biorhexistatique de La Plagne (adret, exposition sud)



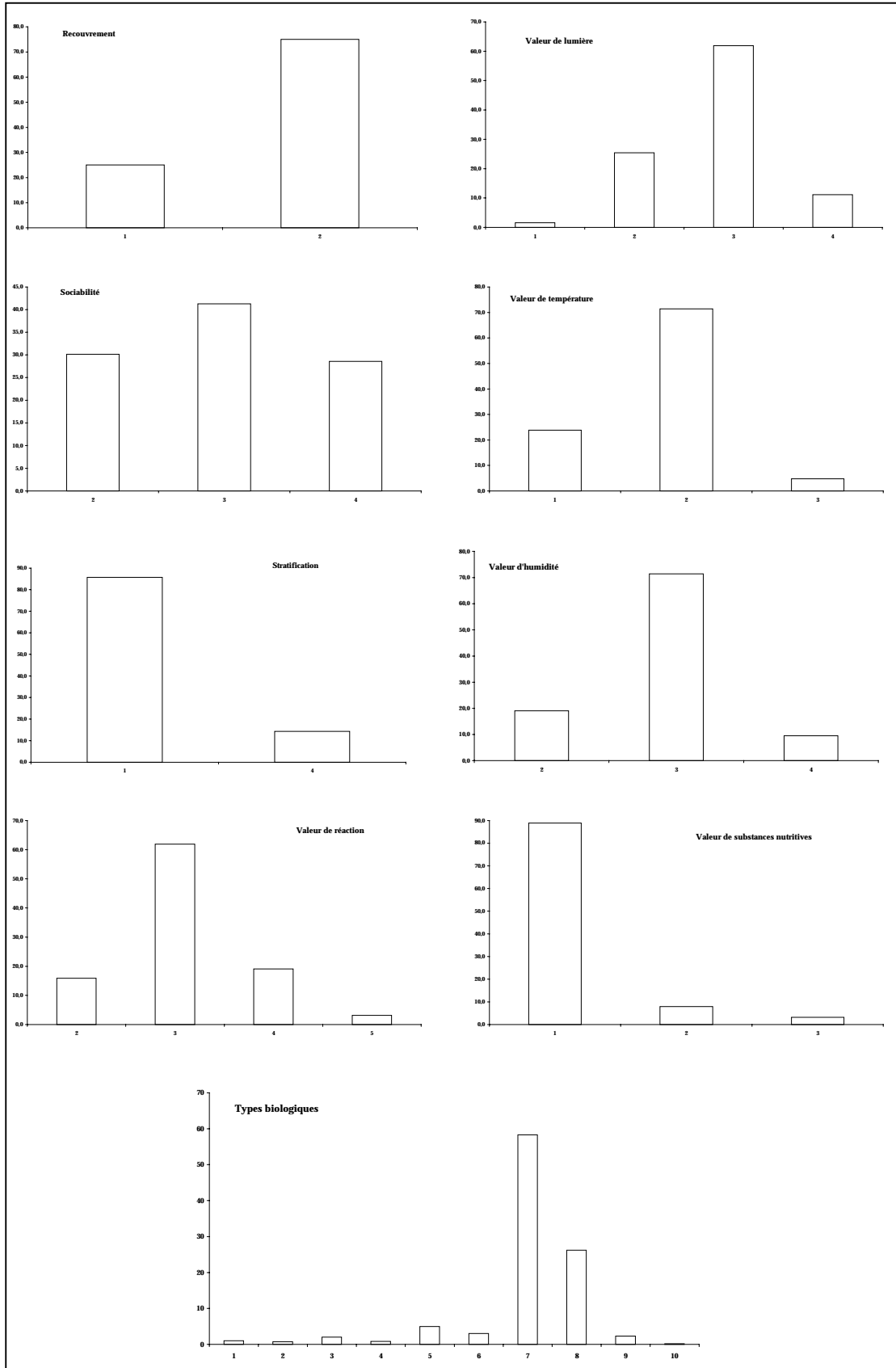
Distributions de fréquences des modalités des 9 variables abiotiques descriptives de la mosaïque biorhexistatique des Pelloux (adret, exposition est)



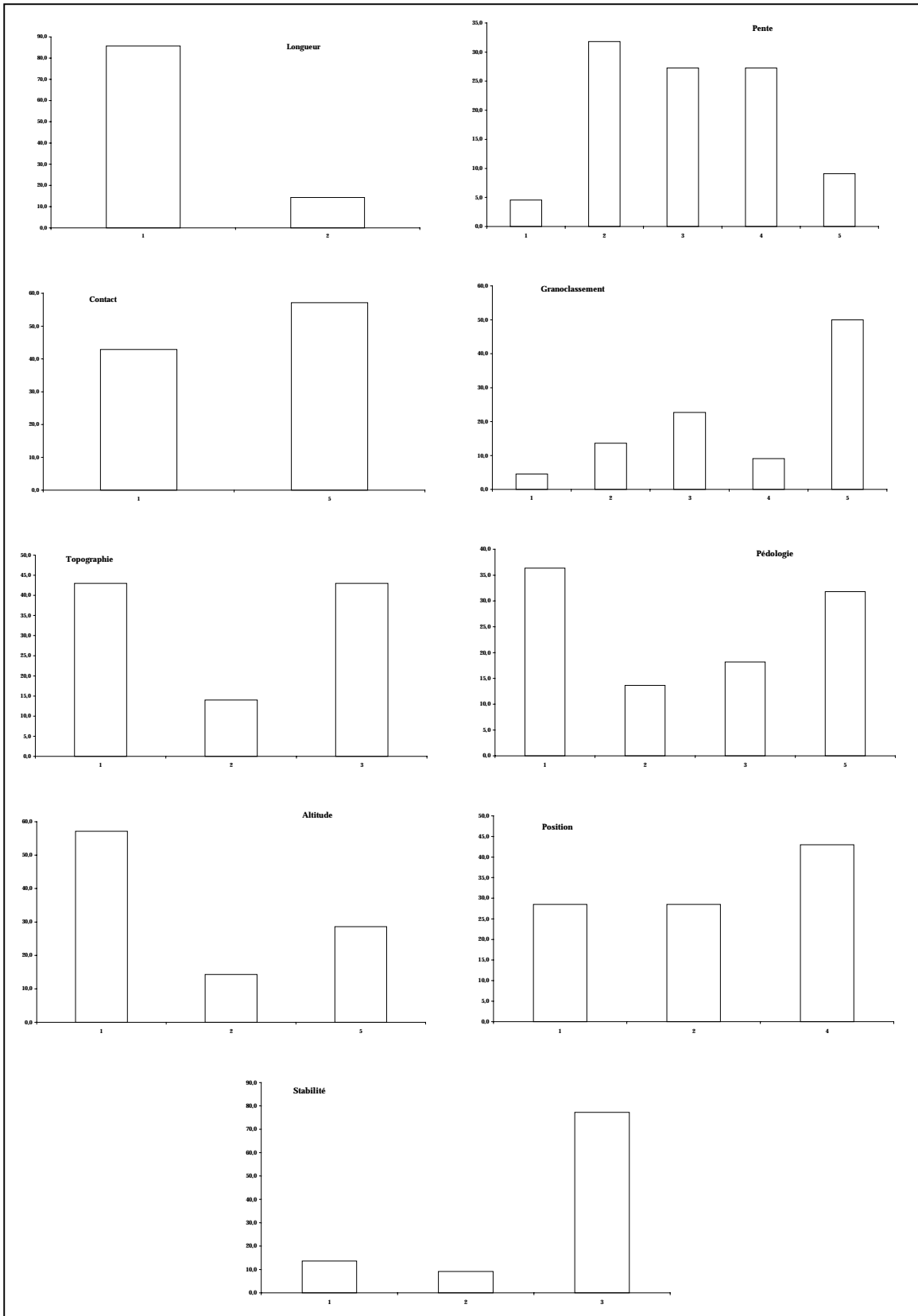
Distributions de fréquences des modalités des 9 variables biotiques descriptives de la mosaïque biorhexistatique des Pelloux (adret, exposition est)



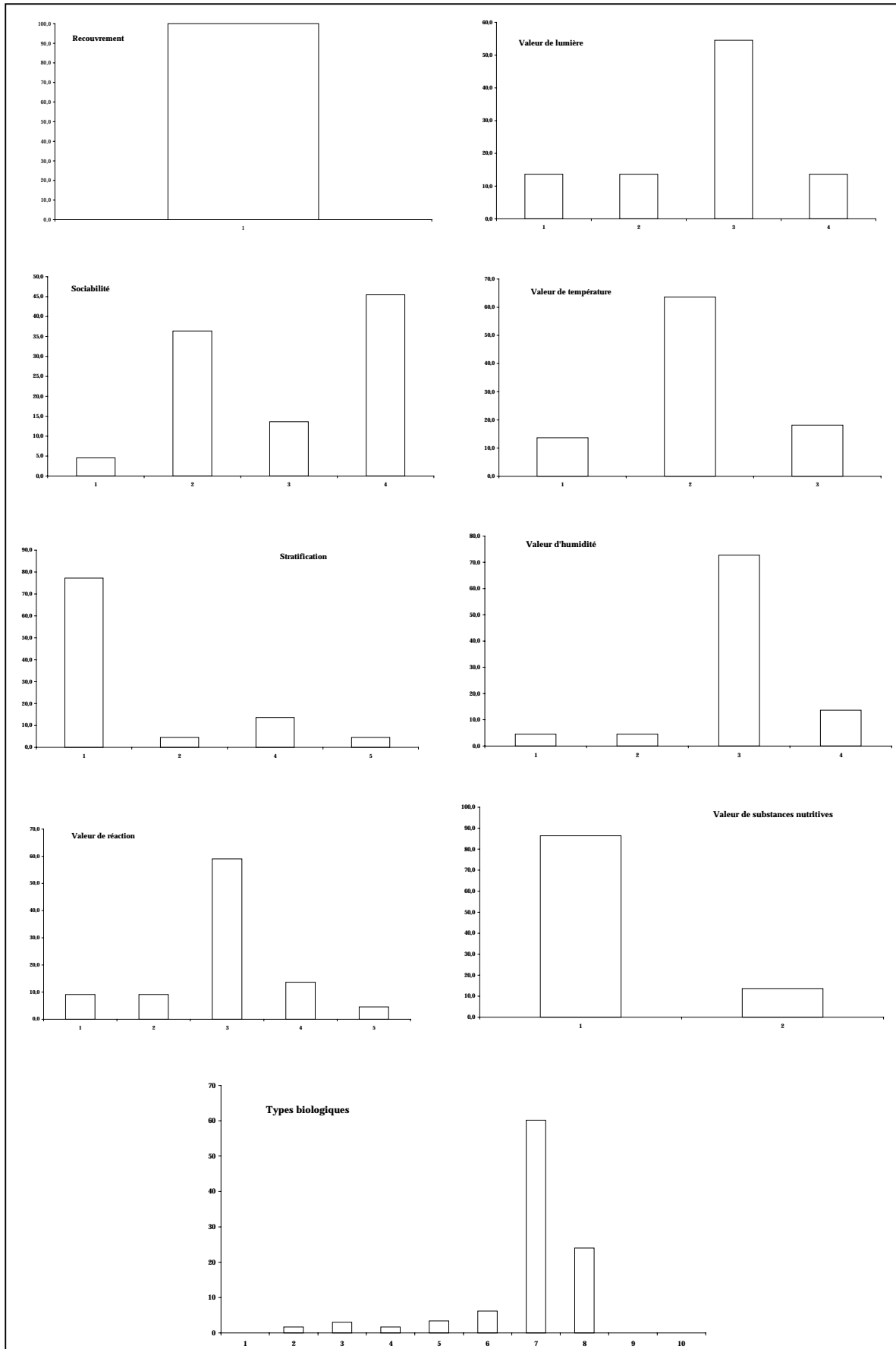
Distributions de fréquences des modalités des 9 variables abiotiques descriptives de la mosaïque biorhexistasique du Grand Som (adret, exposition sud)



Distributions de fréquences des modalités des 9 variables biotiques descriptives de la mosaïque biorhexistasique du Grand Som (adret, exposition sud)



Distributions de fréquences des modalités des 9 variables abiotiques descriptives de la mosaïque biorhexistatique de la Grande Sure (ubac, exposition ouest)



Distributions de fréquences des modalités des 9 variables biotiques descriptives de la mosaïque biorhexistatique de la Grande Sure (ubac, exposition ouest)

ANNEXE L

Distributions des fréquences des espèces, par éco-complexe

Distribution des fréquences : espèces totales

Espèce	Cumul des présences	Espèce	Cumul des présences
<i>Valeriana montana</i>	270	<i>Rosa montana</i>	9
<i>Galium anisophyllum</i>	189	<i>Vicia cracca</i>	9
<i>Sideritis hyssopifolia</i>	119	<i>Ribes alpinum</i>	9
<i>Centranthus angustifolius</i>	111	<i>Hypericum nummularium</i>	8
<i>Rumex scutatus</i>	111	<i>Rhinanthus alectorophus</i>	8
<i>Laserpitium siler</i>	101	<i>Phegopteris connectilis</i>	8
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	99	<i>Serratula alpina</i>	8
<i>Scabiosa columbaria</i>	97	<i>Dianthus monspessulanus</i>	7
<i>Silene vulgaris</i>	91	<i>Campanula cochlearifolia</i>	7
<i>Calamagrostis varia</i>	89	<i>Euphorbia amygdaloides</i>	7
<i>Leucanthemum adustum</i>	78	<i>Carlina acaulis</i>	7
<i>Lotus corniculatus</i>	77	<i>Allium narcissiflorum</i>	6
<i>Rhamnus alpina</i>	75	<i>Anthyllis montana</i>	6
<i>Laserpitium latifolium</i>	75	<i>Dactylis glomerata</i>	6
<i>Thymus praecox</i>	73	<i>Geranium sylvaticum</i>	6
<i>Globularia nudicaulis</i>	69	<i>Astrantia major</i>	6
<i>Carex sempervirens</i>	68	<i>Stachys alopecuroides</i>	6
<i>Sesleria varia</i>	65	<i>Knautia arvensis</i>	6
<i>Euphorbia cyparissias</i>	61	<i>Teucrium montanum</i>	6
<i>Helleborus foetidus</i>	54	<i>Pimpinella minor</i>	5
<i>Senecio doronicum</i>	53	<i>Sorbus aucuparia</i>	5
<i>Helianthemum nummularium</i>	53	<i>Polygonatum odoratum</i>	4
<i>Galeopsis angustifolia</i>	49	<i>Pritzelago alpina</i>	4
<i>Cirsium arvense</i>	48	<i>Gymnocarpium dryopteris</i>	4
<i>Juniperus communis</i>	46	<i>Epilobium montanum</i>	3
<i>Amelanchier ovalis</i>	39	<i>Rhododendron ferrugineum</i>	3
<i>Petasites paradoxus</i>	39	<i>Hieracium pilosella</i>	3
<i>Globularia cordifolia</i>	39	<i>Centaurea montana</i>	3
<i>Peucedanum ostruthium</i>	38	<i>Carex flacca</i>	3
<i>Viburnum lantana</i>	37	<i>Abies alba</i>	3
<i>Gentiana lutea</i>	37	<i>Anthyllis vulneraria</i>	3
<i>Sorbus aria</i>	36	<i>Salix appendiculata</i>	3
<i>Picea abies</i>	35	<i>Cotoneaster integerrimus</i>	3
<i>Campanula rotundifolia</i>	33	<i>Salix retusa</i>	2
<i>Ranunculus repens</i>	33	<i>Lamium purpureum</i>	2
<i>Seseli libanotis</i>	32	<i>Trifolium badium</i>	2
<i>Scrophularia juratensis</i>	32	<i>Asplenium viride</i>	2
<i>Poa cenisia</i>	31	<i>Saxifraga paniculata</i>	2
<i>Geranium robertianum</i>	30	<i>Polygala chamaebuxus</i>	2
<i>Fagus sylvatica</i>	29	<i>Cephalanthera longifolia</i>	2
<i>Salix caprea</i>	27	<i>Bartsia alpina</i>	2
<i>Gentiana angustifolia</i>	27	<i>Lathyrus heterophyllus</i>	2
<i>Gymnocarpium dryopteris</i>	26	<i>Coronilla vaginalis</i>	1
<i>Hypericum maculatum</i>	26	<i>Aconitum vulparia</i>	1
<i>Epipactis atrorubens</i>	24	<i>Primula acaulis</i>	1
<i>Rubus idaeus</i>	23	<i>Hieracium vulgare</i>	1
<i>Corylus avellana</i>	22	<i>Briza media</i>	1
<i>Euphrasia salisburgensis</i>	21	<i>Lamium strumarium</i>	1
<i>Festuca ovina</i>	20	<i>Phyteuma betonocifolium</i>	1
<i>Rosa pendulina</i>	20	<i>Lonicera nigra</i>	1
<i>Thalictrum minus</i>	20	<i>Daphne mezereum</i>	1
<i>Pimpinella saxifraga</i>	20	<i>Hieracium umbellatum</i>	1
<i>Alchemilla conjuncta</i>	20		
<i>Acer pseudoplatanus</i>	18		
<i>Teucrium chamaedrys</i>	18		
<i>Sedum album</i>	16		
<i>Taraxacum officinale</i>	16		
<i>Crepis pyrenaica</i>	15		
<i>Hieracium murorum</i>	15		
<i>Phyteuma hemisphaericum</i>	15		
<i>Pinus uncinata</i>	15		
<i>Lonicera alpigena</i>	15		
<i>Vaccinium myrtillus</i>	14		
<i>Pimpinella major</i>	14		
<i>Thesium alpinum</i>	14		
<i>Asperula cynanchica</i>	14		
<i>Pulsatilla alpina</i>	13		
<i>Linaria alpina</i>	13		
<i>Erinus alpinus</i>	12		
<i>Bromus erectus</i>	12		
<i>Lotus alpinus</i>	11		
<i>Prenanthes purpurea</i>	11		
<i>Convallaria majalis</i>	10		
<i>Lonicera xylosteum</i>	10		

Distributions des fréquences : écosystème de La Plagne

Espèce	Cumul des présences	Espèce	Cumul des présences
<i>Valeriana montana</i>	123	<i>Thesium alpinum</i>	3
<i>Calamagrostis varia</i>	69	<i>Lotus alpinus</i>	3
<i>Galium anisophyllum</i>	61	<i>Hieracium murorum</i>	3
<i>Centranthus angustifolius</i>	61	<i>Asperula cynanchica</i>	3
<i>Rhamnus alpina</i>	47	<i>Anthyllis vulneraria</i>	3
<i>Leucanthemum adustum</i>	42	<i>Alchemilla conjuncta</i>	3
<i>Thymus praecox</i>	36	<i>Abies alba</i>	3
<i>Scabiosa columbaria</i>	36	<i>Primula acaulis</i>	2
<i>Helleborus foetidus</i>	36	<i>Hypericum maculatum</i>	2
<i>Silene vulgaris</i>	35	<i>Cotoneaster integerrimus</i>	2
<i>Viburnum lantana</i>	29	<i>Trifolium badium</i>	1
<i>Rumex scutatus</i>	28	<i>Teucrium chamaedrys</i>	1
<i>Juniperus communis</i>	28	<i>Lonicera nigra</i>	1
<i>Gymnocarpium dryopteris</i>	26	<i>Coronilla vaginalis</i>	1
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	26	<i>Asplenium viride</i>	1
<i>Sideritis hyssopifolia</i>	25		
<i>Lotus corniculatus</i>	23		
<i>Ranunculus repens</i>	22		
<i>Peucedanum ostruthium</i>	22		
<i>Senecio doronicum</i>	19		
<i>Campanula rotundifolia</i>	19		
<i>Sorbus aria</i>	17		
<i>Seseli libanotis</i>	17		
<i>Poa cenisia</i>	17		
<i>Petasites paradoxus</i>	17		
<i>Festuca ovina</i>	17		
<i>Euphrasia salisburgensis</i>	17		
<i>Euphorbia cyparissias</i>	17		
<i>Picea abies</i>	16		
<i>Gentiana lutea</i>	16		
<i>Globularia nudicaulis</i>	15		
<i>Vaccinium myrtillus</i>	14		
<i>Laserpitium latifolium</i>	14		
<i>Fagus sylvatica</i>	14		
<i>Corylus avellana</i>	14		
<i>Scrophularia juratensis</i>	13		
<i>Rubus idaeus</i>	13		
<i>Laserpitium siler</i>	13		
<i>Helianthemum nummularium</i>	13		
<i>Galeopsis angustifolia</i>	13		
<i>Cirsium arvense</i>	13		
<i>Amelanchier ovalis</i>	13		
<i>Acer pseudoplatanus</i>	13		
<i>Lonicera alpigena</i>	12		
<i>Sesleria varia</i>	11		
<i>Taraxacum officinale</i>	10		
<i>Pimpinella major</i>	10		
<i>Phyteuma hemisphaericum</i>	10		
<i>Convallaria majalis</i>	10		
<i>Gentiana verna</i>	10		
<i>Gymnocarpium dryopteris</i>	10		
<i>Globularia cordifolia</i>	9		
<i>Erinus alpinus</i>	9		
<i>Sedum album</i>	8		
<i>Carlina acaulis</i>	7		
<i>Rosa pendulina</i>	7		
<i>Prenanthes purpurea</i>	7		
<i>Pinus uncinata</i>	7		
<i>Linaria alpina</i>	7		
<i>Epipactis atrorubens</i>	7		
<i>Dianthus monspessulanus</i>	7		
<i>Crepis pyrenaica</i>	7		
<i>Pulsatilla alpina</i>	7		
<i>Rosa montana</i>	6		
<i>Geranium robertianum</i>	6		
<i>Hypericum nummularium</i>	5		
<i>Salix caprea</i>	5		
<i>Euphorbia amygdaloides</i>	5		
<i>Carex sempervirens</i>	5		
<i>Pritselago alpina</i>	4		
<i>Polygonatum odoratum</i>	4		
<i>Sorbus aucuparia</i>	4		
<i>Campanula cochlearifolia</i>	4		
<i>Dactylis glomerata</i>	4		
<i>Gentiana angustifolia</i>	3		

ANNEXE M : Coefficients de Spearman

	pentclas	granclas	etatspédo	stabilit	socia	stratifi	centangu	myrtil	ameova	rosamon	cala	hellebo	viburn	galianys	hyperfo	valemont	seneco
stabilit	-0,235	0,070	0,778														
socia	-0,186	0,087	0,833	0,806													
stratifi	-0,220	-0,198	0,367	0,401	0,408												
centangu	0,211	0,052	-0,263	-0,327	-0,308	-0,310											
ameova	-0,135	0,002	0,191	0,133	0,164	0,318	-0,163										
salix	-0,030	0,064	0,228	0,178	0,234	0,224	-0,140	-0,050									
cala	0,122	0,040	0,213	0,062	0,094	-0,022	0,207	-0,098	-0,042								
hellebo	0,108	-0,004	0,026	-0,003	-0,058	-0,177	0,355	-0,073	-0,126	0,039	0,350						
rhamnu	-0,047	-0,021	0,134	0,123	0,130	0,338	-0,221	0,172	0,298	0,045	-0,050						
viburn	-0,045	-0,098	0,168	0,186	0,200	0,295	-0,189	0,271	0,304	0,240	-0,060	-0,098					
acer	-0,070	-0,045	0,146	0,176	0,149	0,246	-0,082	0,025	-0,025	0,046	0,009	-0,013	0,225				
rubus	-0,016	-0,190	0,056	0,108	0,141	0,218	-0,079	0,301	0,025	0,185	-0,080	-0,004	0,217				
rtoscut	0,062	-0,012	-0,298	-0,280	-0,230	-0,250	0,205	-0,114	-0,121	-0,016	-0,045	0,086	-0,153				
scabcolu	-0,002	0,094	0,378	0,327	0,347	-0,014	-0,116	-0,104	-0,141	-0,005	0,152	0,106	0,005	0,231	0,161	-0,040	0,201
silevulg	0,163	0,144	0,012	-0,047	-0,049	-0,201	0,229	-0,100	-0,153	-0,040	0,143	0,284	-0,087	0,167	0,131	0,252	0,341
laselati	0,004	0,089	0,305	0,246	0,286	0,032	-0,247	-0,021	0,072	0,013	0,037	-0,054	0,057	0,131	0,245	-0,120	0,141
lasesile	-0,041	0,193	0,271	0,235	0,258	0,031	-0,192	-0,106	-0,015	-0,008	0,012	-0,056	-0,065	0,199	0,134	-0,139	0,131
globcord	-0,058	0,062	0,229	0,165	0,205	0,094	-0,138	0,030	0,212	-0,048	-0,090	-0,100	0,018	0,047	0,083	-0,113	-0,051
globvulg	-0,096	0,244	0,399	0,314	0,355	0,116	-0,207	-0,084	0,079	-0,067	0,004	-0,075	0,069	0,116	0,015	-0,157	0,079
caresemp	-0,026	0,204	0,321	0,323	0,328	-0,103	-0,208	-0,083	-0,097	0,019	-0,122	-0,100	-0,119	0,136	0,382	-0,097	0,279
galeops	-0,081	0,206	-0,028	-0,040	-0,059	-0,072	0,073	-0,069	0,037	-0,004	0,009	0,092	-0,116	0,135	-0,004	0,012	-0,053
pigroch	-0,130	0,096	-0,026	-0,026	-0,064	-0,164	-0,136	-0,042	-0,073	-0,034	-0,118	-0,088	-0,071	0,107	0,401	0,065	0,115
helinum	-0,098	0,097	0,331	0,291	0,331	0,109	-0,137	-0,072	-0,052	-0,008	0,052	-0,002	0,031	0,112	0,048	-0,188	0,043
fagusylv	-0,118	-0,102	0,162	0,141	0,225	0,376	-0,104	0,053	0,109	0,160	-0,017	-0,107	0,249	-0,142	-0,031	0,020	0,010
thymprae	0,087	0,143	0,193	0,089	0,101	-0,124	0,047	-0,087	-0,086	0,053	0,239	0,230	-0,104	0,148	0,135	0,159	0,157
F	-0,061	0,007	0,122	0,133	0,112	-0,017	0,079	0,076	-0,004	-0,050	0,091	0,110	-0,022	0,196	-0,012	0,266	0,148
R	0,168	0,000	-0,280	-0,222	-0,226	-0,380	0,200	-0,202	-0,121	-0,104	0,062	0,081	-0,129	0,060	0,130	0,327	0,064
N	-0,012	-0,174	0,138	0,148	0,201	0,161	-0,027	0,041	-0,070	0,121	0,000	0,050	0,140	-0,009	-0,056	0,150	0,051
L	0,025	0,247	0,019	0,011	0,052	-0,232	-0,039	-0,223	0,034	-0,071	-0,041	0,091	-0,182	0,279	0,147	0,044	0,139
T	0,040	-0,051	0,219	0,203	0,195	0,067	0,222	0,055	0,081	0,019	0,053	0,026	0,061	-0,063	-0,048	-0,091	-0,052

	scabcolu	silevulg	laselati	lasesile	globvulg	caresemp	asperul	ranurep	F	R
stabilit										
socia										
stratifi										
centangu										
ameova										
salix										
cala										
hellebo										
rhamnu										
viburn										
acer										
rubus										
rtoscut										
scabcolu	1,000									
silevulg	0,063	1,000								
laselati	0,211	-0,011	1,000							
lasesile	0,255	0,110	0,248	1,000						
globcord	0,153	-0,077	-0,002	0,074						
globvulg	0,289	-0,061	0,223	0,371	1,000					
caresemp	0,374	0,047	0,287	0,258	0,342	1,000				
galeops	0,026	0,032	0,097	0,230	0,131	0,034				
pigroch	-0,073	0,180	0,120	0,080	-0,044	0,177	0,330			
helinum	0,386	-0,039	0,173	0,270	0,375	0,274	0,051	0,104		
fagusylv	-0,087	-0,055	0,046	-0,024	0,002	-0,077	-0,052	-0,047		
thymprae	0,322	0,290	0,020	0,104	0,198	0,225	0,307	0,318		
F	-0,016	0,152	0,040	0,139	-0,024	0,092	-0,073	0,080	1,000	
R	-0,090	0,155	-0,063	-0,080	-0,187	-0,089	-0,025	0,038	0,186	1,000
N	-0,032	0,059	0,012	-0,122	-0,097	-0,096	-0,041	0,075	0,299	0,027
L	0,170	0,245	0,133	0,140	0,103	0,232	0,098	0,070	0,073	0,266
T	0,067	-0,078	0,132	-0,035	0,051	-0,012	0,027	0,043	-0,079	-0,008

ANNEXE N : Principaux résultats de l'AFC

Contribution des variables aux axes factoriels 1-2

Variable	Axes	
	1	2
Stabilité	5,128	0,640
Pente	0,731	0,475
Granoclassement	1,096	0,832
Etat pédologique	5,695	0,388
Sociabilité-répartition	6,326	0,661
Centranthus angustifolius	0,931	0,311
Vaccinum myrtillus	0,010	1,277
Convallaria majalis	0,020	0,339
Pinus uncinata	0,132	0,270
Amalanchier ovalis	0,046	0,731
Polygonatum odoratum	0,001	0,330
Rosa montana	0,004	0,243
Salix caprea	0,117	0,388
Sedum album	0,055	0,127
Calamagrostis varia	0,237	0,228
Gymnocarpium dryopteris	0,113	0,751
Festuca ovina	0,097	0,101
Helleborus foetidus	0,027	0,502
Dianthus monspessulanus	0,132	0,049
Rosa pendulina	0,032	0,535
Rhamnus alpina	0,052	0,802
Taraxacum officinale	0,169	0,202
Pimpinella major	0,104	0,157
Viburnum lantana	0,080	1,045
Acer pseudoplatanus	0,070	0,267
Rubus idaeus	0,001	0,687
Geranium robertianum	0,343	0,050
Hypericum nummularium	0,035	0,014
Thesium alpinum	0,115	0,035
Rhododendron ferrugineum	0,030	0,005
Erinus alpinus	0,006	0,069
Allium narcissiflorum	0,074	0,022
Campanula cochlearifolia	0,034	0,038
Anthyllis montana	0,119	0,093
Dactylis glomerata	0,146	0,097
Sideritis hyssopifolia	0,056	0,087
Lotus alpinus	0,094	0,001
Pritzelago alpina	0,022	0,048
Rumex scutatus	0,701	0,238
Galium anisophyllum	0,080	0,234
Campanula rotundifolia	0,202	0,293
Geranium sylvaticum	0,061	0,044
Petasites paradoxus	0,001	0,008
Poa alpina	0,088	0,245
Peucedanum ostruthium	0,066	0,181
Hypericum maculatum	0,241	0,277

Variable	Axes	
	1	2
Valeriana montana	0,171	0,431
Senecio doronicum	0,262	0,202
Crepis pyrenaica	0,210	0,229
Pulsatilla alpina	0,249	0,210
Teuchrium chamaedrys	0,060	0,003
Scabiosa columbaria	0,701	0,278
Silene vulgaris	0,001	0,607
Laserpitium latifolium	0,434	0,014
Rhinantus alectorolophus	0,007	0,021
Vicia cracca	0,008	0,028
Hieracium murorum	0,212	0,041
Laserpitium siler	0,444	0,092
Seseli libanotis	0,131	0,219
Scrophularia juratensis	0,503	0,162
Globularia cordifolia	0,190	0,046
Globularia nudicaulis	0,728	0,011
Carex sempervirens	0,865	0,248
Astrantia major	0,062	0,018
Bromus erectus	0,021	0,004
Galeopsis angustifolia	0,002	0,095
Ribes alpinum	0,015	0,006
Asperula cynanchica	0,261	0,160
Thalictrum minus	0,051	0,190
Ranunculus repens	0,227	0,363
Phyteuma hemisphaericum	0,242	0,051
Euphorbia amygdaloides	0,037	0,113
Helianthemum nummularium	0,544	0,021
Euphorbia cyparissias	0,228	0,285
Fagus sylvatica	0,047	1,068
Thymus praecox	0,252	0,620
Gentiana lutea	0,222	0,116
Knautia arvensis	0,000	0,013
Prenanthes purpurea	0,021	0,729
Arctostaphylos uva-ursi	0,413	0,402
Lotus corniculatus	0,898	0,367
Epipactis atrorubens	0,042	0,006
Sorbus aria	0,069	0,793
Sesleria varia	0,672	0,201
Teucrium montanum	0,059	0,002
Pimpinella saxifraga	0,058	0,025
Pimpinella minor	0,000	0,021
Carlina acaulis	0,090	0,006
Cirsium arvense	0,681	0,432
Linaria alpina	0,227	0,107
Carex flacca	0,044	0,027
Gentiana verna	0,256	0,018
Euphrasia salisburgensis	0,064	0,183
Alchemilla conjuncta	0,234	0,167
Pinus uncinata	0,121	0,081

Variable	Axes	
	1	2
Sorbus aucuparia	0,014	0,044
Lonicera xylosteum	0,009	0,208
Leucanthemum adustum	0,312	0,204
Juniperus communis	0,019	1,375
Picea abies	0,146	1,115
Gymnocarpium dryopteris	0,064	0,004
Lonicera alpigena	0,023	0,862
Corylus avellana	0,027	1,139
Phegopteris connectilis	0,032	0,001
Serratula alpina	0,152	0,026
Humidité	0,653	0,072
Réaction	1,142	1,558
Substances nutritives	0,192	0,770
Lumière	0,978	1,764
Température	1,028	0,473

Coordonnées des modalités sur les axes factoriels 1-2

Variable	Modalités	Axe 1	Axe 2	Variable	Modalités	Axe 1	Axe 2
Stabilité	instable	4,475	0,471	Amalanchier ovalis	< 10	-0,648	-2,645
	penestable	0,554	0,409		10-25	-0,465	-2,942
	stable	-1,411	-1,169		25-50	-0,882	-2,401
Pente	< 20	-0,338	-1,098		50-75	-0,919	-1,886
	20-25	0,015	-1,384		> 75	0,658	-6,424
	25-30	0,036	-0,410	Polygonatum odoratum	< 10	-0,374	-5,827
	30-35	1,165	0,110		10-25	0,000	0,000
> 35	1,055	0,593	25-50		0,000	0,000	
Granoclassement	Gblocs	1,427	-0,110		50-75	0,000	0,000
	Bmoyen	1,372	-2,737		> 75	0,000	0,000
	PetitB	1,340	-0,959	Rosa montana	< 10	-0,140	-2,535
	GrosC	1,113	0,272		10-25	0,177	-7,095
	PC	-0,498	0,508		25-50	-1,219	2,125
Etat pédologique	Litho	4,476	0,530		50-75	0,000	0,000
	LSD	1,380	0,081		> 75	0,000	0,000
	LHD	-0,315	-0,111	Salix caprea	< 10	-1,166	-1,531
	LSC	-0,719	0,393		10-25	-1,576	-2,743
	LHC	-2,082	-1,131		25-50	-0,684	-4,693
Sociabilité-répartition	PDP	11,323	-0,930		50-75	-1,855	-1,091
	PD	3,263	0,730		> 75	-1,552	-1,560
	PT	0,509	0,161	Sedum album	< 10	1,217	1,852
	VC	-1,813	-1,220		10-25	0,538	0,873
Centranthus angustifolius	< 10	2,061	0,516		25-50	0,000	0,000
	10-25	1,665	1,538		50-75	0,000	0,000
	25-50	1,377	1,705		> 75	0,000	0,000
	50-75	0,988	1,295	Calamagrostis varia	< 10	0,648	0,175
	> 75	0,830	2,458		10-25	-0,434	1,750
Vaccinum myrtillus	< 10	-0,403	-5,313		25-50	-1,636	1,042
	10-25	-0,246	-7,315		50-75	-2,621	1,130
	25-50	-0,056	-6,039		> 75	-2,984	1,937
	50-75	-1,597	-6,347	Gymnocarpium dryopteris	< 10	1,221	-3,675
	> 75	0,000	0,000		10-25	-0,382	-3,473
Convallaria majalis	< 10	1,142	-0,412		25-50	2,508	-0,773
	10-25	-0,058	-7,170		50-75	1,863	-1,000
	25-50	0,592	-2,130		> 75	0,000	0,000
	50-75	-1,342	-8,307	Festuca ovina	< 10	-1,347	1,194
	> 75	0,000	0,000		10-25	-1,898	2,833
Pinus uncinata	< 10	-3,696	0,207		25-50	0,000	0,000
	10-25	-2,987	1,074		50-75	0,000	0,000
	25-50	0,000	0,000		> 75	0,000	0,000
	50-75	-1,334	-6,525				
	> 75	-2,005	-4,093				

Variable	Modalités	Axe 1	Axe 2	Variable	Modalités	Axe 1	Axe 2
Helleborus foetidus	< 10	0,372	1,918	Rubus idaeus	< 10	0,064	-3,205
	10-25	0,877	2,219		10-25	-0,261	-4,412
	25-50	0,148	1,935		25-50	0,000	0,000
	50-75	0,000	0,000		50-75	0,000	0,000
	> 75	0,000	0,000		> 75	0,000	0,000
Dianthus monspessulanus	< 10	-2,787	1,699	Geranium robertianum	< 10	2,204	0,229
	10-25	0,000	0,000		10-25	0,353	-4,373
	25-50	0,000	0,000		25-50	0,000	0,000
	50-75	0,000	0,000		50-75	0,000	0,000
	> 75	0,000	0,000		> 75	0,000	0,000
Rosa pendulina	< 10	-0,475	-2,839	Hypericum nummularium	< 10	-1,089	-0,214
	10-25	-1,388	-4,448		10-25	-1,093	-0,200
	25-50	0,000	0,000		25-50	-2,478	2,321
	50-75	0,000	0,000		50-75	0,000	0,000
	> 75	0,000	0,000		> 75	0,000	0,000
Rhamnus alpina	< 10	0,520	-1,775	Thesium alpinum	< 10	-1,840	1,009
	10-25	-0,507	-1,836		10-25	0,000	0,000
	25-50	0,095	-0,815		25-50	0,000	0,000
	50-75	-0,207	-4,519		50-75	0,000	0,000
	> 75	-0,850	-2,718		> 75	0,000	0,000
Taraxacum officinale	< 10	-2,084	2,280	Rhododendron ferrugineum	< 10	-2,383	0,530
	10-25	0,000	0,000		10-25	0,928	1,276
	25-50	0,000	0,000		25-50	0,000	0,000
	50-75	0,000	0,000		50-75	0,000	0,000
	> 75	0,000	0,000		> 75	0,000	0,000
Pimpinella major	< 10	-1,744	2,147	Erinus alpinus	< 10	0,444	0,871
	10-25	0,000	0,000		10-25	-0,500	2,690
	25-50	0,000	0,000		25-50	0,000	0,000
	50-75	0,000	0,000		50-75	0,000	0,000
	> 75	0,000	0,000		> 75	0,000	0,000
Viburnum lantana	< 10	-0,773	-3,542	Allium narcissiflorum	< 10	1,731	0,758
	10-25	-1,325	-2,238		10-25	3,026	0,739
	25-50	0,000	0,000		25-50	3,009	-1,270
	50-75	0,000	0,000		50-75	-2,478	2,321
	> 75	-2,795	-0,728		> 75	-0,412	-0,477
Acer pseudoplatanus	< 10	-1,374	-2,682	Campanula cochlearifolia	< 10	1,418	1,501
	10-25	-0,304	-4,157		10-25	0,000	0,000
	25-50	1,498	1,074		25-50	0,000	0,000
	50-75	0,000	0,000		50-75	0,000	0,000
	> 75	-1,438	-0,656		> 75	0,000	0,000

Variable	Modalités	Axe 1	Axe 2	Variable	Modalités	Axe 1	Axe 2
Anthyllis montana	< 10	-2,856	2,529	Geranium sylvaticum	< 10	-2,050	1,785
	10-25	0,000	0,000		10-25	1,986	1,496
	25-50	0,000	0,000		25-50	0,000	0,000
	50-75	0,000	0,000		50-75	0,000	0,000
	> 75	0,000	0,000		> 75	0,000	0,000
Dactylis glomerata	< 10	-3,205	2,596	Petasites paradoxus	< 10	0,056	0,093
	10-25	0,000	0,000		10-25	-0,566	-1,716
	25-50	0,000	0,000		25-50	0,000	0,000
	50-75	-2,947	2,497		50-75	0,000	0,000
	> 75	0,000	0,000		> 75	0,000	0,000
Sideritis hyssopifolia	< 10	-0,354	0,048	Poa alpina	< 10	1,123	1,761
	10-25	0,671	1,251		10-25	0,232	1,987
	25-50	-1,364	2,589		25-50	0,830	2,458
	50-75	0,000	0,000		50-75	0,000	0,000
	> 75	0,000	0,000		> 75	0,000	0,000
Lotus alpinus	< 10	-1,875	-0,185	Peucedanum ostruthium	< 10	0,687	1,357
	10-25	0,000	0,000		10-25	-2,242	2,016
	25-50	0,000	0,000		25-50	0,000	0,000
	50-75	0,000	0,000		50-75	0,000	0,000
	> 75	0,000	0,000		> 75	0,000	0,000
Pritzelago alpina	< 10	1,500	2,216	Hypericum maculatum	< 10	-1,802	2,158
	10-25	0,000	0,000		10-25	-3,665	1,249
	25-50	0,000	0,000		25-50	-2,795	-0,728
	50-75	0,000	0,000		50-75	0,000	0,000
	> 75	0,000	0,000		> 75	0,000	0,000
Rumex scutatus	< 10	1,557	0,886	Valeriana montana	< 10	0,027	-0,510
	10-25	2,258	1,791		10-25	0,932	0,284
	25-50	0,000	0,000		25-50	0,479	1,601
	50-75	0,000	0,000		50-75	0,858	0,799
	> 75	-3,283	1,379		> 75	-0,438	-4,283
Galium anisophyllum	< 10	-0,249	0,631	Senecio doronicum	< 10	-1,341	1,149
	10-25	1,249	1,380		10-25	-2,843	2,808
	25-50	0,000	0,000		25-50	0,000	0,000
	50-75	0,000	0,000		50-75	0,000	0,000
	> 75	0,000	0,000		> 75	0,000	0,000
Campanula rotundifolia	< 10	-1,587	1,911	Crepis pyrenaica	< 10	-2,400	2,504
	10-25	0,000	0,000		10-25	0,000	0,000
	25-50	0,000	0,000		25-50	0,000	0,000
	50-75	0,000	0,000		50-75	0,000	0,000
	> 75	0,000	0,000		> 75	0,000	0,000

Scores des individus

Individu	Axe 1	Axe 2	Individu	Axe 1	Axe 2
LpAEpr1t	-3,263	1,933	LpIEf3E	1,957	0,252
LpAEpr2t	-2,023	2,628	LpIEf4e	1,448	-2,152
LpAEpr3e	-1,964	2,695	LpIEf5e	1,473	-2,224
LpAEpr4e	1,204	2,042	LpIEf6e	0,853	-4,678
LpAEpr5E	2,092	1,646	LpIEf7t	-0,328	-6,673
LpAEpr6E	1,236	2,480	LpIEf8t	-0,568	-5,581
LpAEpr7E	1,146	2,922	LpIEf9t	-0,637	-7,998
LpAEpr8e	1,891	2,201	LpJEf1E	0,605	1,707
LpAEpr9e	0,216	1,315	LpJEf2E	1,805	0,366
LpEpr10t	-2,519	1,337	LpJEf3E	1,693	0,772
LpBEI1E	3,663	0,902	LpJEf4E	1,899	1,447
LpBEI2E	2,317	1,742	LpJEf5E	1,821	0,412
LpBEI3E	2,706	-0,879	LpJEf6e	1,947	0,337
LpBEI4E	2,938	-0,367	LpJEf7e	0,931	0,195
LpBEI5e	1,670	-0,882	LpJEf8e	0,617	-0,959
LpBEI6t	-2,948	1,239	LpJEf9t	0,786	-2,230
LpCEI1E	12,515	-0,509	LpJEf10t	0,658	-6,424
LpCEI2E	0,850	0,774	LpKEI1t	-2,987	1,074
LpCEI3e	-0,118	1,570	LpKEI2t	0,800	0,287
LpCEI4t	-2,254	0,248	LpKEI3E	2,914	1,814
LpDEI1E	4,922	-0,481	LpKEI4E	1,744	2,083
LpDEI2E	3,139	0,530	LpKEI5e	1,751	1,167
LpDEI3e	0,555	1,681	LpKEI6e	1,637	2,392
LpDEI4e	-2,131	0,582	LpKEI7e	2,231	2,042
LpDEI5t	-2,626	0,925	LpKEI8e	2,693	1,491
LpDEI6t	-2,273	0,928	LpKEI9e	1,876	1,998
LpEEf1E	2,519	0,266	LpKEI10e	0,820	2,578
LpEEf2e	0,622	-1,980	LpKEI11e	-2,144	2,604
LpEEf3e	-0,554	-3,427	LpKEI12E	-1,617	3,133
LpEEf4e	-0,322	-5,139	LpKEI13E	0,949	1,343
LpEEf5t	-0,197	-4,836	LpKEI14E	3,416	0,410
LpFEf1E	1,631	-0,098	LpKEI15E	1,122	2,312
LpFEf2e	-1,516	0,858	LpKEI16E	0,795	3,001
LpFEf3e	-3,665	1,249	LpKEI17E	0,830	2,458
LpFEf4t	-2,795	-0,728	LpKEI18E	-0,464	2,698
LpGEf1E	4,127	-1,297	LpKEI19E	0,041	2,194
LpGEf2E	2,351	-1,216	LpKEI20E	-0,404	1,691
LpGEf3e	1,863	-1,000	LpLEI1E	2,416	1,261
LpGEf4e	0,040	-3,238	LpLEI2E	3,022	1,438
LpGEf5t	-0,481	-4,942	LpLEI3e	2,342	-0,335
LpHEf1E	12,454	-0,193	LpLEI4e	1,824	-2,451
LpHEf2E	3,630	-2,870	LpLEI5t	-0,331	-3,079
LpHEf3E	2,911	-0,997	MEpr1t	-2,552	3,216
LpHEf4e	2,105	-0,549	MEpr2t	-1,909	2,910
LpHEf5e	-0,706	-2,239	MEpr3e	-0,474	3,358
LpHEf6t	-0,686	-3,022	MEpr4e	-1,154	3,403
LpIEf1E	11,900	-2,655	MEpr5e	-0,124	3,121
LpIEf2E	3,786	1,296	MEpr6e	0,201	2,556

Individu	Axe 1	Axe 2	Individu	Axe 1	Axe 2
MEpr7e	0,352	1,676	LpQEf8t	-1,045	-4,735
MEpr8E	4,438	-0,787	LpQEf9t	-1,334	-6,525
MEpr9E	3,789	-0,715	LpQEf10t	-1,953	-4,604
MEpr10E	4,840	-0,857	LpQEf11t	-2,183	-4,154
MEpr11E	3,218	-0,717	LpREi1E	7,901	1,702
MEpr12E	4,840	-0,857	LpREi2e	1,379	1,940
NEI1t	-3,381	-0,640	LpREi3E	2,134	1,210
NEI2t	-4,011	1,055	LpREi4E	1,423	1,872
NEI3t	-2,705	-0,223	LpREi5E	2,690	0,611
NEI4t	-2,444	0,103	LpREi6e	0,080	2,555
NEI5t	-3,131	0,812	LpREi7t	-0,216	1,920
NEI6t	-2,943	-0,225	LpREi8t	-0,335	3,066
NEI7t	-2,332	-0,274	LpREi9e	-1,245	2,450
NEI8t	-1,306	-1,583	LpREi10E	-0,355	2,700
NEI9t	-1,701	-1,247	AsAEI1E	4,753	1,623
NEI10e	-0,750	-1,259	AsAEL2e	-1,246	1,768
NEI11e	0,706	1,266	AsAEI3e	-2,071	1,369
NEI12e	1,709	2,175	AsAEI4e	-1,703	-1,260
NEI13e	0,133	1,031	AsAEI5t	-1,908	-2,150
NEI14e	-0,305	1,484	AsBEI1E	1,632	1,053
NEI15E	0,019	1,971	AsBEI2e	0,357	1,228
NEI16E	-1,188	0,955	AsBEI3t	-1,765	0,292
NEI17E	-0,783	1,442	AsBEI4t	-0,621	0,664
LpOef1E	6,056	-2,563	AsCEi1E	4,768	0,166
LpOef2E	2,124	-2,763	AsCEi2e	1,722	-0,807
LpOef3e	1,653	-3,057	AsCEi3t	-1,572	-0,747
LpOef4e	1,653	-3,057	AsDEI1E	3,394	0,553
LpOef5e	0,758	-4,295	AsDEI2e	0,198	0,209
LpOef6t	1,010	-4,795	AsDEI3e	-0,915	-0,761
LpOef7t	0,275	-2,619	AsDEI4e	-2,375	-2,929
LpOef8t	-0,227	-6,014	AsDEI5t	-1,923	-3,732
LpOef9t	0,183	-6,351	AsDEI6t	-2,112	-2,418
LpOef10t	0,177	-7,095	AsEI1E	2,584	0,777
LpOef11t	-0,672	-7,669	AsEI2e	-0,516	0,442
LpOef12t	-0,671	-8,145	AsEI3t	-1,505	-0,526
LpOef13t	-1,597	-6,347	AsEI4t	-2,504	-2,002
LpPEf1E	1,229	-3,770	AsFEf1E	3,525	-0,108
LpPEf2e	1,125	-5,809	AsFEf2e	0,281	-0,159
LpPEf3e	0,241	-5,213	AsFEf3e	-1,080	-3,003
LpPEf4e	-0,058	-7,170	AsFEf4t	-1,155	-2,281
LpPEf5t	-1,086	-5,436	AsFEf5t	-1,867	-3,509
LpPEf6t	-0,045	-4,222	AsGEI1E	5,607	0,751
LpPEf7t	-1,342	-8,307	AsGEI2e	0,158	-1,154
LpQEf1E	3,279	-2,403	AsGEI3t	-1,931	-2,948
LpQEf2E	2,040	-1,989	AsGEI4t	-1,807	-1,843
LpQEf3E	0,928	-3,132	AsHEI1E	3,115	0,664
LpQEf4E	-0,367	-2,801	AsHEI2e	-0,777	0,517
LpQEf5e	-0,520	-2,139	AsHEI3e	-2,375	-0,758
LpQEf6e	-0,082	-1,554	AsHEI4t	-2,450	-2,168
LpQEf7e	0,618	-3,443	AsIEi1E	4,005	0,509

Individu	Axe 1	Axe 2	Individu	Axe 1	Axe 2
AsIEi2e	0,159	0,202	AsWEf1E	2,817	-0,194
AsIEi3t	-0,955	-1,642	AsWEf2e	-1,862	-1,568
AsJEI1E	4,609	1,420	AsWEf3t	-2,021	-1,772
AsJEI2E	3,060	1,612	AsWEf4t	-2,053	-1,549
AsJEI3e	1,283	0,066	AsWEf5t	-2,580	-0,976
AsJEI4t	-1,699	-2,610	PxAEl1E	4,322	0,797
AsKEI1E	2,718	-2,246	PxAEl2E	3,696	1,144
AsKEI2e	0,472	-1,354	PxAEl3e	2,347	1,574
AsKEI3t	-1,310	-4,542	PxAEl4e	1,498	1,074
AsLEi1E	2,333	-2,089	PxAEl5t	0,538	0,873
AsLEi2e	-0,090	-0,179	PxBEl1E	3,979	1,877
AsLEi3e	-1,360	-1,421	PxBEl2E	2,131	1,584
AsLEi4t	-1,739	-2,134	PxBEl3e	2,345	1,291
AsLEi5t	-2,263	-1,656	PxBEl4t	1,077	1,042
AsMEI1E	6,241	1,013	PxCEl1E	7,711	1,133
AsMEI2E	1,202	-0,764	PxCEl2E	3,362	1,707
AsMEI3e	-0,685	-2,172	PxCEl3e	1,985	2,235
AsMEI4e	-0,608	-1,700	PxCEl4t	0,117	1,545
AsMEI5t	-1,699	-2,070	PxDEl1E	2,446	1,272
AsNEi1E	4,218	0,058	PxDEl2E	1,948	1,622
AsNEi2e	-1,624	-2,500	PxDEl3e	2,671	1,055
AsNEi3t	-1,705	-1,577	PxDEl4t	-0,183	0,717
AsOef1E	3,146	-0,675	PxEEl1E	3,517	0,875
AsOef2e	-0,429	-2,802	PxEEl2e	0,977	1,645
AsOef3e	-0,544	-3,851	PxEEl3t	-1,775	0,554
AsOef4t	-0,968	-4,720	PxFEpe1E	3,228	-0,026
AsPEf1E	4,402	0,692	PxFEpe2e	0,260	-0,357
AsPEf2e	-0,398	-0,504	PxFEpe3e	0,752	-0,345
AsPEf3e	-0,693	-1,646	PxFEpe4	2,448	-1,070
AsPEf4t	-1,756	-4,157	PxFEpe5e	1,182	-0,321
AsQEI1E	7,491	0,539	PxFEpe6t	-1,206	-2,355
AsQEI2e	1,535	0,628	PxFEpe7t	-0,533	-3,507
AsQEI3t	-1,714	-0,674	PxGEI1E	3,540	0,980
AsREI1E	4,930	0,155	PxGEI2E	3,923	0,207
AsREI2e	-1,435	-0,032	PxGEI3e	0,226	0,232
ASREI3t	-3,471	0,131	PxGEI4e	-1,576	-0,851
AsSEI1E	3,579	0,984	PxGEI5t	-1,527	-0,086
AsSEI2e	-0,184	0,983	PxGEI6t	-2,517	-2,848
AsSEI3t	-3,089	-0,074	PxHEi1E	12,515	-0,509
AsSEI4t	-2,701	-2,793	PxHEi2E	2,858	-1,545
AsTEI1E	2,991	0,717	PxHEi3E	1,564	-5,878
AsTEI2e	-1,595	0,661	PxIEi1E	12,515	-0,509
AsTEI3t	-2,982	0,189	PxIEi2E	1,512	1,946
AsUEI1E	2,620	-0,669	PxIEi3e	0,106	-0,233
AsUEI2e	0,320	-0,431	PxIEi4e	1,228	-1,361
AsUEI3t	-0,739	-1,546	PxIEi5e	-0,043	-3,897
AsVEI1E	4,281	0,917	PxIEi6t	-1,804	-0,105
AsVEI2e	0,778	-0,985	PxIEi7t	-1,496	0,112
AsVEI3t	-2,047	-3,539	PxJEi1E	12,515	-0,509

AsVEI4t	-1,428	-4,539	PxJEi2E	3,232	-0,931
---------	--------	--------	---------	-------	--------

Individu	Axe 1	Axe 2	Individu	Axe 1	Axe 2
PxJEi3e	2,062	1,330	GBEPe4e	1,273	2,647
PxJEi4e	0,501	1,575	GBEPe5e	5,432	2,247
PxJEi5t	-0,026	-0,324	GBEPe6E	4,520	0,829
PxJEi6t	-0,836	-0,173	GBEPe7E	3,729	0,749
PxKEpe1E	7,884	0,767	GBEPe8E	4,818	-0,492
PxKEpe2E	3,700	1,939	CEPe1t	-3,898	2,909
PxKEpe3e	1,207	1,827	CEPe2t	-3,114	2,037
PxKEpe4e	-2,776	2,045	CEPeE3t	-2,812	2,157
PxKEpe5t	-2,776	1,416	CEPeE4e	-2,625	2,357
PxKEpe6t	-1,316	-0,671	CEPeE5e	-2,498	2,265
PxLEi1E	3,343	2,330	CEPeE6e	-2,765	3,037
PxLEi2e	0,962	2,538	CEPeE7e	-0,903	2,435
PxLEi3e	-1,520	1,923	CEPeE8E	0,829	1,489
PxLEi4e	-2,748	1,545	CEPeE9E	3,468	1,695
PxLEi5t	-3,087	1,446	CEPeE10E	4,802	1,763
PxLEi6t	-2,806	0,632	CEPeE11E	3,596	1,281
PxMEi1E	2,993	1,355	CEPeE12E	5,168	1,102
PxMEi2e	0,024	1,919	CEPeE13E	4,897	-0,349
PxMEi3t	-1,219	2,125	DEPe1t	-3,620	2,297
PxNEi1E	4,135	0,130	DEPe2t	-2,656	1,298
PxNEi2e	1,737	0,307	DEPe3e	-2,323	2,773
PxNEi3e	-1,073	0,725	DEPe4e	0,490	1,822
PxNEi4	-2,017	-0,530	DEPe5E	2,875	1,648
PxOEi1t	1,569	1,784	DEPe6e	2,907	2,302
PxOEi2e	-1,364	0,822	DEPe7e	1,473	1,644
PxOEi3E	-2,982	-0,491	DEPe8E	-0,614	2,516
PxPEi1E	3,194	-0,459	DEPe9E	-0,406	2,405
PxPEi2e	-0,670	0,565	EEPr1t	-3,136	-0,829
PxPEi3e	-1,827	0,349	EEPr2t	-1,977	-0,568
PxPEi4t	-1,266	0,749	EEPr3e	-0,948	-0,648
GAEPe1t	-3,442	1,856	EEPr4e	-0,355	0,618
GAEPe2t	-3,523	2,438	EEPr5E	1,884	0,910
GAEPe3t	-2,767	1,760	FEPr1t	-0,468	-2,417
GAEPe4e	-2,780	2,291	FEPr2e	-0,566	-1,716
GAEPe5e	-2,815	2,414	FEPr3e	1,012	-0,519
GAEPe6e	-2,575	2,876	FEPr4e	1,059	-0,894
GAEPe7e	-1,252	2,695	FEPr5E	5,315	-0,539
GAEPe8e	-0,789	3,161	GEPe1	-3,413	1,534
GAEPe9e	-0,471	2,226	GEPe2	-0,878	2,079
GAEPe10e	-0,249	2,366	GEPe3	2,637	2,764
GAEPe11e	2,209	1,761	HEf1t	-0,856	-6,142
GAEPe12E	2,673	2,057	HEf2e	0,353	-4,373
GAEPe13E	3,018	2,001	HEf3E	2,489	0,093
GAEPe14E	2,889	1,518	GsAEPe1t	-3,925	2,339
GAEPe15E	3,059	1,456	GsAEPe2e	-1,776	2,293
GAEPe16E	2,743	1,733	GsAEPe3E	3,372	2,078
GAEPe17E	2,949	1,183	GsBEPe1t	-3,283	1,379
GBEPe1t	-2,947	2,497	GsBEPe2e	1,986	1,496

GBEPe2t	-2,992	2,600	GsBEPe3E	5,712	-0,543
GBEPe3t	-2,179	2,328	GsCEi1t	-4,009	3,133

Individu	Axe 1	Axe 2
GsCEi2e	-2,921	2,579
GsCEi3E	3,026	0,739
GsDEi1t	-0,039	-8,753
GsDEi2e	-0,023	-9,169
GsDEi3E	3,009	-1,270
GsEEi1t	-2,286	-1,268
GsEEi2e	1,742	0,566
GsEEi3E	8,678	-3,091
GsFEpe1t	-3,625	1,504
GsFEpe2e	-2,789	1,629
GsFEpe3E	0,928	1,276
GsFEpe4E	3,974	0,020
GsGEi1t	-2,478	2,321
GsGEi2e	-0,412	-0,477
GsGEi3E	6,383	-1,064

Annexe O : Indices de diversité spécifique

1) Indice de Shannon-Weaver (diversité spécifique alpha) et régularité

LA PLAGNE	Nombre de relevés	S	Indice de Shannon-Weaver H	Régularité R
Ecocomplexe (collection entière)	150	90	5,83	0,89
Station éboulis ss	59	21	3,83	0,87
Station formations périphériques	46	58	5,39	0,92
Parcelles écotones	54	37	4,59	0,88

AULP DU SEUIL	Nombre de relevés	S	Indice de Shannon-Weaver H	Régularité R
Ecocomplexe (collection entière)	92	65	5,21	0,86
Station éboulis ss	25	16	3,31	0,82
Station formations périphériques	34	47	4,74	0,85
Parcelles écotones	33	33	4,43	0,87

PELLOUX	Nombre de relevés	S	Indice de Shannon-Weaver H	Régularité R
Ecocomplexe (collection entière)	76	70	5,44	0,89
Station éboulis ss	26	16	3,38	0,84
Station formations périphériques	23	49	5,01	0,89
Parcelles écotones	27	33	4,5	0,9

GRAND SOM	Nombre de relevés	S	Indice de Shannon-Weaver H	Régularité R
Ecocomplexe (collection entière)	62	78	5,57	0,88
Station éboulis ss	21	19	3,76	0,88
Station formations périphériques	14	55	5,09	0,89
Parcelles écotones	27	25	4,24	0,91

GRANDE SURE	Nombre de relevés	S	Indice de Shannon-Weaver H	Régularité R
Ecocomplexe (collection entière)	22	40	4,92	0,92
Station éboulis ss	8	12	3,12	0,87
Station formations périphériques	7	26	4,33	0,92
Parcelles écotones	7	17	3,71	0,9

Ensemble des sites	Nombre de relevés	S	Indice de Shannon-Weaver H	Régularité R
Ecocomplexe (collection entière)	411	126	6,02	0,86
Station éboulis ss	139	25	4	0,86
Station formations périphériques	124	86	5,66	0,88
Parcelles écotones	148	39	4,73	0,9

2) Détails des calculs

A) Ecomplexe de La Plagne

a) Calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver pour un échantillon comportant 1398 individus et 90 espèces

Ecomplexe (collection complète)	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$	p_i	$-\log p_i$	$-\log_2 p_i$	$-p_i \log_2 p_i$
<i>Valeriana montana</i>	123	2,090	257,058	0,089	1,052	3,496	0,310
<i>Calamagrostis varia</i>	69	1,839	126,881	0,050	1,304	4,330	0,215
<i>Galium anisophyllum</i>	61	1,785	108,905	0,044	1,357	4,508	0,198
<i>Centranthus angustifolius</i>	61	1,785	108,905	0,044	1,357	4,508	0,198
<i>Rhamnus alpina</i>	47	1,672	78,589	0,034	1,470	4,884	0,165
<i>Leucanthemum adustum</i>	42	1,623	68,176	0,030	1,519	5,046	0,153
<i>Thymus praecox</i>	36	1,556	56,027	0,026	1,586	5,269	0,137
<i>Scabiosa columbaria</i>	36	1,556	56,027	0,026	1,586	5,269	0,137
<i>Helleborus foetidus</i>	36	1,556	56,027	0,026	1,586	5,269	0,137
<i>Silene vulgaris</i>	35	1,544	54,042	0,025	1,598	5,310	0,134
<i>Viburnum lantana</i>	29	1,462	42,410	0,021	1,680	5,581	0,117
<i>Rumex scutatus</i>	28	1,447	40,520	0,020	1,695	5,631	0,114
<i>Juniperus communis</i>	28	1,447	40,520	0,020	1,695	5,631	0,114
<i>Gymnocarpium dryopteris</i>	26	1,415	36,789	0,019	1,727	5,738	0,107
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	26	1,415	36,789	0,019	1,727	5,738	0,107
<i>Sideritis hyssopifolia</i>	25	1,398	34,949	0,018	1,744	5,795	0,104
<i>Lotus corniculatus</i>	23	1,362	31,320	0,017	1,781	5,915	0,098
<i>Ranunculus repens</i>	22	1,342	29,533	0,016	1,800	5,979	0,095
<i>Peucedanum ostruthium</i>	22	1,342	29,533	0,016	1,800	5,979	0,095
<i>Senecio doricum</i>	19	1,279	24,296	0,014	1,864	6,191	0,085
<i>Campanula rotundifolia</i>	19	1,279	24,296	0,014	1,864	6,191	0,085
<i>Sorbus aria</i>	17	1,230	20,918	0,012	1,912	6,351	0,078
<i>Seseli libanotis</i>	17	1,230	20,918	0,012	1,912	6,351	0,078
<i>Poa cenisia</i>	17	1,230	20,918	0,012	1,912	6,351	0,078
<i>Petasites paradoxus</i>	17	1,230	20,918	0,012	1,912	6,351	0,078
<i>Festuca ovina</i>	17	1,230	20,918	0,012	1,912	6,351	0,078
<i>Euphrasia salisburgensis</i>	17	1,230	20,918	0,012	1,912	6,351	0,078
<i>Euphorbia cyparissias</i>	17	1,230	20,918	0,012	1,912	6,351	0,078

Ecocomplexe (collection complète)	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$	p_i	$\log p_i$	$\log_2 p_i$	$- p_i \log_2 p_i$
<i>Picea abies</i>	16	1,204	19,266	0,012	1,938	6,439	0,074
<i>Gentiana lutea</i>	16	1,204	19,266	0,012	1,938	6,439	0,074
<i>Globularia nudicaulis</i>	15	1,176	17,641	0,011	1,966	6,532	0,071
<i>Vaccinum myrtillus</i>	14	1,146	16,046	0,010	1,996	6,631	0,067
<i>Laserpitium latifolium</i>	14	1,146	16,046	0,010	1,996	6,631	0,067
<i>Fagus sylvatica</i>	14	1,146	16,046	0,010	1,996	6,631	0,067
<i>Corylus avellana</i>	14	1,146	16,046	0,010	1,996	6,631	0,067
<i>Scrophularia juratensis</i>	13	1,114	14,481	0,009	2,028	6,738	0,063
<i>Rubus idaeus</i>	13	1,114	14,481	0,009	2,028	6,738	0,063
<i>Laserpitium siler</i>	13	1,114	14,481	0,009	2,028	6,738	0,063
<i>Helianthemum nummularium</i>	13	1,114	14,481	0,009	2,028	6,738	0,063
<i>Galeopsis angustifolia</i>	13	1,114	14,481	0,009	2,028	6,738	0,063
<i>Cirsium arvense</i>	13	1,114	14,481	0,009	2,028	6,738	0,063
<i>Amelanchier ovalis</i>	13	1,114	14,481	0,009	2,028	6,738	0,063
<i>Acer pseudoplatanus</i>	13	1,114	14,481	0,009	2,028	6,738	0,063
<i>Lonicera alpigena</i>	12	1,079	12,950	0,009	2,063	6,854	0,059
<i>Sesleria varia</i>	11	1,041	11,455	0,008	2,101	6,979	0,055
<i>Taraxacum officinale</i>	10	1,000	10,000	0,007	2,142	7,117	0,051
<i>Pimpinella major</i>	10	1,000	10,000	0,007	2,142	7,117	0,051
<i>Phyteuma hemisphaericum</i>	10	1,000	10,000	0,007	2,142	7,117	0,051
<i>Convallaria majalis</i>	10	1,000	10,000	0,007	2,142	7,117	0,051
<i>Gentiana verna</i>	10	1,000	10,000	0,007	2,142	7,117	0,051
<i>Globularia cordifolia</i>	9	0,954	8,588	0,006	2,188	7,269	0,047
<i>Erinus alpinus</i>	9	0,954	8,588	0,006	2,188	7,269	0,047
<i>Sedum album</i>	8	0,903	7,225	0,006	2,239	7,439	0,043
<i>Carlina acaulis</i>	7	0,845	5,916	0,005	2,297	7,631	0,038
<i>Rosa pendulina</i>	7	0,845	5,916	0,005	2,297	7,631	0,038
<i>Prenanthes purpurea</i>	7	0,845	5,916	0,005	2,297	7,631	0,038
<i>Pinus uncinata</i>	7	0,845	5,916	0,005	2,297	7,631	0,038
<i>Linaria alpina</i>	7	0,845	5,916	0,005	2,297	7,631	0,038
<i>Epipactis atrorubens</i>	7	0,845	5,916	0,005	2,297	7,631	0,038
<i>Dianthus monspessulanus</i>	7	0,845	5,916	0,005	2,297	7,631	0,038

Eco-complexe (collection complète)	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$	p_i	$\log p_i$	$\log_2 p_i$	$- p_i \log_2 p_i$
<i>Crepis pyrenaica</i>	7	0,845	5,916	0,005	2,297	7,631	0,038
<i>Pulsatilla alpina</i>	7	0,845	5,916	0,005	2,297	7,631	0,038
<i>Rosa montana</i>	6	0,778	4,669	0,004	2,364	7,854	0,034
<i>Geranium robertianum</i>	6	0,778	4,669	0,004	2,364	7,854	0,034
<i>Hypericum nummularium</i>	5	0,699	3,495	0,004	2,443	8,117	0,029
<i>Salix caprea</i>	5	0,699	3,495	0,004	2,443	8,117	0,029
<i>Euphorbia amygdaloides</i>	5	0,699	3,495	0,004	2,443	8,117	0,029
<i>Carex sempervirens</i>	5	0,699	3,495	0,004	2,443	8,117	0,029
<i>Pritselago alpina</i>	4	0,602	2,408	0,003	2,540	8,439	0,024
<i>Polygonatum odoratum</i>	4	0,602	2,408	0,003	2,540	8,439	0,024
<i>Sorbus aucuparia</i>	4	0,602	2,408	0,003	2,540	8,439	0,024
<i>Campanula cochlearifolia</i>	4	0,602	2,408	0,003	2,540	8,439	0,024
<i>Dactylis glomerata</i>	4	0,602	2,408	0,003	2,540	8,439	0,024
<i>Gentiana angustifolia</i>	3	0,477	1,431	0,002	2,665	8,854	0,019
<i>Thesium alpinum</i>	3	0,477	1,431	0,002	2,665	8,854	0,019
<i>Lotus alpinus</i>	3	0,477	1,431	0,002	2,665	8,854	0,019
<i>Hieracium murorum</i>	3	0,477	1,431	0,002	2,665	8,854	0,019
<i>Asperula cynanchica</i>	3	0,477	1,431	0,002	2,665	8,854	0,019
<i>Anthyllis vulneraria</i>	3	0,477	1,431	0,002	2,665	8,854	0,019
<i>Alchemilla conjuncta</i>	3	0,477	1,431	0,002	2,665	8,854	0,019
<i>Abies alba</i>	3	0,477	1,431	0,002	2,665	8,854	0,019
<i>Primula acaulis</i>	2	0,301	0,602	0,001	2,841	9,439	0,014
<i>Hypericum maculatum</i>	2	0,301	0,602	0,001	2,841	9,439	0,014
<i>Cotoneaster integerrimus</i>	2	0,301	0,602	0,001	2,841	9,439	0,014
<i>Trifolium badium</i>	1	0,000	0,000	0,001	3,142	10,439	0,008
<i>Teucrium chamaedrys</i>	1	0,000	0,000	0,001	3,142	10,439	0,008
<i>Lonicera nigra</i>	1	0,000	0,000	0,001	3,142	10,439	0,008
<i>Coronilla vaginalis</i>	1	0,000	0,000	0,001	3,142	10,439	0,008
<i>Asplenium viride</i>	1	0,000	0,000	0,001	3,142	10,439	0,008
Totaux	1398		1924,887	1,000		5,832	$H = 5,83$

$$S = 90$$

$$\log_2 S = 6,492$$

b) Calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver pour un échantillon comportant 548 individus et 21 espèces

Station Eboulis ss	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Valeriana montana</i>	123	2,090	257,058
<i>Centranthus angustifolius</i>	61	1,785	108,905
<i>Rhamnus alpina</i>	47	1,672	78,589
<i>Leucanthemum adustum</i>	42	1,623	68,176
<i>Thymus praecox</i>	36	1,556	56,027
<i>Silene vulgaris</i>	35	1,544	54,042
<i>Rumex scutatus</i>	28	1,447	40,520
<i>Gymnocarpium dryopteris</i>	26	1,415	36,789
<i>Sideritis hyssopifolia</i>	25	1,398	34,949
<i>Senecio doronicum</i>	19	1,279	24,296
<i>Poa cenisia</i>	17	1,230	20,918
<i>Petasites paradoxus</i>	17	1,230	20,918
<i>Scrophularia juratensis</i>	13	1,114	14,481
<i>Galeopsis angustifolia</i>	13	1,114	14,481
<i>Globularia cordifolia</i>	9	0,954	8,588
<i>Erinus alpinus</i>	9	0,954	8,588
<i>Sedum album</i>	8	0,903	7,225
<i>Linaria alpina</i>	7	0,845	5,916
<i>Hypericum nummularium</i>	5	0,699	3,495
<i>Pritselago alpina</i>	4	0,602	2,408
<i>Campanula cochlearifolia</i>	4	0,602	2,408
Totaux	548		868,778

$H = 3,83$

$$S = 21$$

$$\log_2 S = 4,392$$

c) Calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver pour un échantillon comportant 793 individus et 37 espèces

Parcelles écotonnes	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$	Parcelles écotonnes	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Valeriana montana</i>	123	2,090	257,058	<i>Salix caprea</i>	5	0,699	3,495
<i>Calamagrostis varia</i>	69	1,839	126,881	<i>Carex sempervirens</i>	5	0,699	3,495
<i>Galium anisophyllum</i>	61	1,785	108,905	<i>Sorbus aucuparia</i>	4	0,602	2,408
<i>Leucanthemum adustum</i>	42	1,623	68,176	<i>Anthyllis vulneraria</i>	3	0,477	1,431
<i>Thymus praecox</i>	36	1,556	56,027	<i>Alchemilla conjuncta</i>	3	0,477	1,431
<i>Scabiosa columbaria</i>	36	1,556	56,027	<i>Cotoneaster integerrimus</i>	2	0,301	0,602
<i>Silene vulgaris</i>	35	1,544	54,042	<i>Teucrium chamaedrys</i>	1	0,000	0,000
<i>Viburnum lantana</i>	29	1,462	42,410	<i>Lonicera nigra</i>	1	0,000	0,000
<i>Rumex scutatus</i>	28	1,447	40,520	Totaux	951		1480,902
<i>Juniperus communis</i>	28	1,447	40,520				
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	26	1,415	36,789			$S =$	37
<i>Sideritis hyssopifolia</i>	25	1,398	34,949			$\log_2 S =$	5,209
<i>Lotus corniculatus</i>	23	1,362	31,320				
<i>Peucedanum ostruthium</i>	22	1,342	29,533				
<i>Senecio doricum</i>	19	1,279	24,296				
<i>Euphorbia cyparissias</i>	17	1,230	20,918				
<i>Corylus avellana</i>	14	1,146	16,046				
<i>Rubus idaeus</i>	13	1,114	14,481				
<i>Laserpitium siler</i>	13	1,114	14,481				
<i>Helianthemum nummularium</i>	13	1,114	14,481				
<i>Galeopsis angustifolia</i>	13	1,114	14,481				
<i>Cirsium arvense</i>	13	1,114	14,481				
<i>Amelanchier ovalis</i>	13	1,114	14,481				
<i>Acer pseudoplatanus</i>	13	1,114	14,481				
<i>Lonicera alpigena</i>	12	1,079	12,950				
<i>Sesleria varia</i>	11	1,041	11,455				
<i>Globularia cordifolia</i>	9	0,954	8,588				
<i>Rosa pendulina</i>	7	0,845	5,916				
<i>Rosa montana</i>	6	0,778	4,669				

$H = 4,59$

d) Calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver pour un échantillon comportant 667 individus et 58 espèces

Station formations périphériques	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$	Station formations périphériques	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Calamagrostis varia</i>	69	1,839	126,881	<i>Phyteuma hemisphaericum</i>	10	1,000	10,000
<i>Scabiosa columbaria</i>	36	1,556	56,027	<i>Gentiana verna</i>	10	1,000	10,000
<i>Juniperus communis</i>	28	1,447	40,520	<i>Carlina acaulis</i>	7	0,845	5,916
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	26	1,415	36,789	<i>Rosa pendulina</i>	7	0,845	5,916
<i>Lotus corniculatus</i>	23	1,362	31,320	<i>Prenanthes purpurea</i>	7	0,845	5,916
<i>Ranunculus repens</i>	22	1,342	29,533	<i>Pinus uncinata</i>	7	0,845	5,916
<i>Campanula rotundifolia</i>	19	1,279	24,296	<i>Dianthus monspessulanus</i>	7	0,845	5,916
<i>Sorbus aria</i>	17	1,230	20,918	<i>Crepis pyrenaica</i>	7	0,845	5,916
<i>Seseli libanotis</i>	17	1,230	20,918	<i>Pulsatilla alpina</i>	7	0,845	5,916
<i>Festuca ovina</i>	17	1,230	20,918	<i>Rosa montana</i>	6	0,778	4,669
<i>Euphrasia salisburgensis</i>	17	1,230	20,918	<i>Geranium robertianum</i>	6	0,778	4,669
<i>Euphorbia cyparissias</i>	17	1,230	20,918	<i>Salix caprea</i>	5	0,699	3,495
<i>Picea abies</i>	16	1,204	19,266	<i>Euphorbia amygdaloides</i>	5	0,699	3,495
<i>Gentiana lutea</i>	16	1,204	19,266	<i>Carex sempervirens</i>	5	0,699	3,495
<i>Globularia nudicaulis</i>	15	1,176	17,641	<i>Polygonatum odoratum</i>	4	0,602	2,408
<i>Vaccinium myrtillus</i>	14	1,146	16,046	<i>Sorbus aucuparia</i>	4	0,602	2,408
<i>Laserpitium latifolium</i>	14	1,146	16,046	<i>Dactylis glomerata</i>	4	0,602	2,408
<i>Fagus sylvatica</i>	14	1,146	16,046	<i>Gentiana angustifolia</i>	3	0,477	1,431
<i>Corylus avellana</i>	14	1,146	16,046	<i>Thesium alpinum</i>	3	0,477	1,431
<i>Rubus idaeus</i>	13	1,114	14,481	<i>Asperula cynanchica</i>	3	0,477	1,431
<i>Laserpitium siler</i>	13	1,114	14,481	<i>Anthyllis vulneraria</i>	3	0,477	1,431
<i>Helianthemum nummularium</i>	13	1,114	14,481	<i>Alchemilla conjuncta</i>	3	0,477	1,431
<i>Cirsium arvense</i>	13	1,114	14,481	<i>Abies alba</i>	3	0,477	1,431
<i>Amelanchier ovalis</i>	13	1,114	14,481	<i>Primula acaulis</i>	2	0,301	0,602
<i>Acer pseudoplatanus</i>	13	1,114	14,481	<i>Hypericum maculatum</i>	2	0,301	0,602
<i>Lonicera alpigena</i>	12	1,079	12,950	<i>Cotoneaster integerrimus</i>	2	0,301	0,602
<i>Sesleria varia</i>	11	1,041	11,455	<i>Trifolium badium</i>	1	0,000	0,000
<i>Taraxacum officinale</i>	10	1,000	10,000	<i>Teucrium chamaedrys</i>	1	0,000	0,000
<i>Pimpinella major</i>	10	1,000	10,000	<i>Lonicera nigra</i>	1	0,000	0,000
Totaux					1077		1487,018

$S = 58$

$\log_2 S = 5,858$

$H = 5,39$

B) Ecocomplexe de l'Aulp du Seuil

a) Calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver pour un échantillon comportant 701 individus et 65 espèces

Ecocomplexe (collection complète)	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$	Ecocomplexe (collection complète)	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	63	1,799	113,358	<i>Sesleria varia</i>	9	0,954	8,588
<i>Laserpitium siler</i>	45	1,653	74,395	<i>Gentiana verna</i>	9	0,954	8,588
<i>Valeriana montana</i>	43	1,633	70,239	<i>Carex sempervirens</i>	8	0,903	7,225
<i>Sideritis hyssopifolia</i>	42	1,623	68,176	<i>Viburnum lantana</i>	7	0,845	5,916
<i>Galium anisophyllum</i>	38	1,580	60,032	<i>Juniperus communis</i>	7	0,845	5,916
<i>Globularia nudicaulis</i>	32	1,505	48,165	<i>Corylus avellana</i>	7	0,845	5,916
<i>Rhamnus alpina</i>	28	1,447	40,520	<i>Euphorbia cyparissias</i>	5	0,699	3,495
<i>Amelanchier ovalis</i>	24	1,380	33,125	<i>Thymus praecox</i>	5	0,699	3,495
<i>Laserpitium latifolium</i>	23	1,362	31,320	<i>Serratula alpina</i>	4	0,602	2,408
<i>Leucanthemum adustum</i>	23	1,362	31,320	<i>Anthriscus sylvestris</i>	3	0,477	1,431
<i>Rumex scutatus</i>	21	1,322	27,767	<i>Rhinanthus hirsutus</i>	3	0,477	1,431
<i>Galeopsis angustifolia</i>	21	1,322	27,767	<i>Carlina acaulis</i>	3	0,477	1,431
<i>Salix caprea</i>	18	1,255	22,595	<i>Campanula cochlearifolia</i>	3	0,477	1,431
<i>Sorbus aria</i>	17	1,230	20,918	<i>Cirsium arvense</i>	3	0,477	1,431
<i>Helianthemum nummularium</i>	16	1,204	19,266	<i>Salix appendiculata</i>	3	0,477	1,431
<i>Globularia cordifolia</i>	15	1,176	17,641	<i>Cotoneaster integerrimus</i>	3	0,477	1,431
<i>Calamagrostis varia</i>	12	1,079	12,950	<i>Teuchrium montanum</i>	2	0,301	0,602
<i>Pinus uncinata</i>	12	1,079	12,950	<i>Sorbus aucuparia</i>	2	0,301	0,602
<i>Scabiosa columbaria</i>	11	1,041	11,455	<i>Anthyllis vulneraria</i>	2	0,301	0,602
<i>Picea abies</i>	11	1,041	11,455	<i>Polygala chamaebuxus</i>	2	0,301	0,602
<i>Rosa pendulina</i>	10	1,000	10,000	<i>Lonicera alpigena</i>	2	0,301	0,602
<i>Fagus sylvatica</i>	10	1,000	10,000	<i>Cephalanthera longifolia</i>	2	0,301	0,602
<i>Gentiana lutea</i>	10	1,000	10,000	<i>Erinus alpinus</i>	2	0,301	0,602
<i>Lonicera xylosteum</i>	10	1,000	10,000	<i>Sedum album</i>	1	0,000	0,000
<i>Centranthus angustifolius</i>	9	0,954	8,588	<i>Hypericum nummularium</i>	1	0,000	0,000
<i>Silene vulgaris</i>	9	0,954	8,588	<i>Hypericum maculatum</i>	1	0,000	0,000
<i>Lotus corniculatus</i>	9	0,954	8,588	<i>Gentiana angustifolia</i>	1	0,000	0,000
<i>Epipactis atrorubens</i>	9	0,954	8,588	<i>Peucedanum ostruthium</i>	1	0,000	0,000

Ecocomplexe (collection complète)	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Seseli libanotis</i>	1	0,000	0,000
<i>Astrantia major</i>	1	0,000	0,000
<i>Prenanthes purpurea</i>	1	0,000	0,000
<i>Pimpinella saxifraga</i>	1	0,000	0,000
<i>Linaria alpina</i>	1	0,000	0,000
<i>Euphrasia salisburgensis</i>	1	0,000	0,000
<i>Alchemilla conjuncta</i>	1	0,000	0,000
<i>Daphne mezereum</i>	1	0,000	0,000
<i>Polystichum lonchitis</i>	1	0,000	0,000
Totaux	701		895,547

$H = 5,21$

$S = 65$
 $\log_2 S = 6,022$

b) Calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver pour un échantillon comportant 226 individus et 16 espèces

Station Eboulis ss	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Valeriana montana</i>	43	1,633	70,239
<i>Sideritis hyssopifolia</i>	42	1,623	68,176
<i>Rhamnus alpina</i>	28	1,447	40,520
<i>Leucanthemum adustum</i>	23	1,362	31,320
<i>Rumex scutatus</i>	21	1,322	27,767
<i>Galeopsis angustifolia</i>	21	1,322	27,767
<i>Globularia cordifolia</i>	15	1,176	17,641
<i>Centranthus angustifolius</i>	9	0,954	8,588
<i>Silene vulgaris</i>	9	0,954	8,588
<i>Thymus praecox</i>	5	0,699	3,495
<i>Campanula cochlearifolia</i>	3	0,477	1,431
<i>Teuchrium montanum</i>	2	0,301	0,602
<i>Erinus alpinus</i>	2	0,301	0,602
<i>Sedum album</i>	1	0,000	0,000
<i>Hypericum nummularium</i>	1	0,000	0,000
<i>Linaria alpina</i>	1	0,000	0,000
Totaux	226		306,737

$H = 3,31$

$S = 16$

$\log_2 S = 4$

c) Calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver pour un échantillon comportant 500 individus et 33 espèces

Parcelles écotones	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$	Parcelles écotones	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	63	1,799	113,358	<i>Polygala chamaebuxus</i>	2	0,301	0,602
<i>Laserpitium siler</i>	45	1,653	74,395	<i>Lonicera alpigena</i>	2	0,301	0,602
<i>Valeriana montana</i>	43	1,633	70,239	<i>Peucedanum ostruthium</i>	1	0,000	0,000
<i>Sideritis hyssopifolia</i>	42	1,623	68,176	<i>Alchemilla conjuncta</i>	1	0,000	0,000
<i>Galium anisophyllum</i>	38	1,580	60,032	Totaux	500		682,545
<i>Amelanchier ovalis</i>	24	1,380	33,125				
<i>Leucanthemum adustum</i>	23	1,362	31,320			$S =$	33
<i>Rumex scutatus</i>	21	1,322	27,767			$\log_2 S =$	5,044
<i>Galeopsis angustifolia</i>	21	1,322	27,767				
<i>Salix caprea</i>	18	1,255	22,595				
<i>Sorbus aria</i>	17	1,230	20,918				
<i>Helianthemum nummularium</i>	16	1,204	19,266				
<i>Globularia cordifolia</i>	15	1,176	17,641				
<i>Calamagrostis varia</i>	12	1,079	12,950				
<i>Rosa pendulina</i>	10	1,000	10,000				
<i>Lonicera xylosteum</i>	10	1,000	10,000				
<i>Silene vulgaris</i>	9	0,954	8,588				
<i>Lotus corniculatus</i>	9	0,954	8,588				
<i>Sesleria varia</i>	9	0,954	8,588				
<i>Carex sempervirens</i>	8	0,903	7,225				
<i>Viburnum lantana</i>	7	0,845	5,916				
<i>Juniperus communis</i>	7	0,845	5,916				
<i>Corylus avellana</i>	7	0,845	5,916				
<i>Euphorbia cyparissias</i>	5	0,699	3,495				
<i>Thymus praecox</i>	5	0,699	3,495				
<i>Salix appendiculata</i>	3	0,477	1,431				
<i>Cotoneaster integerrimus</i>	3	0,477	1,431				
<i>Sorbus aucuparia</i>	2	0,301	0,602				
<i>Anthyllis vulneraria</i>	2	0,301	0,602				

$H = 4,43$

$S = 33$
 $\log_2 S = 5,044$

d) Calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver pour un échantillon comportant 436 individus et 47 espèces

Station formations périphériques	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$	Station formations périphériques	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	63	1,799	113,358	<i>Cirsium arvense</i>	3	0,477	1,431
<i>Laserpitium siler</i>	45	1,653	74,395	<i>Salix appendiculata</i>	3	0,477	1,431
<i>Globularia nudicaulis</i>	32	1,505	48,165	<i>Cotoneaster integerrimus</i>	3	0,477	1,431
<i>Amelanchier ovalis</i>	24	1,380	33,125	<i>Sorbus aucuparia</i>	2	0,301	0,602
<i>Laserpitium latifolium</i>	23	1,362	31,320	<i>Anthyllis vulneraria</i>	2	0,301	0,602
<i>Salix caprea</i>	18	1,255	22,595	<i>Polygala chamaebuxus</i>	2	0,301	0,602
<i>Sorbus aria</i>	17	1,230	20,918	<i>Lonicera alpigena</i>	2	0,301	0,602
<i>Helianthemum nummularium</i>	16	1,204	19,266	<i>Cephalanthera longifolia</i>	2	0,301	0,602
<i>Calamagrostis varia</i>	12	1,079	12,950	<i>Hypericum maculatum</i>	1	0,000	0,000
<i>Pinus uncinata</i>	12	1,079	12,950	<i>Gentiana angustifolia</i>	1	0,000	0,000
<i>Scabiosa columbaria</i>	11	1,041	11,455	<i>Seseli libanotis</i>	1	0,000	0,000
<i>Picea abies</i>	11	1,041	11,455	<i>Astrantia major</i>	1	0,000	0,000
<i>Rosa pendulina</i>	10	1,000	10,000	<i>Prenanthes purpurea</i>	1	0,000	0,000
<i>Fagus sylvatica</i>	10	1,000	10,000	<i>Pimpinella saxifraga</i>	1	0,000	0,000
<i>Gentiana lutea</i>	10	1,000	10,000	<i>Euphrasia salisburgensis</i>	1	0,000	0,000
<i>Lonicera xylosteum</i>	10	1,000	10,000	<i>Alchemilla conjuncta</i>	1	0,000	0,000
<i>Lotus corniculatus</i>	9	0,954	8,588	<i>Daphne mezereum</i>	1	0,000	0,000
<i>Epipactis atrorubens</i>	9	0,954	8,588	<i>Polystichum lonchitis</i>	1	0,000	0,000
<i>Sesleria varia</i>	9	0,954	8,588	Totaux	436		528,778
<i>Gentiana verna</i>	9	0,954	8,588				
<i>Carex sempervirens</i>	8	0,903	7,225			$S =$	47
<i>Viburnum lantana</i>	7	0,845	5,916			$\log_2 S =$	5,555
<i>Juniperus communis</i>	7	0,845	5,916				
<i>Corylus avellana</i>	7	0,845	5,916				
<i>Euphorbia cyparissias</i>	5	0,699	3,495				
<i>Serratula alpina</i>	4	0,602	2,408				
<i>Anthriscus sylvestris</i>	3	0,477	1,431				
<i>Rhinanthus hirsutus</i>	3	0,477	1,431				
<i>Carlina acaulis</i>	3	0,477	1,431				

$H = 4,74$

$S =$ 47
 $\log_2 S =$ 5,555

C) Ecocomplexe des Pelloux

a) Calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver pour un échantillon comportant 659 individus et 70 espèces

Ecocomplexe (collection complète)	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$	Ecocomplexe (collection complète)	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Galium anisophyllum</i>	53	1,724	91,387	<i>Thymus praecox</i>	8	0,903	7,225
<i>Valeriana montana</i>	40	1,602	64,082	<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	8	0,903	7,225
<i>Rumex scutatus</i>	36	1,556	56,027	<i>Phegopteris connectilis</i>	8	0,903	7,225
<i>Sideritis hyssopifolia</i>	29	1,462	42,410	<i>Sedum album</i>	7	0,845	5,916
<i>Scabiosa columbaria</i>	29	1,462	42,410	<i>Epipactis atrorubens</i>	7	0,845	5,916
<i>Centranthus angustifolius</i>	25	1,398	34,949	<i>Knautia arvensis</i>	6	0,778	4,669
<i>Laserpitium siler</i>	22	1,342	29,533	<i>Rhinanthus alectorophus</i>	5	0,699	3,495
<i>Lotus corniculatus</i>	22	1,342	29,533	<i>Globularia cordifolia</i>	5	0,699	3,495
<i>Geranium robertianum</i>	21	1,322	27,767	<i>Gentiana lutea</i>	5	0,699	3,495
<i>Laserpitium latifolium</i>	20	1,301	26,021	<i>Salix caprea</i>	4	0,602	2,408
<i>Euphorbia cyparissias</i>	20	1,301	26,021	<i>Taraxacum officinale</i>	4	0,602	2,408
<i>Pimpinella saxifraga</i>	19	1,279	24,296	<i>Poa cenisia</i>	4	0,602	2,408
<i>Helleborus foetidus</i>	18	1,255	22,595	<i>Scrophularia juratensis</i>	4	0,602	2,408
<i>Carex sempervirens</i>	18	1,255	22,595	<i>Teucrium montanum</i>	4	0,602	2,408
<i>Sesleria varia</i>	14	1,146	16,046	<i>Gentiana verna</i>	4	0,602	2,408
<i>Teucrium chamaedrys</i>	13	1,114	14,481	<i>Rosa montana</i>	3	0,477	1,431
<i>Helianthemum nummularium</i>	13	1,114	14,481	<i>Festuca ovina</i>	3	0,477	1,431
<i>Leucanthemum adustum</i>	12	1,079	12,950	<i>Rosa pendulina</i>	3	0,477	1,431
<i>Silene vulgaris</i>	12	1,079	12,950	<i>Rubus idaeus</i>	3	0,477	1,431
<i>Bromus erectus</i>	12	1,079	12,950	<i>Carlina acaulis</i>	3	0,477	1,431
<i>Peucedanum ostruthium</i>	10	1,000	10,000	<i>Cirsium arvense</i>	3	0,477	1,431
<i>Seseli libanotis</i>	10	1,000	10,000	<i>Carex flacca</i>	3	0,477	1,431
<i>Globularia nudicaulis</i>	10	1,000	10,000	<i>Pinus uncinata</i>	3	0,477	1,431
<i>Galeopsis angustifolia</i>	10	1,000	10,000	<i>Sorbus aucuparia</i>	3	0,477	1,431
<i>Vicia cracca</i>	9	0,954	8,588	<i>Amelanchier ovalis</i>	2	0,301	0,602
<i>Ribes alpinum</i>	9	0,954	8,588	<i>Lamium purpureum</i>	2	0,301	0,602
<i>Juniperus communis</i>	9	0,954	8,588	<i>Astrantia major</i>	2	0,301	0,602
<i>Calamagrostis varia</i>	8	0,903	7,225	<i>Fagus sylvatica</i>	2	0,301	0,602

Ecocomplexe (collection complète)	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Asplenium viride</i>	2	0,301	0,602
<i>Prenanthes purpurea</i>	2	0,301	0,602
<i>Saxifraga paniculata</i>	2	0,301	0,602
<i>Linaria alpina</i>	2	0,301	0,602
<i>Erinus alpinus</i>	1	0,000	0,000
<i>Viburnum lantana</i>	1	0,000	0,000
<i>Acer pseudoplatanus</i>	1	0,000	0,000
<i>Hieracium vulgare</i>	1	0,000	0,000
<i>Hieracium umbellatum</i>	1	0,000	0,000
<i>Briza media</i>	1	0,000	0,000
<i>Lamium galeobdolon</i>	1	0,000	0,000
<i>Sorbus aria</i>	1	0,000	0,000
<i>Euphrasia salisburgensis</i>	1	0,000	0,000
<i>Lonicera alpigena</i>	1	0,000	0,000
Totaux	659		777,279

 $H = 5,44$

$$S = 70$$

$$\log_2 S = 6,129$$

b) Calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver pour un échantillon comportant 201 individus et 16 espèces

Station Eboulis ss	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Valeriana montana</i>	40	1,602	64,082
<i>Rumex scutatus</i>	36	1,556	56,027
<i>Sideritis hyssopifolia</i>	29	1,462	42,410
<i>Centranthus angustifolius</i>	25	1,398	34,949
<i>Leucanthemum adustum</i>	12	1,079	12,950
<i>Silene vulgaris</i>	12	1,079	12,950
<i>Galeopsis angustifolia</i>	10	1,000	10,000
<i>Thymus praecox</i>	8	0,903	7,225
<i>Sedum album</i>	7	0,845	5,916
<i>Globularia cordifolia</i>	5	0,699	3,495
<i>Poa cenisia</i>	4	0,602	2,408
<i>Scrophularia juratensis</i>	4	0,602	2,408
<i>Teuchrium montanum</i>	4	0,602	2,408
<i>Asplenium viride</i>	2	0,301	0,602
<i>Linaria alpina</i>	2	0,301	0,602
<i>Erinus alpinus</i>	1	0,000	0,000
Totaux	201		258,432

$H = 3,38$

$S = 16$

$\log_2 S = 4$

c) Calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver pour un échantillon comportant 442 individus et 33 espèces

Parcelles écotones	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$	Parcelles écotones	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Galium anisophyllum</i>	53	1,724	91,387	<i>Amelanchier ovalis</i>	2	0,301	0,602
<i>Valeriana montana</i>	40	1,602	64,082	<i>Viburnum lantana</i>	1	0,000	0,000
<i>Rumex scutatus</i>	36	1,556	56,027	<i>Acer pseudoplatanus</i>	1	0,000	0,000
<i>Sideritis hyssopifolia</i>	29	1,462	42,410	<i>Sorbus aria</i>	1	0,000	0,000
<i>Scabiosa columbaria</i>	29	1,462	42,410	Totaux	442		570,013
<i>Laserpitium siler</i>	22	1,342	29,533				
<i>Lotus corniculatus</i>	22	1,342	29,533				
<i>Euphorbia cyparissias</i>	20	1,301	26,021				
<i>Helleborus foetidus</i>	18	1,255	22,595				
<i>Carex sempervirens</i>	18	1,255	22,595				
<i>Sesleria varia</i>	14	1,146	16,046				
<i>Teucrium chamaedrys</i>	13	1,114	14,481				
<i>Helianthemum nummularium</i>	13	1,114	14,481				
<i>Leucanthemum adustum</i>	12	1,079	12,950				
<i>Silene vulgaris</i>	12	1,079	12,950				
<i>Peucedanum ostruthium</i>	10	1,000	10,000				
<i>Galeopsis angustifolia</i>	10	1,000	10,000				
<i>Ribes alpinum</i>	9	0,954	8,588				
<i>Juniperus communis</i>	9	0,954	8,588				
<i>Calamagrostis varia</i>	8	0,903	7,225				
<i>Thymus praecox</i>	8	0,903	7,225				
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	8	0,903	7,225				
<i>Globularia cordifolia</i>	5	0,699	3,495				
<i>Salix caprea</i>	4	0,602	2,408				
<i>Rosa montana</i>	3	0,477	1,431				
<i>Rosa pendulina</i>	3	0,477	1,431				
<i>Rubus idaeus</i>	3	0,477	1,431				
<i>Cirsium arvense</i>	3	0,477	1,431				
<i>Sorbus aucuparia</i>	3	0,477	1,431				

$H = 4,5$

$S = 33$
 $\log_2 S = 5,044$

d) Calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver pour un échantillon comportant 367 individus et 49 espèces

Station formations périphériques	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$	Station formations périphériques	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Scabiosa columbaria</i>	29	1,462	42,410	<i>Rubus idaeus</i>	3	0,477	1,431
<i>Laserpitium siler</i>	22	1,342	29,533	<i>Carlina acaulis</i>	3	0,477	1,431
<i>Lotus corniculatus</i>	22	1,342	29,533	<i>Cirsium arvense</i>	3	0,477	1,431
<i>Geranium robertianum</i>	21	1,322	27,767	<i>Carex flacca</i>	3	0,477	1,431
<i>Laserpitium latifolium</i>	20	1,301	26,021	<i>Pinus uncinata</i>	3	0,477	1,431
<i>Euphorbia cyparissias</i>	20	1,301	26,021	<i>Sorbus aucuparia</i>	3	0,477	1,431
<i>Pimpinella saxifraga</i>	19	1,279	24,296	<i>Amelanchier ovalis</i>	2	0,301	0,602
<i>Carex sempervirens</i>	18	1,255	22,595	<i>Lamium purpureum</i>	2	0,301	0,602
<i>Sesleria varia</i>	14	1,146	16,046	<i>Astrantia major</i>	2	0,301	0,602
<i>Teucrium chamaedrys</i>	13	1,114	14,481	<i>Fagus sylvatica</i>	2	0,301	0,602
<i>Helianthemum nummularium</i>	13	1,114	14,481	<i>Prenanthes purpurea</i>	2	0,301	0,602
<i>Bromus erectus</i>	12	1,079	12,950	<i>Viburnum lantana</i>	1	0,000	0,000
<i>Seseli libanotis</i>	10	1,000	10,000	<i>Acer pseudoplatanus</i>	1	0,000	0,000
<i>Globularia nudicaulis</i>	10	1,000	10,000	<i>Hieracium vulgare</i>	1	0,000	0,000
<i>Vicia cracca</i>	9	0,954	8,588	<i>Hieracium umbellatum</i>	1	0,000	0,000
<i>Ribes alpinum</i>	9	0,954	8,588	<i>Briza media</i>	1	0,000	0,000
<i>Juniperus communis</i>	9	0,954	8,588	<i>Lamium galeobdolon</i>	1	0,000	0,000
<i>Calamagrostis varia</i>	8	0,903	7,225	<i>Sorbus aria</i>	1	0,000	0,000
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	8	0,903	7,225	<i>Euphrasia salisburgensis</i>	1	0,000	0,000
<i>Epipactis atrorubens</i>	7	0,845	5,916	<i>Lonicera alpigena</i>	1	0,000	0,000
<i>Knautia arvensis</i>	6	0,778	4,669	Totaux	367		387,039
<i>Rhinanthus alectorophus</i>	5	0,699	3,495				
<i>Gentiana lutea</i>	5	0,699	3,495				
<i>Salix caprea</i>	4	0,602	2,408				
<i>Taraxacum officinale</i>	4	0,602	2,408				
<i>Gentiana verna</i>	4	0,602	2,408				
<i>Rosa montana</i>	3	0,477	1,431				
<i>Festuca ovina</i>	3	0,477	1,431				
<i>Rosa pendulina</i>	3	0,477	1,431				

$H = 5,01$

$S = 49$
 $\log_2 S = 5,615$

D) Ecocomplexe du Grand Som

a) Calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver pour un échantillon comportant 683 individus et 78 espèces

Ecocomplexe (collection complète)	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$	Ecocomplexe (collection complète)	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Valeriana montana</i>	47	1,672	78,589	<i>Lotus alpinus</i>	8	0,903	7,225
<i>Silene vulgaris</i>	35	1,544	54,042	<i>Globularia nudicaulis</i>	8	0,903	7,225
<i>Galium anisophyllum</i>	31	1,491	46,232	<i>Scrophularia juratensis</i>	7	0,845	5,916
<i>Senecio doronicum</i>	27	1,431	38,647	<i>Alchemilla conjuncta</i>	7	0,845	5,916
<i>Carex sempervirens</i>	25	1,398	34,949	<i>Crepis pyrenaica</i>	6	0,778	4,669
<i>Cirsium arvense</i>	25	1,398	34,949	<i>Picea abies</i>	6	0,778	4,669
<i>Sideritis hyssopifolia</i>	23	1,362	31,320	<i>Rubus idaeus</i>	5	0,699	3,495
<i>Rumex scutatus</i>	22	1,342	29,533	<i>Pimpinella major</i>	5	0,699	3,495
<i>Thymus praecox</i>	22	1,342	29,533	<i>Hypericum nummularium</i>	5	0,699	3,495
<i>Petasites paradoxus</i>	21	1,322	27,767	<i>Poa cenisia</i>	5	0,699	3,495
<i>Laserpitium siler</i>	21	1,322	27,767	<i>Galeopsis angustifolia</i>	5	0,699	3,495
<i>Sesleria varia</i>	21	1,322	27,767	<i>Phyteuma hemisphaericum</i>	5	0,699	3,495
<i>Thalictrum minus</i>	20	1,301	26,021	<i>Pimpinella minor</i>	5	0,699	3,495
<i>Euphorbia cyparissias</i>	19	1,279	24,296	<i>Acer pseudoplatanus</i>	4	0,602	2,408
<i>Lotus corniculatus</i>	18	1,255	22,595	<i>Pritselago alpina</i>	4	0,602	2,408
<i>Centranthus angustifolius</i>	16	1,204	19,266	<i>Seseli libanotis</i>	4	0,602	2,408
<i>Hypericum maculatum</i>	16	1,204	19,266	<i>Gentiana verna</i>	4	0,602	2,408
<i>Laserpitium latifolium</i>	14	1,146	16,046	<i>Serratula alpina</i>	4	0,602	2,408
<i>Campanula rotundifolia</i>	12	1,079	12,950	<i>Carlina acaulis</i>	3	0,477	1,431
<i>Scabiosa columbaria</i>	12	1,079	12,950	<i>Geranium robertianum</i>	3	0,477	1,431
<i>Hieracium murorum</i>	12	1,079	12,950	<i>Dactylis glomerata</i>	3	0,477	1,431
<i>Thesium alpinum</i>	11	1,041	11,455	<i>Peucedanum ostruthium</i>	3	0,477	1,431
<i>Asperula cynanchica</i>	11	1,041	11,455	<i>Hieracium pilosella</i>	3	0,477	1,431
<i>Ranunculus repens</i>	11	1,041	11,455	<i>Fagus sylvatica</i>	3	0,477	1,431
<i>Leucanthemum adustum</i>	11	1,041	11,455	<i>Linaria alpina</i>	3	0,477	1,431
<i>Pulsatilla alpina</i>	10	1,000	10,000	<i>Epilobium montanum</i>	2	0,301	0,602
<i>Globularia cordifolia</i>	10	1,000	10,000	<i>Dianthus monspessulanus</i>	2	0,301	0,602
<i>Helianthemum nummularium</i>	9	0,954	8,588	<i>Teucrium chamaedrys</i>	2	0,301	0,602

Ecocomplexe (collection complète)	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Euphorbia amygdaloides</i>	2	0,301	0,602
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	2	0,301	0,602
<i>Euphrasia salisburgensis</i>	2	0,301	0,602
<i>Gentiana angustifolia</i>	2	0,301	0,602
<i>Lathyrus heterophyllus</i>	2	0,301	0,602
<i>Taraxacum officinale</i>	1	0,000	0,000
<i>Phyteuma betonocifolium</i>	1	0,000	0,000
<i>Rhododendron ferrugineum</i>	1	0,000	0,000
<i>Erinus alpinus</i>	1	0,000	0,000
<i>Campanula cochlearifolia</i>	1	0,000	0,000
<i>Anthyllis montana</i>	1	0,000	0,000
<i>Trifolium badium</i>	1	0,000	0,000
<i>Aconitum vulparia</i>	1	0,000	0,000
<i>Clinopodium vulgare</i>	1	0,000	0,000
<i>Primula acaulis</i>	1	0,000	0,000
<i>Centaurea montana</i>	1	0,000	0,000
<i>Gentiana lutea</i>	1	0,000	0,000
<i>Prenanthes purpurea</i>	1	0,000	0,000
<i>Epipactis atrorubens</i>	1	0,000	0,000
<i>Sorbus aria</i>	1	0,000	0,000
<i>Anthyllis vulneraria</i>	1	0,000	0,000
<i>Corylus avellana</i>	1	0,000	0,000
Totaux	683		788,802

 $H = 5,57$ $S = 78$ $\log_2 S = 6,285$

b) Calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver pour un échantillon comportant 285 individus et 19 espèces

Station Eboulis ss	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Valeriana montana</i>	47	1,672	78,589
<i>Silene vulgaris</i>	35	1,544	54,042
<i>Senecio doronicum</i>	27	1,431	38,647
<i>Sideritis hyssopifolia</i>	23	1,362	31,320
<i>Rumex scutatus</i>	22	1,342	29,533
<i>Thymus praecox</i>	22	1,342	29,533
<i>Petasites paradoxus</i>	21	1,322	27,767
<i>Thalictrum minus</i>	20	1,301	26,021
<i>Centranthus angustifolius</i>	16	1,204	19,266
<i>Leucanthemum adustum</i>	11	1,041	11,455
<i>Globularia cordifolia</i>	10	1,000	10,000
<i>Scrophularia juratensis</i>	7	0,845	5,916
<i>Hypericum nummularium</i>	5	0,699	3,495
<i>Poa cenisia</i>	5	0,699	3,495
<i>Galeopsis angustifolia</i>	5	0,699	3,495
<i>Pritselago alpina</i>	4	0,602	2,408
<i>Linaria alpina</i>	3	0,477	1,431
<i>Erinus alpinus</i>	1	0,000	0,000
<i>Campanula cochlearifolia</i>	1	0,000	0,000
Totaux	285		376,412

$H = 3,76$

$S = 19$

$\log_2 S = 4,248$

c) Calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver pour un échantillon comportant 406 individus et 25 espèces

Parcelles écotones	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Valeriana montana</i>	47	1,672	78,589
<i>Silene vulgaris</i>	35	1,544	54,042
<i>Galium anisophyllum</i>	31	1,491	46,232
<i>Senecio doronicum</i>	27	1,431	38,647
<i>Carex sempervirens</i>	25	1,398	34,949
<i>Cirsium arvense</i>	25	1,398	34,949
<i>Sideritis hyssopifolia</i>	23	1,362	31,320
<i>Rumex scutatus</i>	22	1,342	29,533
<i>Thymus praecox</i>	22	1,342	29,533
<i>Laserpitium siler</i>	21	1,322	27,767
<i>Sesleria varia</i>	21	1,322	27,767
<i>Euphorbia cyparissias</i>	19	1,279	24,296
<i>Lotus corniculatus</i>	18	1,255	22,595
<i>Scabiosa columbaria</i>	12	1,079	12,950
<i>Leucanthemum adustum</i>	11	1,041	11,455
<i>Globularia cordifolia</i>	10	1,000	10,000
<i>Helianthemum nummularium</i>	9	0,954	8,588
<i>Alchemilla conjuncta</i>	7	0,845	5,916
<i>Rubus idaeus</i>	5	0,699	3,495
<i>Galeopsis angustifolia</i>	5	0,699	3,495
<i>Acer pseudoplatanus</i>	4	0,602	2,408
<i>Peucedanum ostruthium</i>	3	0,477	1,431
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	2	0,301	0,602
<i>Sorbus aria</i>	1	0,000	0,000
<i>Corylus avellana</i>	1	0,000	0,000
Totaux	406		540,559

$H = 4,24$

$S = 25$
 $\log_2 S = 4,644$

d) Calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver pour un échantillon comportant 341 individus et 55 espèces

Station formations périphériques	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$	Station formations périphériques	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Carex sempervirens</i>	25	1,398	34,949	<i>Dactylis glomerata</i>	3	0,477	1,431
<i>Cirsium arvense</i>	25	1,398	34,949	<i>Hieracium pilosella</i>	3	0,477	1,431
<i>Laserpitium siler</i>	21	1,322	27,767	<i>Fagus sylvatica</i>	3	0,477	1,431
<i>Sesleria varia</i>	21	1,322	27,767	<i>Epilobium montanum</i>	2	0,301	0,602
<i>Euphorbia cyparissias</i>	19	1,279	24,296	<i>Dianthus monspessulanus</i>	2	0,301	0,602
<i>Lotus corniculatus</i>	18	1,255	22,595	<i>Teucrium chamaedrys</i>	2	0,301	0,602
<i>Hypericum maculatum</i>	16	1,204	19,266	<i>Euphorbia amygdaloides</i>	2	0,301	0,602
<i>Laserpitium latifolium</i>	14	1,146	16,046	<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	2	0,301	0,602
<i>Campanula rotundifolia</i>	12	1,079	12,950	<i>Euphrasia salisburgensis</i>	2	0,301	0,602
<i>Scabiosa columbaria</i>	12	1,079	12,950	<i>Gentiana angustifolia</i>	2	0,301	0,602
<i>Thesium alpinum</i>	11	1,041	11,455	<i>Lathyrus heterophyllus</i>	2	0,301	0,602
<i>Ranunculus repens</i>	11	1,041	11,455	<i>Taraxacum officinale</i>	1	0,000	0,000
<i>Pulsatilla alpina</i>	10	1,000	10,000	<i>Phyteuma betonocifolium</i>	1	0,000	0,000
<i>Helianthemum nummularium</i>	9	0,954	8,588	<i>Rhododendron ferrugineum</i>	1	0,000	0,000
<i>Lotus alpinus</i>	8	0,903	7,225	<i>Anthyllis montana</i>	1	0,000	0,000
<i>Globularia nudicaulis</i>	8	0,903	7,225	<i>Trifolium badium</i>	1	0,000	0,000
<i>Alchemilla conjuncta</i>	7	0,845	5,916	<i>Aconitum vulparia</i>	1	0,000	0,000
<i>Crepis pyrenaica</i>	6	0,778	4,669	<i>Clinopodium vulgare</i>	1	0,000	0,000
<i>Picea abies</i>	6	0,778	4,669	<i>Primula acaulis</i>	1	0,000	0,000
<i>Rubus idaeus</i>	5	0,699	3,495	<i>Centaurea montana</i>	1	0,000	0,000
<i>Pimpinella major</i>	5	0,699	3,495	<i>Gentiana lutea</i>	1	0,000	0,000
<i>Phyteuma hemisphaericum</i>	5	0,699	3,495	<i>Prenanthes purpurea</i>	1	0,000	0,000
<i>Pimpinella minor</i>	5	0,699	3,495	<i>Epipactis atrorubens</i>	1	0,000	0,000
<i>Acer pseudoplatanus</i>	4	0,602	2,408	<i>Sorbus aria</i>	1	0,000	0,000
<i>Seseli libanotis</i>	4	0,602	2,408	<i>Anthyllis vulneraria</i>	1	0,000	0,000
<i>Gentiana verna</i>	4	0,602	2,408	<i>Corylus avellana</i>	1	0,000	0,000
<i>Serratula alpina</i>	4	0,602	2,408	Totaux	341		340,321
<i>Carlina acaulis</i>	3	0,477	1,431			$S =$	55
<i>Geranium robertianum</i>	3	0,477	1,431			$\log_2 S =$	5,781

$H = 5,09$

E) Ecocomplexe de la Grande Sure

a) Calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver pour un échantillon comportant 165 individus et 40 espèces

Ecocomplexe (collection complète)	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$	Ecocomplexe (collection complète)	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Valeriana montana</i>	17	1,230	20,918	<i>Crepis pyrenaica</i>	2	0,301	0,602
<i>Carex sempervirens</i>	12	1,079	12,950	<i>Teucrium chamaedrys</i>	2	0,301	0,602
<i>Sesleria varia</i>	10	1,000	10,000	<i>Centaurea montana</i>	2	0,301	0,602
<i>Scabiosa columbaria</i>	9	0,954	8,588	<i>Helianthemum nummularium</i>	2	0,301	0,602
<i>Alchemilla conjuncta</i>	9	0,954	8,588	<i>Thymus praecox</i>	2	0,301	0,602
<i>Hypericum maculatum</i>	8	0,903	7,225	<i>Leucanthemum adustum</i>	2	0,301	0,602
<i>Senecio doronicum</i>	7	0,845	5,916	<i>Juniperus communis</i>	2	0,301	0,602
<i>Allium narcissiflorum</i>	6	0,778	4,669	<i>Picea abies</i>	2	0,301	0,602
<i>Galium anisophyllum</i>	6	0,778	4,669	<i>Pinus montana</i>	1	0,000	0,000
<i>Geranium sylvaticum</i>	6	0,778	4,669	<i>Taraxacum officinale</i>	1	0,000	0,000
<i>Poa cenisia</i>	5	0,699	3,495	<i>Petasites paradoxus</i>	1	0,000	0,000
<i>Lotus corniculatus</i>	5	0,699	3,495	<i>Carlina acaulis</i>	1	0,000	0,000
<i>Rumex scutatus</i>	4	0,602	2,408	Totaux	165		121,149
<i>Laserpitium latifolium</i>	4	0,602	2,408				
<i>Globularia nudicaulis</i>	4	0,602	2,408			$S =$	40
<i>Cirsium arvense</i>	4	0,602	2,408			$\log_2 S =$	5,322
<i>Gymnocarpium dryopteris</i>	4	0,602	2,408				
<i>Dactylis glomerata</i>	3	0,477	1,431				
<i>Pulsatilla alpina</i>	3	0,477	1,431				
<i>Astrantia major</i>	3	0,477	1,431				
<i>Salix retusa</i>	2	0,301	0,602				
<i>Rubus idaeus</i>	2	0,301	0,602				
<i>Rhododendron ferrugineum</i>	2	0,301	0,602				
<i>Erinus alpinus</i>	2	0,301	0,602				
<i>Campanula cochlearifolia</i>	2	0,301	0,602				
<i>Anthyllis montana</i>	2	0,301	0,602				
<i>Campanula rotundifolia</i>	2	0,301	0,602				
<i>Peucedanum ostruthium</i>	2	0,301	0,602				

$H = 4,92$

$S = 40$
 $\log_2 S = 5,322$

b) Calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver pour un échantillon comportant 54 individus et 12 espèces

Station Eboulis ss	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Valeriana montana</i>	17	1,230	20,918
<i>Senecio doricum</i>	7	0,845	5,916
<i>Allium narcissiflorum</i>	6	0,778	4,669
<i>Poa censis</i>	5	0,699	3,495
<i>Rumex scutatus</i>	4	0,602	2,408
<i>Gymnocarpium dryopteris</i>	4	0,602	2,408
<i>Salix retusa</i>	2	0,301	0,602
<i>Erinus alpinus</i>	2	0,301	0,602
<i>Campanula cochlearifolia</i>	2	0,301	0,602
<i>Thymus praecox</i>	2	0,301	0,602
<i>Leucanthemum adustum</i>	2	0,301	0,602
<i>Petasites paradoxus</i>	1	0,000	0,000
Totaux	54		42,824

$H = 3,12$

$$S = 12$$

$$\log_2 S = 3,585$$

c) Calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver pour un échantillon comportant 97 individus et 17 espèces

Parcelles écotones	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Valeriana montana</i>	17	1,230	20,918
<i>Carex sempervirens</i>	12	1,079	12,950
<i>Sesleria varia</i>	10	1,000	10,000
<i>Scabiosa columbaria</i>	9	0,954	8,588
<i>Alchemilla conjuncta</i>	9	0,954	8,588
<i>Senecio doronicum</i>	7	0,845	5,916
<i>Galium anisophyllum</i>	6	0,778	4,669
<i>Lotus corniculatus</i>	5	0,699	3,495
<i>Rumex scutatus</i>	4	0,602	2,408
<i>Cirsium arvense</i>	4	0,602	2,408
<i>Rubus idaeus</i>	2	0,301	0,602
<i>Peucedanum ostruthium</i>	2	0,301	0,602
<i>Teucrium chamaedrys</i>	2	0,301	0,602
<i>Helianthemum nummularium</i>	2	0,301	0,602
<i>Thymus praecox</i>	2	0,301	0,602
<i>Leucanthemum adustum</i>	2	0,301	0,602
<i>Juniperus communis</i>	2	0,301	0,602
Totaux	97		84,155

$H = 3,71$

$$S = 17$$

$$\log_2 S = 4,087$$

d) Calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver pour un échantillon comportant 103 individus et 26 espèces

Station formations périphériques	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Carex sempervirens</i>	12	1,079	12,950
<i>Sesleria varia</i>	10	1,000	10,000
<i>Scabiosa columbaria</i>	9	0,954	8,588
<i>Alchemilla conjuncta</i>	9	0,954	8,588
<i>Hypericum maculatum</i>	8	0,903	7,225
<i>Geranium sylvaticum</i>	6	0,778	4,669
<i>Lotus corniculatus</i>	5	0,699	3,495
<i>Laserpitium latifolium</i>	4	0,602	2,408
<i>Globularia nudicaulis</i>	4	0,602	2,408
<i>Cirsium arvense</i>	4	0,602	2,408
<i>Dactylis glomerata</i>	3	0,477	1,431
<i>Pulsatilla alpina</i>	3	0,477	1,431
<i>Astrantia major</i>	3	0,477	1,431
<i>Rubus idaeus</i>	2	0,301	0,602
<i>Rhododendron ferrugineum</i>	2	0,301	0,602
<i>Anthyllis montana</i>	2	0,301	0,602
<i>Campanula rotundifolia</i>	2	0,301	0,602
<i>Crepis pyrenaica</i>	2	0,301	0,602
<i>Teucrium chamaedrys</i>	2	0,301	0,602
<i>Centaurea montana</i>	2	0,301	0,602
<i>Helianthemum nummularium</i>	2	0,301	0,602
<i>Juniperus communis</i>	2	0,301	0,602
<i>Picea abies</i>	2	0,301	0,602
<i>Pinus montana</i>	1	0,000	0,000
<i>Taraxacum officinale</i>	1	0,000	0,000
<i>Carlina acaulis</i>	1	0,000	0,000
Totaux	103		73,054
	$S =$		26
	$\log_2 S =$		4,700

$H = 4,33$

F) Ensemble des sites

a) Calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver pour un échantillon comportant 3526 individus et 126 espèces

Ecocomplexes (collection complète)	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$	Ecocomplexes (collection complète)	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Valeriana montana</i>	270	2,431	656,468	<i>Peucedanum ostruthium</i>	38	1,580	60,032
<i>Galium anisophyllum</i>	189	2,276	430,251	<i>Viburnum lantana</i>	37	1,568	58,023
<i>Sideritis hyssopifolia</i>	119	2,076	246,990	<i>Gentiana lutea</i>	37	1,568	58,023
<i>Centranthus angustifolius</i>	111	2,045	227,031	<i>Sorbus aria</i>	36	1,556	56,027
<i>Rumex scutatus</i>	111	2,045	227,031	<i>Picea abies</i>	35	1,544	54,042
<i>Laserpitium siler</i>	101	2,004	202,436	<i>Campanula rotundifolia</i>	33	1,519	50,111
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	99	1,996	197,568	<i>Ranunculus repens</i>	33	1,519	50,111
<i>Scabiosa columbaria</i>	97	1,987	192,717	<i>Seseli libanotis</i>	32	1,505	48,165
<i>Silene vulgaris</i>	91	1,959	178,273	<i>Scrophularia juratensis</i>	32	1,505	48,165
<i>Calamagrostis varia</i>	89	1,949	173,496	<i>Poa cenisia</i>	31	1,491	46,232
<i>Leucanthemum adustum</i>	78	1,892	147,583	<i>Geranium robertianum</i>	30	1,477	44,314
<i>Lotus corniculatus</i>	77	1,886	145,260	<i>Fagus sylvatica</i>	29	1,462	42,410
<i>Rhamnus alpina</i>	75	1,875	140,630	<i>Salix caprea</i>	27	1,431	38,647
<i>Laserpitium latifolium</i>	75	1,875	140,630	<i>Gentiana angustifolia</i>	27	1,431	38,647
<i>Thymus praecox</i>	73	1,863	136,023	<i>Gymnocarpium dryopteris</i>	26	1,415	36,789
<i>Globularia nudicaulis</i>	69	1,839	126,881	<i>Hypericum maculatum</i>	26	1,415	36,789
<i>Carex sempervirens</i>	68	1,833	124,611	<i>Epipactis atrorubens</i>	24	1,380	33,125
<i>Sesleria varia</i>	65	1,813	117,839	<i>Rubus idaeus</i>	23	1,362	31,320
<i>Euphorbia cyparissias</i>	61	1,785	108,905	<i>Corylus avellana</i>	22	1,342	29,533
<i>Helleborus foetidus</i>	54	1,732	93,549	<i>Euphrasia salisburgensis</i>	21	1,322	27,767
<i>Senecio doronicum</i>	53	1,724	91,387	<i>Festuca ovina</i>	20	1,301	26,021
<i>Helianthemum nummularium</i>	53	1,724	91,387	<i>Rosa pendulina</i>	20	1,301	26,021
<i>Galeopsis angustifolia</i>	49	1,690	82,820	<i>Thalictrum minus</i>	20	1,301	26,021
<i>Cirsium arvense</i>	48	1,681	80,700	<i>Pimpinella saxifraga</i>	20	1,301	26,021
<i>Juniperus communis</i>	46	1,663	76,487	<i>Alchemilla conjuncta</i>	20	1,301	26,021
<i>Amelanchier ovalis</i>	39	1,591	62,052	<i>Acer pseudoplatanus</i>	18	1,255	22,595
<i>Petasites paradoxus</i>	39	1,591	62,052	<i>Teucrium chamaedrys</i>	18	1,255	22,595
<i>Globularia cordifolia</i>	39	1,591	62,052	<i>Sedum album</i>	16	1,204	19,266

Ecocomplexes (collection complète)	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$	Ecocomplexes (collection complète)	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Taraxacum officinale</i>	16	1,204	19,266	<i>Astrantia major</i>	6	0,778	4,669
<i>Crepis pyrenaica</i>	15	1,176	17,641	<i>Knautia arvensis</i>	6	0,778	4,669
<i>Hieracium murorum</i>	15	1,176	17,641	<i>Teuchrium montanum</i>	6	0,778	4,669
<i>Phyteuma hemisphaericum</i>	15	1,176	17,641	<i>Pimpinella minor</i>	5	0,699	3,495
<i>Pinus montana</i>	15	1,176	17,641	<i>Sorbus aucuparia</i>	5	0,699	3,495
<i>Lonicera alpigena</i>	15	1,176	17,641	<i>Polygonatum odoratum</i>	4	0,602	2,408
<i>Vaccinium myrtillus</i>	14	1,146	16,046	<i>Pritselago alpina</i>	4	0,602	2,408
<i>Pimpinella major</i>	14	1,146	16,046	<i>Gymnocarpium dryopteris</i>	4	0,602	2,408
<i>Thesium alpinum</i>	14	1,146	16,046	<i>Epilobium montanum</i>	3	0,477	1,431
<i>Asperula cynanchica</i>	14	1,146	16,046	<i>Rhododendron ferrugineum</i>	3	0,477	1,431
<i>Pulsatilla alpina</i>	13	1,114	14,481	<i>Hieracium pilosella</i>	3	0,477	1,431
<i>Linaria alpina</i>	13	1,114	14,481	<i>Centaurea montana</i>	3	0,477	1,431
<i>Erinus alpinus</i>	12	1,079	12,950	<i>Carex flacca</i>	3	0,477	1,431
<i>Bromus erectus</i>	12	1,079	12,950	<i>Abies alba</i>	3	0,477	1,431
<i>Lotus alpinus</i>	11	1,041	11,455	<i>Anthyllis vulneraria</i>	3	0,477	1,431
<i>Prenanthes purpurea</i>	11	1,041	11,455	<i>Salix appendiculata</i>	3	0,477	1,431
<i>Convallaria majalis</i>	10	1,000	10,000	<i>Cotoneaster integerrimus</i>	3	0,477	1,431
<i>Lonicera xylosteum</i>	10	1,000	10,000	<i>Salix retusa</i>	2	0,301	0,602
<i>Rosa montana</i>	9	0,954	8,588	<i>Lamium purpureum</i>	2	0,301	0,602
<i>Vicia cracca</i>	9	0,954	8,588	<i>Trifolium badium</i>	2	0,301	0,602
<i>Ribes alpinum</i>	9	0,954	8,588	<i>Asplenium viride</i>	2	0,301	0,602
<i>Rhinanthus alectorophus</i>	8	0,903	7,225	<i>Saxifraga paniculata</i>	2	0,301	0,602
<i>Phegopteris connectilis</i>	8	0,903	7,225	<i>Polygala chamaebuxus</i>	2	0,301	0,602
<i>Serratula alpina</i>	8	0,903	7,225	<i>Cephalanthera longifolia</i>	2	0,301	0,602
<i>Dianthus monspessulanus</i>	7	0,845	5,916	<i>Coronilla vaginalis</i>	1	0,000	0,000
<i>Campanula cochlearifolia</i>	7	0,845	5,916	<i>Aconitum vulparia</i>	1	0,000	0,000
<i>Euphorbia amygdaloides</i>	7	0,845	5,916	<i>Primula acaulis</i>	1	0,000	0,000
<i>Carlina acaulis</i>	7	0,845	5,916	<i>Hieracium vulgare</i>	1	0,000	0,000
<i>Allium narcissiflorum</i>	6	0,778	4,669	<i>Briza media</i>	1	0,000	0,000
<i>Anthyllis montana</i>	6	0,778	4,669	<i>Lamium galeobdolon</i>	1	0,000	0,000
<i>Dactylis glomerata</i>	6	0,778	4,669	<i>Lonicera nigra</i>	1	0,000	0,000
<i>Geranium sylvaticum</i>	6	0,778	4,669	<i>Daphne mezereum</i>	1	0,000	0,000

Ecocomplexes (collection complète)	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Polystichum lonchitis</i>	1	0,000	0,000
<i>Hieracium umbellatum</i>	1	0,000	0,000
<i>Clinopodium vulgare</i>	1	0,000	0,000
<i>Phyteuma betonocifolium</i>	1	0,000	0,000
<i>Barstia alpina</i>	1	0,000	0,000
<i>Calamintha grandiflora</i>	1	0,000	0,000
Totaux	3526		6110,460

 $H = 6,02$

$$S = 126$$

$$\log_2 S = 6,977$$

b) Calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver pour un échantillon comportant 1486 individus et 25 espèces

Station Eboulis ss	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Valeriana montana</i>	270	2,431	656,468
<i>Galium anisophyllum</i>	189	2,276	430,251
<i>Sideritis hyssopifolia</i>	119	2,076	246,990
<i>Centranthus angustifolius</i>	111	2,045	227,031
<i>Rumex scutatus</i>	111	2,045	227,031
<i>Silene vulgaris</i>	91	1,959	178,273
<i>Leucanthemum adustum</i>	78	1,892	147,583
<i>Rhamnus alpina</i>	75	1,875	140,630
<i>Thymus praecox</i>	73	1,863	136,023
<i>Senecio doronicum</i>	53	1,724	91,387
<i>Galeopsis angustifolia</i>	49	1,690	82,820
<i>Globularia cordifolia</i>	39	1,591	62,052
<i>Peucedanum ostruthium</i>	38	1,580	60,032
<i>Scrophularia juratensis</i>	32	1,505	48,165
<i>Poa cenisia</i>	31	1,491	46,232
<i>Gymnocarpium dryopteris</i>	26	1,415	36,789
<i>Thalictrum minus</i>	20	1,301	26,021
<i>Sedum album</i>	16	1,204	19,266
<i>Hieracium murorum</i>	15	1,176	17,641
<i>Linaria alpina</i>	13	1,114	14,481
<i>Erinus alpinus</i>	12	1,079	12,950
<i>Phegopteris connectilis</i>	8	0,903	7,225
<i>Campanula cochlearifolia</i>	7	0,845	5,916
<i>Allium narcissiflorum</i>	6	0,778	4,669
<i>Pritselago alpina</i>	4	0,602	2,408
Totaux	1486		2928,332

$H = 4$

$$S = 25$$

$$\log_2 S = 4,644$$

c) Calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver pour un échantillon comportant 2187 individus et 39 espèces

Parcelles écotonnes	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$	Parcelles écotonnes	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Valeriana montana</i>	270	2,431	656,468	<i>Acer pseudoplatanus</i>	18	1,255	22,595
<i>Galium anisophyllum</i>	189	2,276	430,251	<i>Lonicera alpigena</i>	15	1,176	17,641
<i>Sideritis hyssopifolia</i>	119	2,076	246,990	<i>Vaccinium myrtillus</i>	14	1,146	16,046
<i>Rumex scutatus</i>	111	2,045	227,031	<i>Lonicera xylosteum</i>	10	1,000	10,000
<i>Laserpitium siler</i>	101	2,004	202,436	<i>Rosa montana</i>	9	0,954	8,588
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	99	1,996	197,568	<i>Ribes alpinum</i>	9	0,954	8,588
<i>Scabiosa columbaria</i>	97	1,987	192,717	<i>Sorbus aucuparia</i>	5	0,699	3,495
<i>Silene vulgaris</i>	91	1,959	178,273	<i>Salix appendiculata</i>	3	0,477	1,431
<i>Calamagrostis varia</i>	89	1,949	173,496	<i>Cotoneaster integerrimus</i>	3	0,477	1,431
<i>Leucanthemum adustum</i>	78	1,892	147,583	<i>Lonicera nigra</i>	1	0,000	0,000
<i>Lotus corniculatus</i>	77	1,886	145,260	Totaux	2187		4187,741
<i>Thymus praecox</i>	73	1,863	136,023				
<i>Carex sempervirens</i>	68	1,833	124,611			$S =$	39
<i>Sesleria varia</i>	65	1,813	117,839			$\log_2 S =$	5,285
<i>Euphorbia cyparissias</i>	61	1,785	108,905				
<i>Senecio doronicum</i>	53	1,724	91,387				
<i>Helianthemum nummularium</i>	53	1,724	91,387				
<i>Galeopsis angustifolia</i>	49	1,690	82,820				
<i>Cirsium arvense</i>	48	1,681	80,700				
<i>Juniperus communis</i>	46	1,663	76,487				
<i>Amelanchier ovalis</i>	39	1,591	62,052				
<i>Globularia cordifolia</i>	39	1,591	62,052				
<i>Viburnum lantana</i>	37	1,568	58,023				
<i>Sorbus aria</i>	36	1,556	56,027				
<i>Salix caprea</i>	27	1,431	38,647				
<i>Rubus idaeus</i>	23	1,362	31,320				
<i>Corylus avellana</i>	22	1,342	29,533				
<i>Rosa pendulina</i>	20	1,301	26,021				
<i>Alchemilla conjuncta</i>	20	1,301	26,021				

$H = 4,73$

$S = 39$

$\log_2 S = 5,285$

d) Calcul de l'indice de diversité de Shannon-Weaver pour un échantillon comportant 1903 individus et 86 espèces

Station formations périphériques	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$	Station formations périphériques	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Laserpitium siler</i>	101	2,004	202,436	<i>Euphrasia salisburgensis</i>	21	1,322	27,767
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	99	1,996	197,568	<i>Festuca ovina</i>	20	1,301	26,021
<i>Scabiosa columbaria</i>	97	1,987	192,717	<i>Rosa pendulina</i>	20	1,301	26,021
<i>Calamagrostis varia</i>	89	1,949	173,496	<i>Pimpinella saxifraga</i>	20	1,301	26,021
<i>Lotus corniculatus</i>	77	1,886	145,260	<i>Alchemilla conjuncta</i>	20	1,301	26,021
<i>Laserpitium latifolium</i>	75	1,875	140,630	<i>Acer pseudoplatanus</i>	18	1,255	22,595
<i>Globularia nudicaulis</i>	69	1,839	126,881	<i>Teucrium chamaedrys</i>	18	1,255	22,595
<i>Carex sempervirens</i>	68	1,833	124,611	<i>Taraxacum officinale</i>	16	1,204	19,266
<i>Sesleria varia</i>	65	1,813	117,839	<i>Crepis pyrenaica</i>	15	1,176	17,641
<i>Euphorbia cyparissias</i>	61	1,785	108,905	<i>Phyteuma hemisphaericum</i>	15	1,176	17,641
<i>Helianthemum nummularium</i>	53	1,724	91,387	<i>Pinus montana</i>	15	1,176	17,641
<i>Cirsium arvense</i>	48	1,681	80,700	<i>Lonicera alpigena</i>	15	1,176	17,641
<i>Juniperus communis</i>	46	1,663	76,487	<i>Vaccinium myrtillus</i>	14	1,146	16,046
<i>Amelanchier ovalis</i>	39	1,591	62,052	<i>Pimpinella major</i>	14	1,146	16,046
<i>Viburnum lantana</i>	37	1,568	58,023	<i>Thesium alpinum</i>	14	1,146	16,046
<i>Gentiana lutea</i>	37	1,568	58,023	<i>Asperula cynanchica</i>	14	1,146	16,046
<i>Sorbus aria</i>	36	1,556	56,027	<i>Pulsatilla alpina</i>	13	1,114	14,481
<i>Picea abies</i>	35	1,544	54,042	<i>Bromus erectus</i>	12	1,079	12,950
<i>Campanula rotundifolia</i>	33	1,519	50,111	<i>Prenanthes purpurea</i>	11	1,041	11,455
<i>Ranunculus repens</i>	33	1,519	50,111	<i>Lonicera xylosteum</i>	10	1,000	10,000
<i>Seseli libanotis</i>	32	1,505	48,165	<i>Rosa montana</i>	9	0,954	8,588
<i>Geranium robertianum</i>	30	1,477	44,314	<i>Vicia cracca</i>	9	0,954	8,588
<i>Fagus sylvatica</i>	29	1,462	42,410	<i>Ribes alpinum</i>	9	0,954	8,588
<i>Salix caprea</i>	27	1,431	38,647	<i>Rhinanthus alectorophus</i>	8	0,903	7,225
<i>Gentiana angustifolia</i>	27	1,431	38,647	<i>Serratula alpina</i>	8	0,903	7,225
<i>Hypericum maculatum</i>	26	1,415	36,789	<i>Dianthus monspessulanus</i>	7	0,845	5,916
<i>Epipactis atrorubens</i>	24	1,380	33,125	<i>Euphorbia amygdaloides</i>	7	0,845	5,916
<i>Rubus idaeus</i>	23	1,362	31,320	<i>Carlina acaulis</i>	7	0,845	5,916
<i>Corylus avellana</i>	22	1,342	29,533				

Station formations périphériques	N_i	$\log N_i$	$N_i \log N_i$
<i>Anthyllis montana</i>	6	0,778	4,669
<i>Dactylis glomerata</i>	6	0,778	4,669
<i>Geranium sylvaticum</i>	6	0,778	4,669
<i>Astrantia major</i>	6	0,778	4,669
<i>Knautia arvensis</i>	6	0,778	4,669
<i>Pimpinella minor</i>	5	0,699	3,495
<i>Sorbus aucuparia</i>	5	0,699	3,495
<i>Polygonatum odoratum</i>	4	0,602	2,408
<i>Rhododendron ferrugineum</i>	3	0,477	1,431
<i>Hieracium pilosella</i>	3	0,477	1,431
<i>Centaurea montana</i>	3	0,477	1,431
<i>Carex flacca</i>	3	0,477	1,431
<i>Abies alba</i>	3	0,477	1,431
<i>Anthyllis vulneraria</i>	3	0,477	1,431
<i>Salix appendiculata</i>	3	0,477	1,431
<i>Cotoneaster integerrimus</i>	3	0,477	1,431
<i>Salix retusa</i>	2	0,301	0,602
<i>Lamium purpureum</i>	2	0,301	0,602
<i>Trifolium badium</i>	2	0,301	0,602
<i>Polygala chamaebuxus</i>	2	0,301	0,602
<i>Cephalanthera longifolia</i>	2	0,301	0,602
<i>Coronilla vaginalis</i>	1	0,000	0,000
<i>Aconitum vulparia</i>	1	0,000	0,000
<i>Primula acaulis</i>	1	0,000	0,000
<i>Hieracium vulgare</i>	1	0,000	0,000
<i>Briza media</i>	1	0,000	0,000
<i>Lamiastrum galeobdolon</i>	1	0,000	0,000
<i>Lonicera nigra</i>	1	0,000	0,000
<i>Daphne mezereum</i>	1	0,000	0,000
Totaux	1903		2995,359
	$S =$		86
	$\log_2 S =$		6,426

 $H = 5,66$

3) Indices de Hill

a) Diversité alpha

LA PLAGNE	H	e^H
Ecocomplexe (collection complète)	5,83	340,36
Station éboulis ss	3,83	46,06
Station formations périphériques	5,39	219,20
Parcelles écotones	4,59	98,49

AULP DU SEUIL	H	e^H
Ecocomplexe (collection complète)	5,21	183,09
Station éboulis ss	3,31	27,39
Station formations périphériques	4,74	114,43
Parcelles écotones	4,43	83,93

PELLOUX	H	e^H
Ecocomplexe (collection complète)	5,44	230,44
Station éboulis ss	3,38	29,37
Station formations périphériques	5,01	149,90
Parcelles écotones	4,5	90,02

GRAND SOM	H	e^H
Ecocomplexe (collection complète)	5,57	262,43
Station éboulis ss	3,76	42,95
Station formations périphériques	5,09	162,39
Parcelles écotones	4,24	69,41

GRANDE SURE	H	e^H
Ecocomplexe (collection complète)	4,92	137,00
Station éboulis ss	3,12	22,65
Station formations périphériques	4,33	75,94
Parcelles écotones	3,71	40,85

b) Diversité gamma

Ensemble des sites	H	e^H
Ecocomplexes (collection complète)	6,02	411,57
Stations éboulis ss	4	54,59
Stations formations périphériques	5,66	287,14
Parcelles écotones	4,73	113,29

c) Diversité bêta

$D_{Hi,1}$	La Plagne	Aulp du Seuil	Pelloux	Grand Som	Grande Sure
Ecocomplexe (collection complète)	1,21	2,25	1,79	1,57	3,00
Station éboulis ss	1,19	1,99	1,86	1,27	2,41
Station formations périphériques	1,31	2,51	1,92	1,77	3,78
Parcelles écotones	1,15	1,35	1,26	1,63	2,77

4) Indice de Dice (diversité spécifique bêta)

a) Matrices de similarité

Matrice de similarité (Ecocomplexes, collections complètes)					
D_{ij}	La Plagne	Aulp du Seuil	Pelloux	Grand Som	Grande Sure
La Plagne	1				
Aulp du Seuil	0,69	1			
Pelloux	0,64	0,69	1		
Grand Som	0,8	0,59	0,52	1	
Grande Sure	0,53	0,51	0,39	0,61	1

Matrice de similarité (Stations éboulis ss)					
D_{ij}	La Plagne	Aulp du Seuil	Pelloux	Grand Som	Grande Sure
La Plagne	1				
Aulp du Seuil	0,78	1			
Pelloux	0,75	0,83	1		
Grand Som	0,88	0,75	0,76	1	
Grande Sure	0,58	0,44	0,46	0,62	1

Matrice de similarité (Stations formations périphériques)					
Indice de Dice D_{ij}	La Plagne	Aulp du Seuil	Pelloux	Grand Som	Grande Sure
La Plagne	1				
Aulp du Seuil	0,7	1			
Pelloux	0,62	0,69	1		
Grand Som	0,79	0,55	0,48	1	
Grande Sure	0,52	0,48	0,35	0,6	1

Matrice de similarité (Parcelles écotones)					
D_{ij}	La Plagne	Aulp du Seuil	Pelloux	Grand Som	Grande Sure
La Plagne	1				
Aulp du Seuil	0,9	1			
Pelloux	0,86	0,82	1		
Grand Som	0,83	0,73	0,73	1	
Grande Sure	0,62	0,59	0,56	0,74	1

b) Valeurs a, b et c

Ecocomplexes (collections complètes)

a	La Plagne	Aulp du Seuil	Pelloux	Grand Som	Grande Sure
La Plagne	0	53	51	66	33
Aulp du Seuil	53	0	46	41	26
Pelloux	51	46	0	38	21
Grand Som	66	41	38	0	35
Grande Sure	33	26	21	35	0

b	La Plagne	Aulp du Seuil	Pelloux	Grand Som	Grande Sure
La Plagne	0	35	39	22	53
Aulp du Seuil	35	0	19	23	37
Pelloux	39	19	0	30	47
Grand Som	22	23	30	0	41
Grande Sure	53	37	47	41	0

c	La Plagne	Aulp du Seuil	Pelloux	Grand Som	Grande Sure
La Plagne	0	11	17	12	7
Aulp du Seuil	11	0	22	36	14
Pelloux	17	22	0	40	19
Grand Som	12	36	40	0	5
Grande Sure	7	14	19	5	0

Station éboulis ss

a	La Plagne	Aulp du Seuil	Pelloux	Grand Som	Grande Sure
La Plagne	0	14	13	17	9
Aulp du Seuil	14	0	13	13	6
Pelloux	13	13	0	13	6
Grand Som	17	13	13	0	9
Grande Sure	9	6	6	9	0

b	La Plagne	Aulp du Seuil	Pelloux	Grand Som	Grande Sure
La Plagne	0	6	7	3	11
Aulp du Seuil		0	3	3	10
Pelloux	7	3	0	2	9
Grand Som	3	3	2	0	9
Grande Sure	11	10	9	9	0

c	La Plagne	Aulp du Seuil	Pelloux	Grand Som	Grande Sure
La Plagne	0	2	2	2	2
Aulp du Seuil	2	0	2	6	5
Pelloux	2	2	0	6	5
Grand Som	2	6	6	0	2
Grande Sure	2	5	5	2	0

Station formations périphériques

a	La Plagne	Aulp du Seuil	Pelloux	Grand Som	Grande Sure
La Plagne	0	38	34	45	23
Aulp du Seuil	38	0	32	27	18
Pelloux	34	32	0	24	13
Grand Som	45	27	24	0	24
Grande Sure	23	18	13	24	0

b	La Plagne	Aulp du Seuil	Pelloux	Grand Som	Grande Sure
La Plagne	0	23	26	16	38
Aulp du Seuil	23	0	15	20	29
Pelloux	26	15	0	25	35
Grand Som	16	20	25	0	28
Grande Sure	38	29	35	28	0

c	La Plagne	Aulp du Seuil	Pelloux	Grand Som	Grande Sure
La Plagne	0	9	14	7	4
Aulp du Seuil	9	0	15	24	9
Pelloux	14	15	0	28	13
Grand Som	7	24	28	0	3
Grande Sure	4	9	13	3	0

Parcelles écotones

a	La Plagne	Aulp du Seuil	Pelloux	Grand Som	Grande Sure
La Plagne	0	35	31	28	18
Aulp du Seuil	35	0	28	24	16
Pelloux	31	28	0	22	14
Grand Som	28	24	22	0	17
Grande Sure	18	16	14	17	0

b	La Plagne	Aulp du Seuil	Pelloux	Grand Som	Grande Sure
La Plagne	0	5	9	12	22
Aulp du Seuil	5	0	9	13	21
Pelloux	9	9	0	10	18
Grand Som	12	13	10	0	11
Grande Sure	22	21	18	11	0

c	La Plagne	Aulp du Seuil	Pelloux	Grand Som	Grande Sure
La Plagne	0	2	1	0	0
Aulp du Seuil	2	0	4	4	2
Pelloux	1	4	0	6	4
Grand Som	0	4	6	0	1
Grande Sure	0	2	4	1	0

ANNEXE P

Richesse globale, fond commun d'espèces et coefficient de rareté

Richesse globale : Eco-complexe de La Plagne

Acer pseudoplatanus
Calamagrostis varia (Schrader) Host
Alchemilla conjuncta
Amelanchier ovalis Medicus
Anthyllis vulneraria L.
Arctostaphylos uva-ursi L. Sprengel
Asperula cynanchica L.
Asplenium viride Hudsor
***Campanula cochlearifolia* Lam.**
Campanula rotundifolia L.
Carex sempervirens Villars
Carlina acaulis forma nana (Degen) Meusel et Werner
***Centranthus angustifolius* (Mill.) DC**
Cirsium arvense (L.) Scopoli
Clinopodium vulgare L.
Convallaria majalis L.
Coronilla vaginalis Lam.
Corylus avellana L.
Cotoneaster integerrimus (Medicus)
Crepis pyrenaica (L.) Greuter
Dactylis glomerata L.
Dianthus monspessulanus L.
Epipactis atrorubens (Hoffman) Besser
Euphorbia amygdaloides L.
Euphorbia cyparissias L.
Euphrasia salisburgensis Hoppe
Fagus sylvatica L.
Festuca ovina L.
***Galeopsis angustifolia* Hoffmann**
Galium anisophyllum Villars
Gentiana verna L.
Gentiana lutea L.
Gentiana angustifolia
Geranium robertianum L.
***Globularia cordifolia* L.**
Globularia nudicaulis L.
***Gymnocarpium dryopteris* L. Newman**
Helianthemum nummularium L. Miller
Helleborus foetidus L.
Hieracium murorum L.
Hypericum maculatum Crantz s.l.
***Hypericum nummularium* L.**
Juniperus communis L.
Lahtyrus heterophyllus L.
Laserpitium latifolium L.
Laserpitium silei L.
***Leucanthemum adustum* (Koch) Gremler**
***Linaria alpina* L.**
Lonicera alpigena L.
Lonicera nigra L.
Lotus alpinus (DC.) Ramond
Lotus corniculatus L.
***Petasites paradoxus* (Retzius) Baumgartner**
Peucedanum ostruthium (L.) Koch
Picea abies (L.) Karster
Pimpinella major L. (Hudsor)
Pinus uncinata Miller
***Poa cenisia* Allioni**
Phyteuma hemisphaericum L.
Polygonatum odoratum (Miller) Druce
Prenanthes purpurea L.
Primula acaulis (L.) L.
***Pritzelago alpina* L.**
Pulsatilla alpina (L.) Delarbre
Ranunculus repens L.
***Rhamnus alpina* L.**
Rosa montana Chaix
Rosa pendulina L.
Rubus idaeus L.
***Rumex scutatus* L.**
Salix caprea L.
Scabiosa columbaria
***Scrophularia juratensis* schleicher**
***Sedum album* L.**
***Senecio doronicum* (L.) L.**

Seseli libanotis (L.) Kock
Sesleria varia (Jacquier) Wettstein
Sideritis hyssopifolia
***Silene vulgaris* (Jordan) Marsden - Jones et Turill**
Sorbus aria L. Crantz
Sorbus aucuparia L.
Taraxacum officinale Weber
Teucrium chamaedrys L.
Thesium alpinum L.
***Thymus praecox* L. Borbas**
Trifolium badium Schreber
Vaccinium myrtillus L.
***Valeriana montana* L.**
Viburnum lantana L.

Richesse globale : EcoComplexe de l'Aulp du Seuil

Calamagrostis Varia (Schrader) Host
Alchemilla conjuncta
Amelanchier ovalis Medicus
Anthriscus sylvestris (L.) Hoffman
Anthyllis vulneraria L.
Arctostaphylos uva-ursi L. Sprengel
***Campanula cochlearifolia* Lam.**
Campanula rotundifolia L.
Carex sempervirens Villars
Carlina acaulis forma nana (Degen) Meusel et Werner
***Centranthus angustifolius* (Mill.) DC**
Cephalanthera longifolia (L.) Fritsch
Cirsium arvense (L.) Scopoli
Corylus avellana L.
Cotoneaster integerrimus (Medicus)
Daphne mezereum L.
Epipactis atrorubens (Hoffman) Besser
***Erinus alpinus* L.**
Euphorbia cyparissias L.
Euphrasia salisburgensis Hoppe
Fagus sylvatica L.
***Galeopsis angustifolia* Hoffmann**
Galium anisophyllum Villars
Gentiana verna L.
Gentiana lutea L.
Gentiana angustifolia
***Globularia cordifolia* L.**
Globularia nudicaulis L.
Helianthemum nummularium L. Miller
Hypericum maculatum Crantz s.l.
***Hypericum nummularium* L.**
Juniperus communis L.
Laserpitium latifolium L.
Laserpitium siler L.
***Leucanthemum adustum* (Koch) Gremli**
***Linaria alpina* L.**
Lonicera alpigena L.
Lonicera xylosteum L.
Lotus corniculatus L.
Peucedanum ostruthium (L.) Koch
Picea abies (L.) Karster
Pimpinella saxifraga L.
Pinus uncinata Miller
Polygala chamaebuxus L.
Prenanthes purpurea L.
***Rhamnus alpina* L.**
Rhinantus alectorolophus (Scopo) Pollich
Rosa montana Chaix
Rosa pendulina L.
***Rumex scutatus* L.**
Salix appendiculata Villars
Salix caprea L.
Scabiosa columbaria
***Sedum album* L.**
Serratula tinctoria L.
Seseli libanotis (L.) Kock
Sesleria varia (Jacquier) Wettstein
Sideritis hyssopifolia
***Silene vulgaris* (Jordan) Marsden - Jones et Turill**
Sorbus aria L. Crantz
Sorbus aucuparia L.
***Teucrium montanum* L.**
***Thymus praecox* L. Borbas**
***Valeriana montana* L.**
Viburnum lantana L.

Richesse globale : EcoComplexe des Pelloux

Acer pseudoplatanus
Calamagrostis Varia (Schrader) Host
Aconitum vulparia
Amelanchier ovalis Medicus
Anthriscus sylvestris (L.) Hoffman
Arctostaphylos uva-ursi L. Sprengel
Asplenium viride Hudsor
Briza media L.
Bromus erectus L.
Carex flacca Schreber
Carex sempervirens Villars
Carlina acaulis forma nana (Degen) Meusel et Werner
***Centranthus angustifolius* (Mill.) DC**
Cirsium arvense (L.) Scopoli
Epipactis atrorubens (Hoffman) Besser
***Erinus alpinus* L.**
Euphorbia cyparissias L.
Euphrasia salisburgensis Hoppe
Fagus sylvatica L.
Festuca ovina L.
***Galeopsis angustifolia* Hoffmann**
Galium anisophyllum Villars
Gentiana lutea L.
Gentiana angustifolia
Geranium robertianum L.
***Globularia cordifolia* L.**
Globularia nudicaulis L.
Helianthemum nummularium L. Miller
Helleborus foetidus L.
Hieracium umbellatum L.
Hieracium vulgatum
Juniperus communis L.
Knautia arvensis L. Coulter
Lamium galeobdolon L.
Lamium purpureum L.
Laserpitium latifolium L.
Laserpitium siler L.
***Leucanthemum adustum* (Koch) Greml**
***Linaria alpina* L.**
Lonicera alpigena L.
Lonicera nigra L.
Lotus corniculatus L.
Picea abies (L.) Karster
Pimpinella saxifraga L.
Pinus uncinata Miller
***Poa cenisia* Alliori**
Prenanthes purpurea L.
Rhinantus alectorolophus (Scopo) Pollich
Ribes alpinum L.
Rosa montana Chaix
Rosa pendulina L.
Rubus idaeus L.
***Rumex scutatus* L.**
Salix caprea L.
Saxifraga rotundifolia L.
Scabiosa columbaria
***Scrophularia juratensis* schleicher**
***Sedum album* L.**
Sesleria varia (Jacquier) Wettstein
Sideritis hyssopifolia
***Silene vulgaris* (Jordan) Marsden - Jones et Turill**
Sorbus aria L. Crantz
Sorbus aucuparia L.
Taraxacum officinale Weber
Teucrium chamaedrys L.
***Teucrium montanum* L.**
***Thymus praecox* L. Borbas**
***Valeriana montana* L.**
Viburnum lantana L.
Vicia cracca L.

Richesse globale : EcoComplexe du Grand Som

Acer pseudoplatanus
Aconitum vulparia
Alchemilla conjuncta
Anthyllis montana L.
Arctostaphylos uva-ursi L. Sprengel
Asperula cynanchica L.
***Campanula cochlearifolia* Lam.**
Campanula rotundifolia L.
Carex sempervirens Villars
Carlina acaulis forma nana (Degen) Meusel et Werner
Centaurea montana L.
***Centranthus angustifolius* (Mill.) DC**
Cirsium arvense (L.) Scopoli
Clinopodium vulgare L.
Convallaria majalis L.
Corylus avellana L.
Crepis pyrenaica (L.) Greuter
Dactylis glomerata L.
Dianthus monspessulanus L.
Epilobium montanum L.
Epipactis atrorubens (Hoffman) Besser
***Erinus alpinus* L.**
Euphorbia amygdaloides L.
Euphorbia cyparissias L.
Euphrasia salisburgensis Hoppe
Fagus sylvatica L.
***Galeopsis angustifolia* Hoffmann**
Galium anisophyllum Villars
Gentiana verna L.
Gentiana lutea L.
Gentiana angustifolia
Geranium robertianum L.
***Globularia cordifolia* L.**
Globularia nudicaulis L.
Helianthemum nummularium L. Miller
Hieracium murorum L.
Hypericum maculatum Crantz s.l.
***Hypericum nummularium* L.**
Lathyrus heterophyllus L.
Laserpitium latifolium L.
Laserpitium siler L.
***Leucanthemum adustum* (Koch) Greml**
***Linaria alpina* L.**
Lotus alpinus (DC.) Ramond
Lotus corniculatus L.
***Petasites paradoxus* (Retzius) Baumgartner**
Peucedanum ostruthium (L.) Koch
Phleum pratense L.
Picea abies (L.) Karster
Pimpinella major L. (Hudsor)
***Poa cenisia* Alliori**
Phyteuma betonocifolium Vill. = *P. scaposum* R. Schultz
Phyteuma hemisphaericum L.
Prenanthes purpurea L.
Primula acaulis (L.) L.
***Pritzelago alpina* L.**
Pulsatilla alpina (L.) Delarbre
Ranunculus repens L.
Rhododendron ferrugineum L.
Rubus idaeus L.
***Rumex scutatus* L.**
Scabiosa columbaria
***Scrophularia juratensis* schleicher**
***Senecio doronicum* (L.) L.**
Serratula tinctoria L.
Seseli libanotis (L.) Kock
Sesleria varia (Jacquier) Wettstein
Sideritis hyssopifolia
***Silene vulgaris* (Jordan) Marsden - Jones et Turill**
Sorbus aria L. Crantz
Stachys alopecuroides (L.) Benth
Taraxacum officinale Weber
Teucrium chamaedrys L.
***Thalictrum minus* L.**
Thesium alpinum L.

***Thymus praecox* L. Borbas**
Trifolium badium Schreber
***Valeriana montana* L.**

Richesse globale : EcoComplexe de la Grande Sure

Alchemilla conjuncta

***Allium narcissiflorum* Vill.**

Anthyllis montana L.

***Campanula cochlearifolia* Lam.**

Campanula rotundifolia L.

Carex sempervirens Villars

Carlina acaulis forma nana (Degen) Meusel et Werner

Centaurea montana L.

Cirsium arvense (L.) Scopoli

Crepis pyrenaica (L.) Greuter

Dactylis glomerata L.

Galium anisophyllum Villars

Gentiana verna L.

Gentiana angustifolia

Globularia nudicaulis L.

Helianthemum nummularium L. Miller

Hypericum maculatum Crantz s.l.

Juniperus communis L.

***Leucanthemum adustum* (Koch) Greml**

Lotus corniculatus L.

***Petasites paradoxus* (Retzius) Baumgartner**

Peucedanum ostruthium (L.) Koch

Picea abies (L.) Karster

Pinus uncinata Miller

***Poa cenisia* Alliori**

Pulsatilla alpina (L.) Delarbre

Rhododendron ferrugineum L.

Rubus idaeus L.

***Rumex scutatus* L.**

Salix retusa

Scabiosa columbaria

***Senecio doronicum* (L.) L.**

Serratula tinctoria L.

Seseli libanotis (L.) Kock

Sesleria varia (Jacquier) Wettstein

Sideritis hyssopifolia

Taraxacum officinale Weber

***Thymus praecox* L. Borbas**

Trifolium badium Schreber

***Valeriana montana* L.**

Fond commun d'espèces et richesse originale

	La Plagne	Aulp du Seuil	Pelloux	Grand Som	Grande Sure	Total
<i>Acer pseudoplatanus</i>	1		1	1		3
<i>Calamagrostis Varia</i> (Schrader) Host	1	1	1			3
<i>Aconitum vulparia</i>			1			1
<i>Alchemilla conjuncta</i>	1	1		1	1	4
Allium narcissiflorum Vill.					1	1
<i>Amelanchier ovalis</i> Medicus	1	1	1			3
<i>Anthriscus sylvestris</i> (L.) Hoffman		1	1			2
<i>Anthyllis montana</i> L.				1	1	2
<i>Anthyllis vulneraria</i> L.	1	1				2
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i> L. Sprengel	1	1	1	1		4
<i>Asperula cynanchica</i> L.	1			1		2
<i>Asplenium viride</i> Hudson	1		1			2
<i>Briza media</i> L.			1			1
<i>Bromus erectus</i> L.			1			1
Campanula cochlearifolia Lam.	1	1		1	1	4
<i>Campanula rotundifolia</i> L.	1	1		1	1	4
<i>Carex flacca</i> Schreber			1			1
<i>Carex sempervirens</i> Villars	1	1	1	1	1	5
<i>Carlina acaulis forma nana</i> (Degen) Meusel et Werner	1	1	1	1	1	5
<i>Centaurea montana</i> L.				1	1	2
Centranthus angustifolius (Mill.) DC	1	1	1	1		4
<i>Cephalanthera longifolia</i> (L.) Fritsch			1			1
<i>Cirsium arvense</i> (L.) Scopoli	1	1	1	1	1	5
<i>Clinopodium vulgare</i> L.	1			1		2
<i>Convallaria majalis</i> L.	1					1
<i>Coronilla vaginalis</i> Lam.	1					1
<i>Corylus avellana</i> L.	1	1		1		3
<i>Cotoneaster integerrimus</i> (Medicus)	1	1				2
<i>Crepis pyrenaica</i> (L.) Greuter	1			1	1	3
<i>Dactylis glomerata</i> L.	1			1	1	3
<i>Daphne mezereum</i> L.		1				1
<i>Dianthus monspessulanus</i> L.	1			1		2
<i>Epilobium montanum</i> L.				1		1
<i>Epipactis atrorubens</i> (Hoffman) Besser	1	1	1	1		4
Erinus alpinus L.		1	1	1		3
<i>Euphorbia amygdaloides</i> L.	1			1		2
<i>Euphorbia cyparissias</i> L.	1	1	1	1		4
<i>Euphrasia salisburgensis</i> Hoppe	1	1	1	1		4
<i>Fagus sylvatica</i> L.	1	1	1	1		4
<i>Festuca ovina</i> L.	1		1			2
Galeopsis angustifolia Hoffmann	1	1	1	1		4
<i>Galium anisophyllum</i> Villars	1	1	1	1	1	5
<i>Gentiana verna</i> L.	1	1		1	1	4
<i>Gentiana lutea</i> L.	1	1	1	1		4
<i>Gentiana angustifolia</i>	1	1	1	1	1	5
<i>Geranium robertianum</i> L.	1		1	1		3
<i>Geranium sylvaticum</i> L.					1	1
Globularia cordifolia L.	1	1	1	1		4
<i>Globularia nudicaulis</i> L.	1	1	1	1	1	5
Gymnocarpium dryopteris L. Newman	1					1
<i>Helianthemum nummularium</i> L. Miller	1	1	1	1	1	5
<i>Helleborus foetidus</i> L.	1		1			2
<i>Hieracium murorum</i> L.	1			1		2
<i>Hieracium pilosella</i> L.				1		1
<i>Hieracium umbellatum</i> L.			1			1
<i>Hieracium vulgatum</i>			1			1
<i>Hypericum maculatum</i> Crantz s.l.	1	1		1	1	4
Hypericum nummularium L.	1	1		1		3
<i>Juniperus communis</i> L.	1	1	1		1	4
<i>Knautia arvensis</i> L. Coulter			1			1
<i>Lathyrus heterophyllus</i> L.	1			1		2
<i>Lamium galeobdolon</i> L.			1			1
<i>Lamium purpureum</i> L.			1			1
<i>Laserpitium latifolium</i> L.	1	1	1	1		4
<i>Laserpitium siler</i> L.	1	1	1	1		4
Leucanthemum adustum (Koch) Grelli	1	1	1	1	1	5
Linaria alpina L.	1	1	1	1		4
<i>Lonicera alpigena</i> L.	1	1	1			3
<i>Lonicera nigra</i> L.	1		1			2
<i>Lonicera xylosteum</i> L.		1				1
<i>Lotus alpinus</i> (DC.) Ramond	1			1		2
<i>Lotus corniculatus</i> L.	1	1	1	1	1	5
Petasites paradoxus (Retzius) Baumgartner	1			1	1	3
<i>Peucedanum ostruthium</i> (L.) Koch	1	1		1	1	4

	La Plagne	Aulp du Seuil	Pelloux	Grand Som	Grande Sure	Total
<i>Phleum pratense</i> L.				1		1
<i>Picea abies</i> (L.) Karster	1	1	1	1	1	5
<i>Pimpinella major</i> L. (Hudsor)	1			1		2
<i>Pimpinella saxifraga</i> L.		1	1			2
<i>Pinus uncinata</i> Miller	1	1	1		1	4
Poa cenisia Alliori	1		1	1	1	4
<i>Phyteuma betonocifolium</i> Vill. = <i>P. scaposum</i> R. Schultz				1		1
<i>Phyteuma hemisphaericum</i> L.	1			1		2
<i>Polygala chamaebuxus</i> L.		1				1
<i>Polygonatum odoratum</i> (Miller) Druce	1					1
<i>Prenanthes purpurea</i> L.	1	1	1	1		4
<i>Primula acaulis</i> (L.) L.	1			1		2
Pritzelago alpina L.	1			1		2
<i>Pulsatilla alpina</i> (L.) Delarbre	1			1	1	3
<i>Ranunculus repens</i> .L	1			1		2
Rhamnus alpina L.	1	1				2
<i>Rhinantus alectorolophus</i> (Scopo) Pollich		1	1			2
<i>Rhododendron ferrugineum</i> L.				1	1	2
<i>Ribes alpinum</i> L.			1			1
<i>Rosa montana</i> Chaix	1	1	1			3
<i>Rosa pendulina</i> L.	1	1				2
<i>Rubus idaeus</i> L.	1		1	1	1	4
<i>Rumex acetosa</i> L.				1		1
Rumex scutatus L.	1	1	1	1	1	5
<i>Salix appendiculata</i> Villars		1				1
<i>Salix caprea</i> L.	1	1	1			3
Salix retusa					1	1
<i>Saxifraga rotundifolia</i> L.			1			1
<i>Scabiosa columbaria</i>	1	1	1	1	1	5
Scrophularia juratensis schleicher	1		1	1		3
Sedum album L.	1	1	1			3
Senecio doronicum (L.) L.	1			1	1	3
<i>Serratula tinctoria</i> L.		1		1	1	3
<i>Seseli libanotis</i> (L.) Kock	1	1		1	1	4
<i>Sesleria varia</i> (Jacquier) Wettstein	1	1	1	1	1	5
Sideritis hyssopifolia	1	1	1	1	1	5
Silene vulgaris (Jordan) Marsden - Jones et Turill	1	1	1	1		4
<i>Sorbus aria</i> L. Crantz	1	1	1	1		4
<i>Sorbus aucuparia</i> L.	1	1	1			3
<i>Stachys alopecuroides</i> (L.) Benth				1		1
<i>Taraxacum officinale</i> Weber	1		1	1	1	4
<i>Teucrium chamaedrys</i> L.	1			1		2
Teucrium montanum L.		1	1			2
Thalictrum minus L.				1		1
<i>Thesium alpinum</i> L.	1			1		2
Thymus praecox L. Borbas	1	1	1	1	1	5
<i>Trifolium badium</i> Schreber	1			1	1	3
<i>Vaccinium myrtillus</i> L.	1					1
Valeriana montana L.	1	1	1	1	1	5
<i>Viburnum lantana</i> L.	1	1	1			3
<i>Vicia cracca</i> L.			1			1

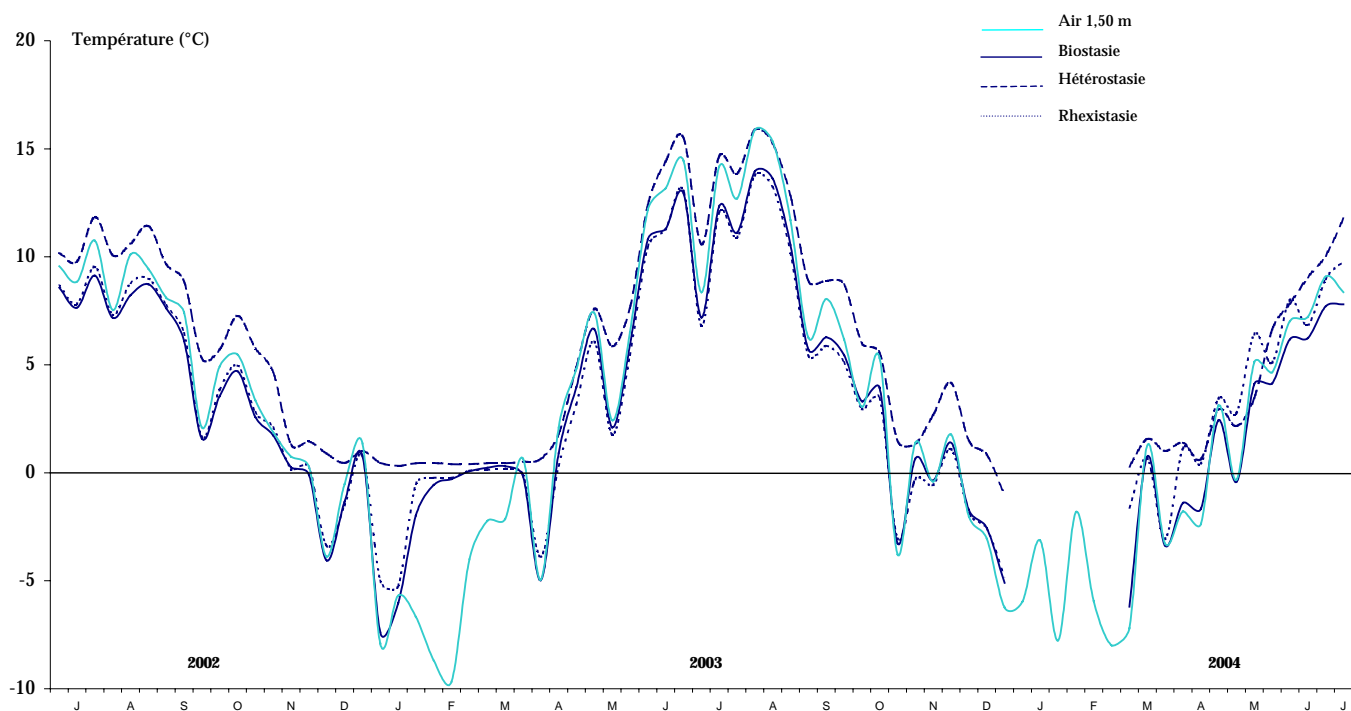
Coefficients de rareté

Taxon	Présence par relevé	Coefficient de rareté	Taxon	Présence par relevé	Coefficient de rareté
<i>Valeriana montana</i>	270	0,34	<i>Rosa montana</i>	9	0,97
<i>Galium anisophyllum</i>	189	0,54	<i>Vicia cracca</i>	9	0,97
<i>Sideritis hyssopifolia</i>	119	0,71	<i>Ribes alpinum</i>	9	0,97
<i>Centranthus angustifolius</i>	111	0,72	<i>Rhinanthus alectorophus</i>	8	0,98
<i>Rumex scutatus</i>	111	0,72	<i>Phegopteris cornectilis</i>	8	0,98
<i>Laserpitium silei</i>	101	0,75	<i>Hypericum nummularium</i>	8	0,98
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	99	0,75	<i>Serratula alpina</i>	8	0,98
<i>Scabiosa columbaria</i>	97	0,76	<i>Dianthus monspessulanus</i>	7	0,98
<i>Silene vulgaris</i>	91	0,77	<i>Campanula cochlearifolia</i>	7	0,98
<i>Calamagrostis varia</i>	89	0,78	<i>Euphorbia amygdaloides</i>	7	0,98
<i>Leucanthemum adustum</i>	78	0,81	<i>Carlina acaulis</i>	7	0,98
<i>Lotus corniculatus</i>	77	0,81	<i>Allium narcissiflorum</i>	6	0,98
<i>Rhamnus alpina</i>	75	0,81	<i>Anthyllis montana</i>	6	0,98
<i>Laserpitium latifolium</i>	75	0,81	<i>Dactylis glomerata</i>	6	0,98
<i>Thymus praecox</i>	73	0,82	<i>Geranium sylvaticum</i>	6	0,98
<i>Globularia vulgaris</i>	69	0,83	<i>Astrantia major</i>	6	0,98
<i>Carex sempervirens</i>	68	0,83	<i>Stachys alopecuroides</i>	6	0,98
<i>Sesleria varia</i>	65	0,84	<i>Knautia arvensis</i>	6	0,98
<i>Euphorbia cyparissias</i>	61	0,85	<i>Teucrium montanum</i>	6	0,98
<i>Helleborus foetidus</i>	54	0,86	<i>Pimpinella minor</i>	5	0,98
<i>Senecio doronicum</i>	53	0,86	<i>Sorbus aucuparia</i>	5	0,98
<i>Helianthemum nummularium</i>	53	0,86	<i>Polygonatum odoratum</i>	4	0,99
<i>Galeopsis angustifolia</i>	49	0,88	<i>Pritzelago alpina</i>	4	0,99
<i>Cirsium arvense</i>	48	0,88	<i>Gymnocarpium dryopteris</i>	4	0,99
<i>Juniperus communis</i>	46	0,88	<i>Epilobium montanum</i>	3	0,99
<i>Amelanchier ovalis</i>	39	0,9	<i>Rhododendron ferrugineum</i>	3	0,99
<i>Petasites paradoxus</i>	39	0,9	<i>Hieracium pilosella</i>	3	0,99
<i>Globularia cordifolia</i>	39	0,9	<i>Centaurea montana</i>	3	0,99
<i>Peucedanum ostruthium</i>	38	0,9	<i>Carex flacca</i>	3	0,99
<i>Viburnum lantana</i>	37	0,9	<i>Abies alba</i>	3	0,99
<i>Gentiana lutea</i>	37	0,9	<i>Anthyllis vulneraria</i>	3	0,99
<i>Sorbus aria</i>	36	0,91	<i>Salix appendiculata</i>	3	0,99
<i>Picea abies</i>	35	0,91	<i>Cotoneaster integerrimus</i>	3	0,99
<i>Campanula rotundifolia</i>	33	0,91	<i>Salix retusa</i>	2	0,99
<i>Ranunculus repens</i>	33	0,91	<i>Lamium purpureum</i>	2	0,99
<i>Seseli libanotis</i>	32	0,92	<i>Trifolium badium</i>	2	0,99
<i>Scrophularia juratensis</i>	32	0,92	<i>Asplenium viride</i>	2	0,99
<i>Poa cenisia</i>	31	0,92	<i>Saxifraga paniculata</i>	2	0,99
<i>Geranium robertianum</i>	30	0,92	<i>Polygala chamaebuxus</i>	2	0,99
<i>Fagus sylvatica</i>	29	0,92	<i>Cephalanthera longifolia</i>	2	0,99
<i>Salix caprea</i>	27	0,93	<i>Bartsia alpina</i>	2	0,99
<i>Gentiana angustifolia</i>	27	0,93	<i>Lathyrus heterophyllus</i>	2	0,99
<i>Gymnocarpium dryopteris</i>	26	0,93	<i>Coronilla vaginalis</i>	1	1
<i>Hypericum maculatum</i>	26	0,93	<i>Aconitum vulparia</i>	1	1
<i>Epipactis atrorubens</i>	24	0,94	<i>Primula acaulis</i>	1	1
<i>Rubus idaeus</i>	23	0,94	<i>Hieracium vulgare</i>	1	1
<i>Corylus avellana</i>	22	0,94	<i>Briza media</i>	1	1
<i>Euphrasia salisburgensis</i>	21	0,94	<i>Lamium galeobdolon</i>	1	1
<i>Festuca ovina</i>	20	0,95	<i>Lonicera nigra</i>	1	1
<i>Rosa pendulina</i>	20	0,95	<i>Daphne mezereum</i>	1	1
<i>Thalictrum minus</i>	20	0,95	<i>Polystichum lonchitis</i>	1	1
<i>Pimpinella saxifraga</i>	20	0,95	<i>Hieracium umbellatum</i>	1	1
<i>Alchemilla conjuncta</i>	20	0,95			
<i>Acer pseudoplatanus</i>	18	0,95			
<i>Teucrium chamaedrys</i>	18	0,95			
<i>Sedum album</i>	16	0,96			
<i>Taraxacum officinale</i>	16	0,96			
<i>Crepis pyrenaica</i>	15	0,96			
<i>Hieracium murorum</i>	15	0,96			
<i>Phyteuma hemisphaericum</i>	15	0,96			
<i>Pinus montana</i>	15	0,96			
<i>Lonicera alpigena</i>	15	0,96			
<i>Vaccinium myrtillus</i>	14	0,96			
<i>Pimpinella major</i>	14	0,96			
<i>Thesium alpinum</i>	14	0,96			
<i>Asperula cynanchica</i>	14	0,96			
<i>Pulsatilla alpina</i>	13	0,96			
<i>Linaria alpina</i>	13	0,96			
<i>Erinus alpinus</i>	12	0,97			
<i>Bromus erectus</i>	12	0,97			
<i>Lotus alpinus</i>	11	0,97			
<i>Prenanthes purpurea</i>	11	0,97			
<i>Convallaria majalis</i>	10	0,97			
<i>Lonicera xylosteum</i>	10	0,97			

ANNEXE Q

**Détails des régimes thermiques : températures moyennes,
minimales et maximales décadaires.**

**Figure 1 : Régime thermique de l'air à 20 cm (gradient biorhexistatique) (juillet 2002-juillet 2004).
Températures minimales décadaires, tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).**



**Figure 2 : Régime thermique de l'air à 20 cm (gradient biorhexistatique) (juillet 2002-juillet 2004).
Températures maximales décadaires, tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).**

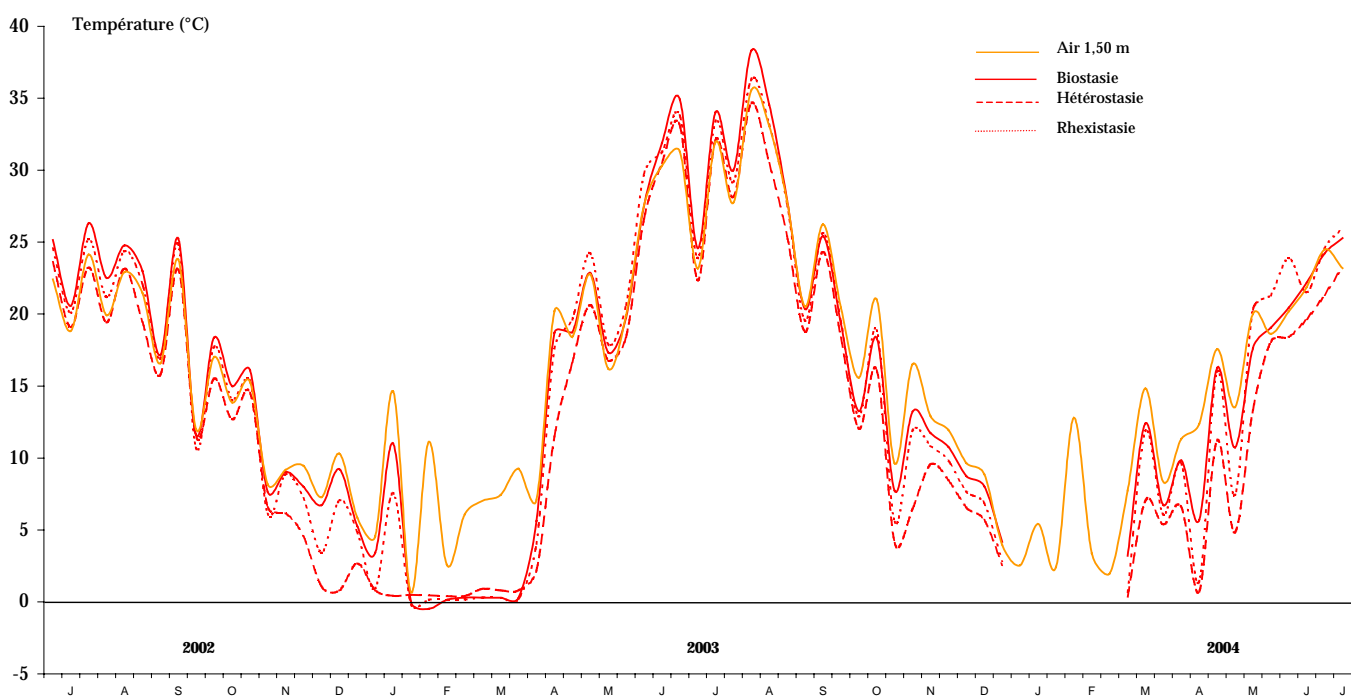


Figure 3 : Régime thermique en zone biostasique (juillet 2002-juillet 2004).
Températures de l'air (20 cm) maximale, minimale et moyenne décadaires, tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).

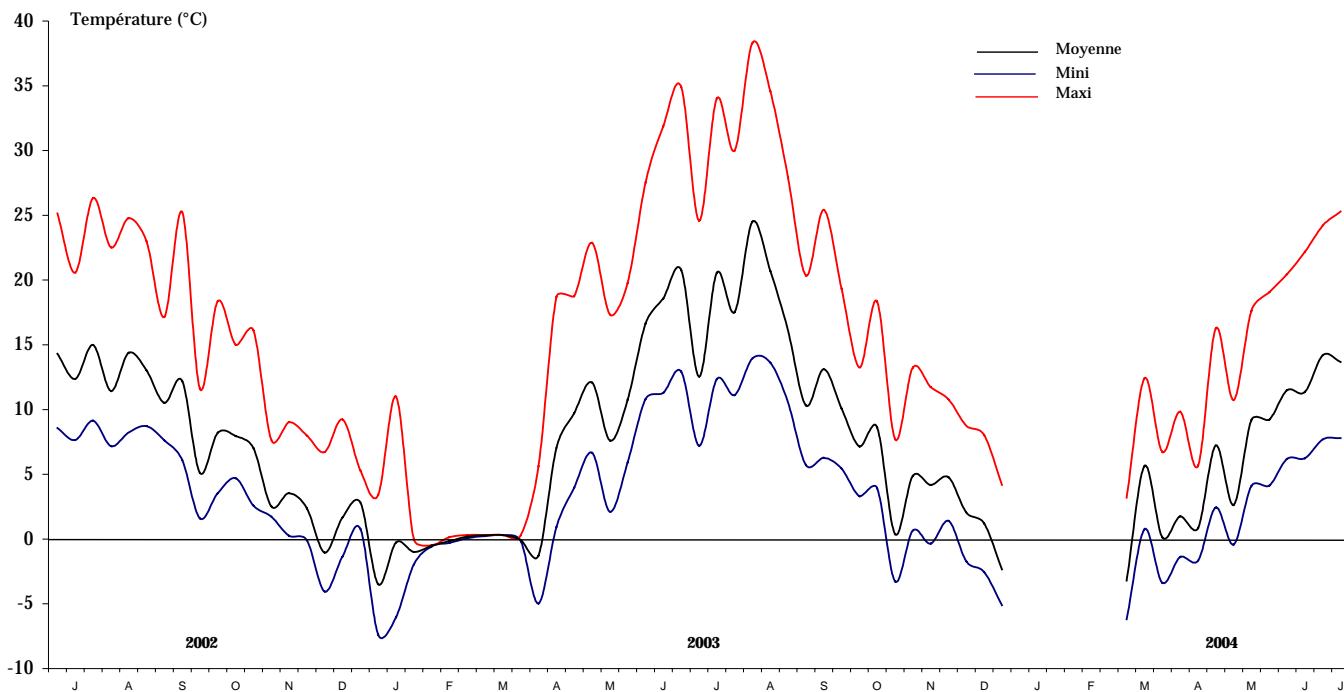


Figure 4 : Régime thermique en zone hétérostasique (juillet 2002-juillet 2004).
Températures de l'air (20 cm) maximale, minimale et moyenne décadaires, tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).

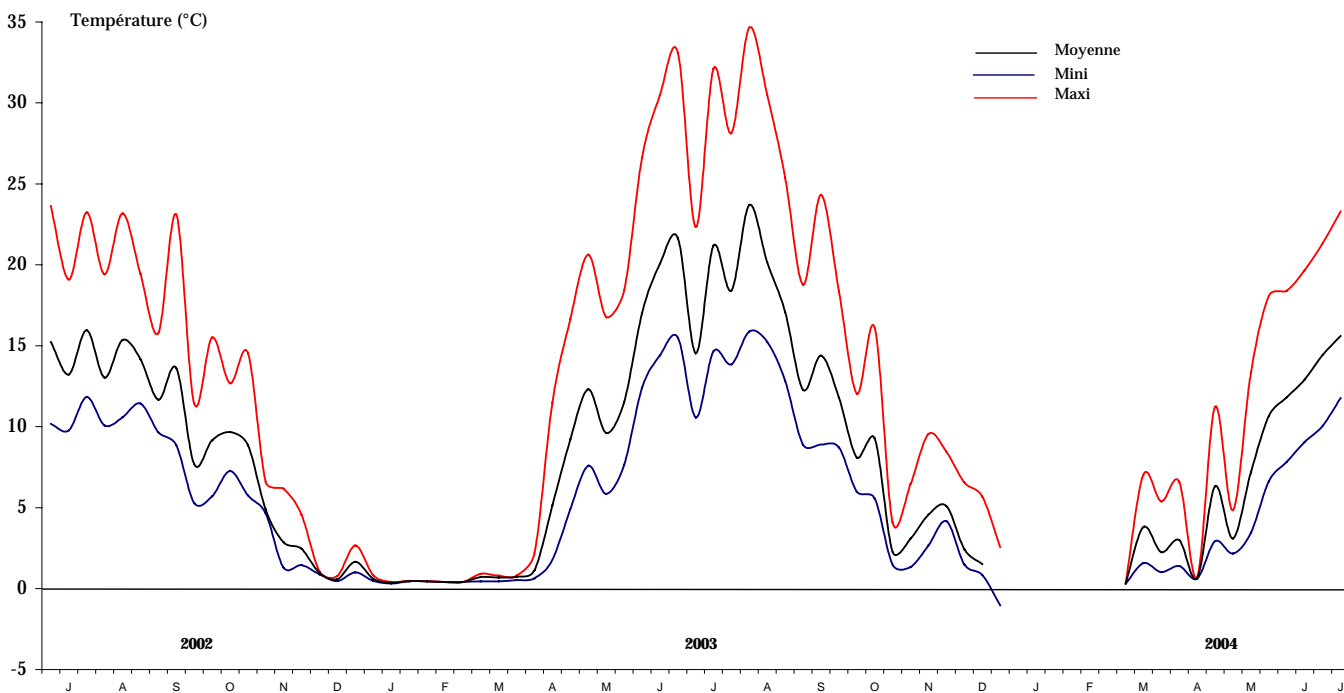


Figure 5 : Régime thermique en zone rhexistasique (juillet 2002-juillet 2004).
Températures de l'air (20 cm) maximale, minimale et moyenne décadaires, tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).

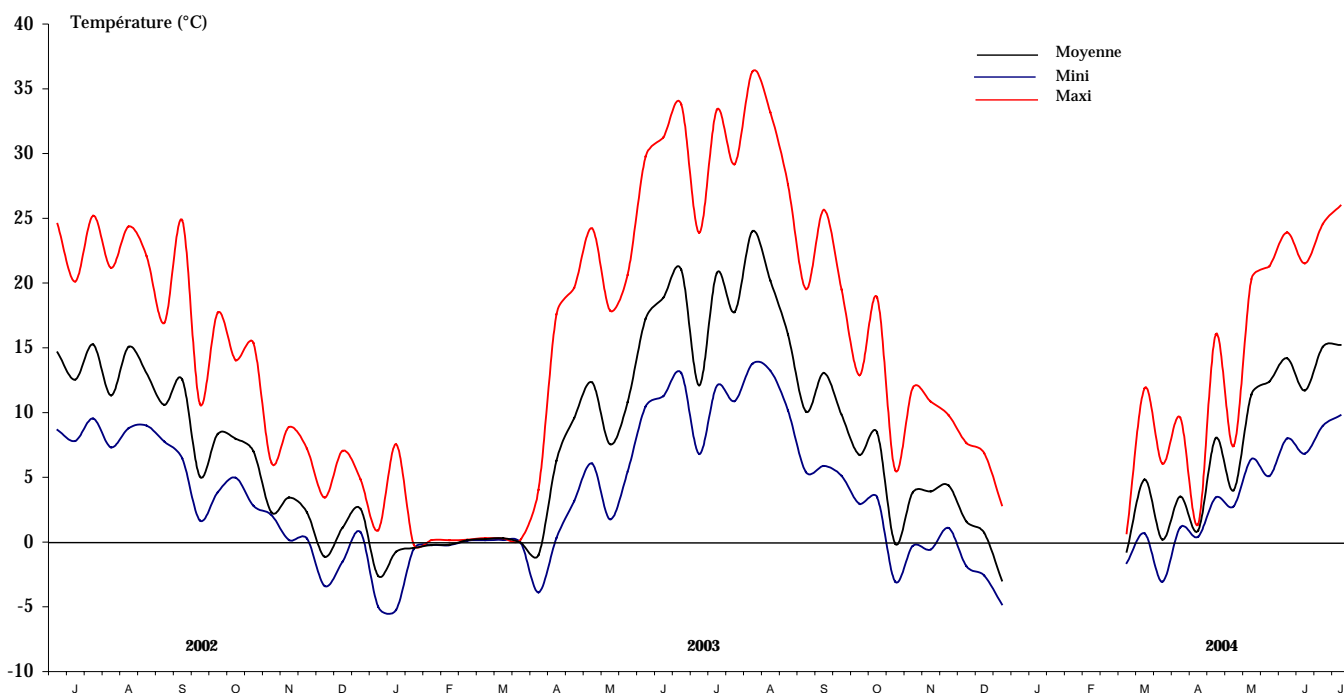


Figure 6 : Ecart thermique entre le sol (-10 cm) et l'air (20 cm) en pelouse dense biostasique (juillet 2002-juillet 2004).
Températures moyennes décadaires, tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).

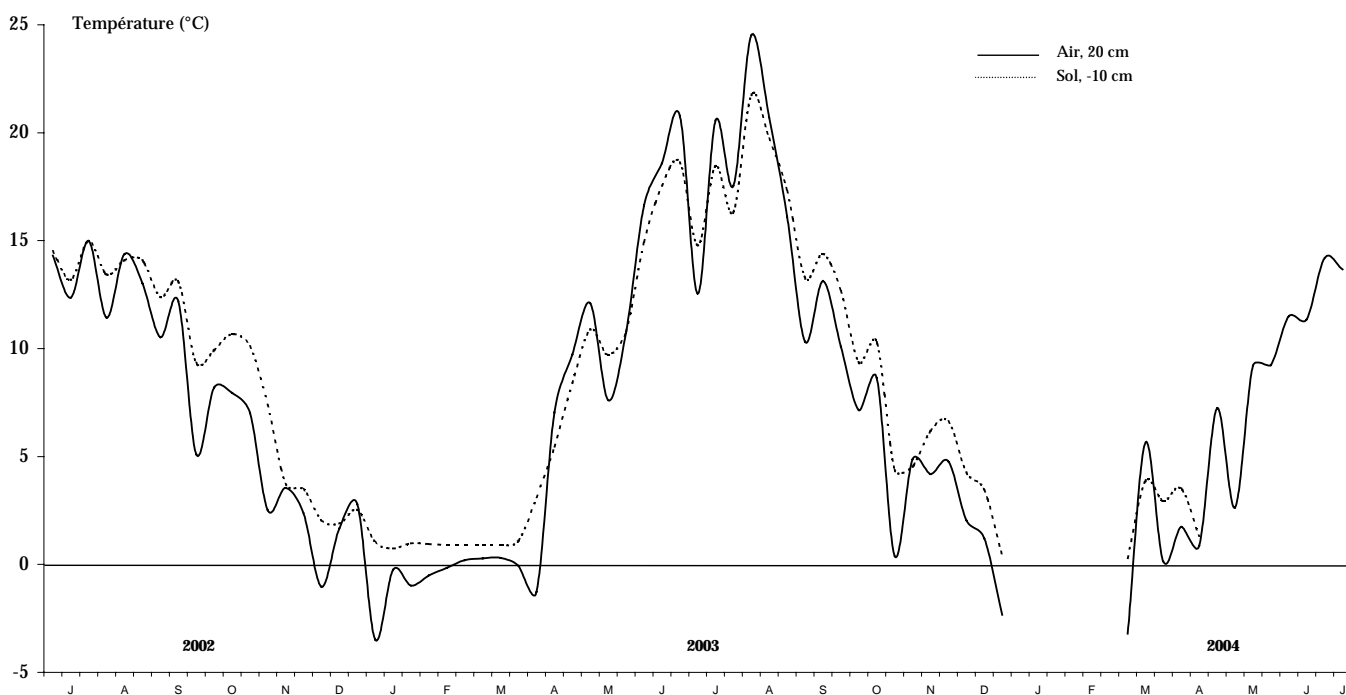


Figure 7 : Ecart thermique entre le sol (-10 cm) et l'air (20 cm) en zone hétérostatique (banquettes de géli-solifluxion) (juillet 2002-juillet 2004). Températures moyennes décadaires, tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).

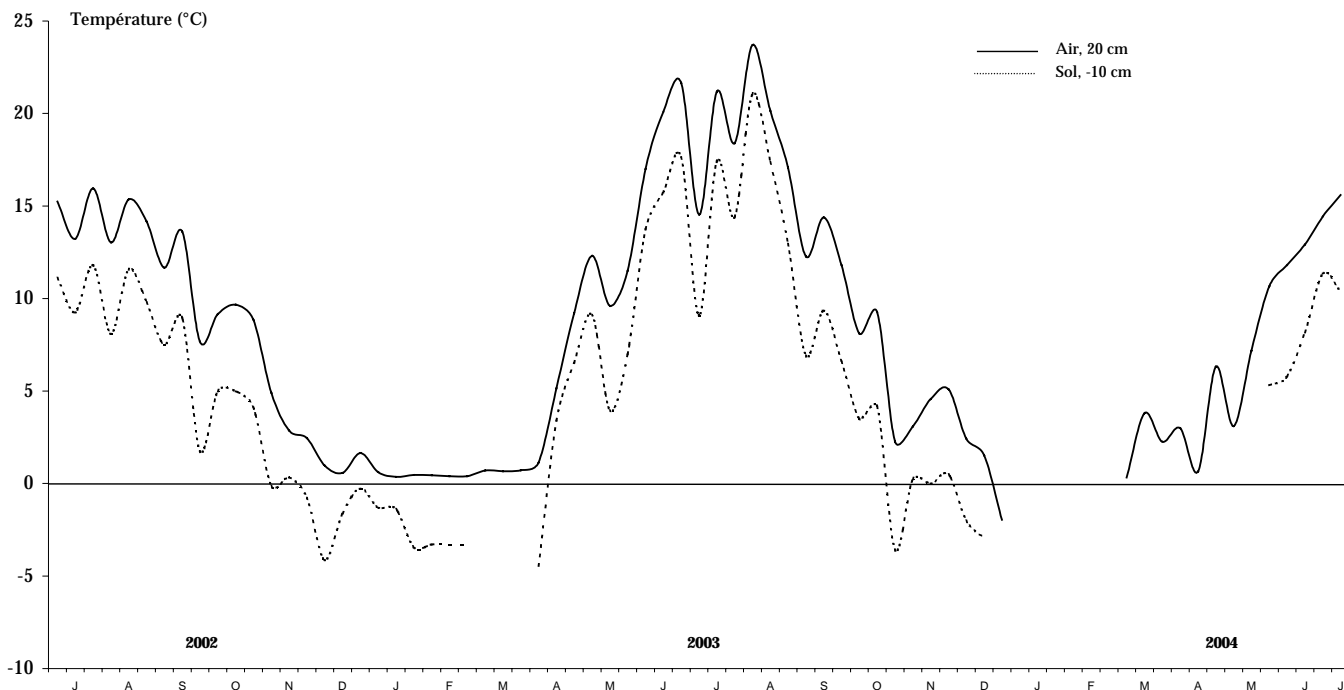


Figure 8 : Ecart thermique entre le sol (-10 cm) et l'air (20 cm) en secteur colluvial rhexistatique (juillet 2002-juillet 2004). Températures moyennes décadaires, tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).

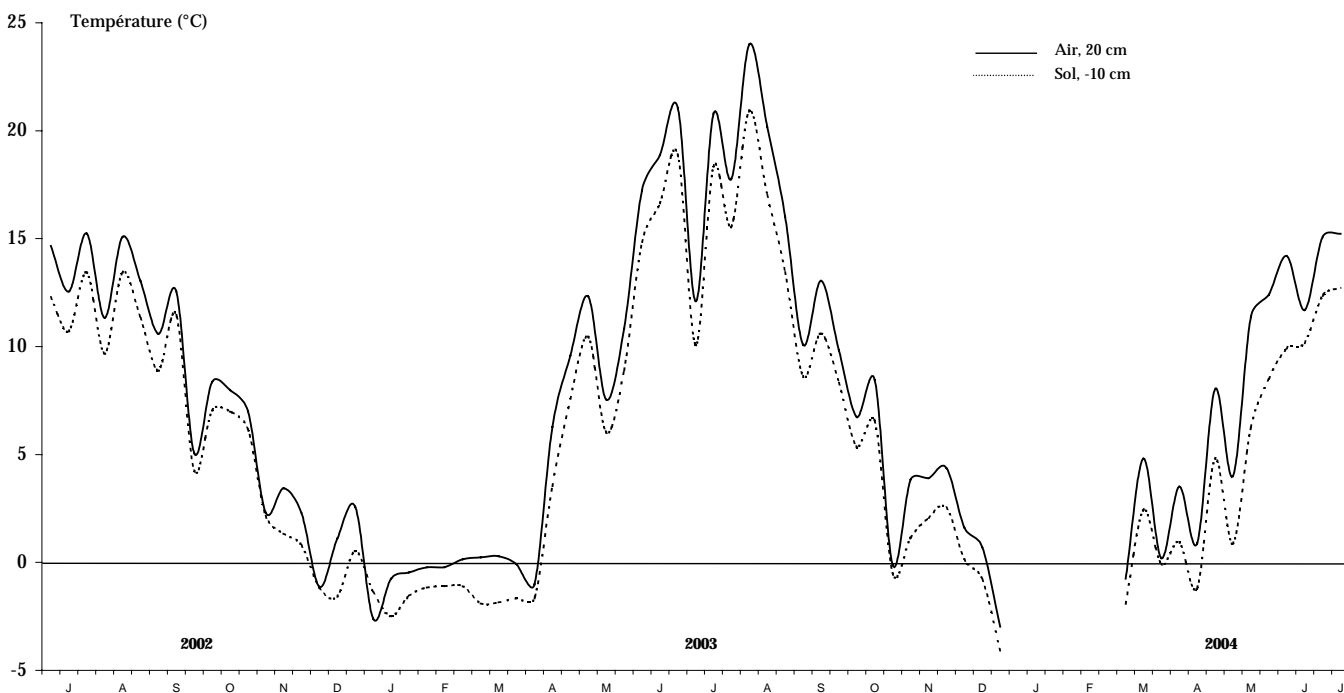


Figure 9 : Régime thermique en zone biotassique (pelouse dense) (juillet 2002-juillet 2004).
Températures du sol (-10 cm) maximale, minimale et moyenne décadaires, tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).

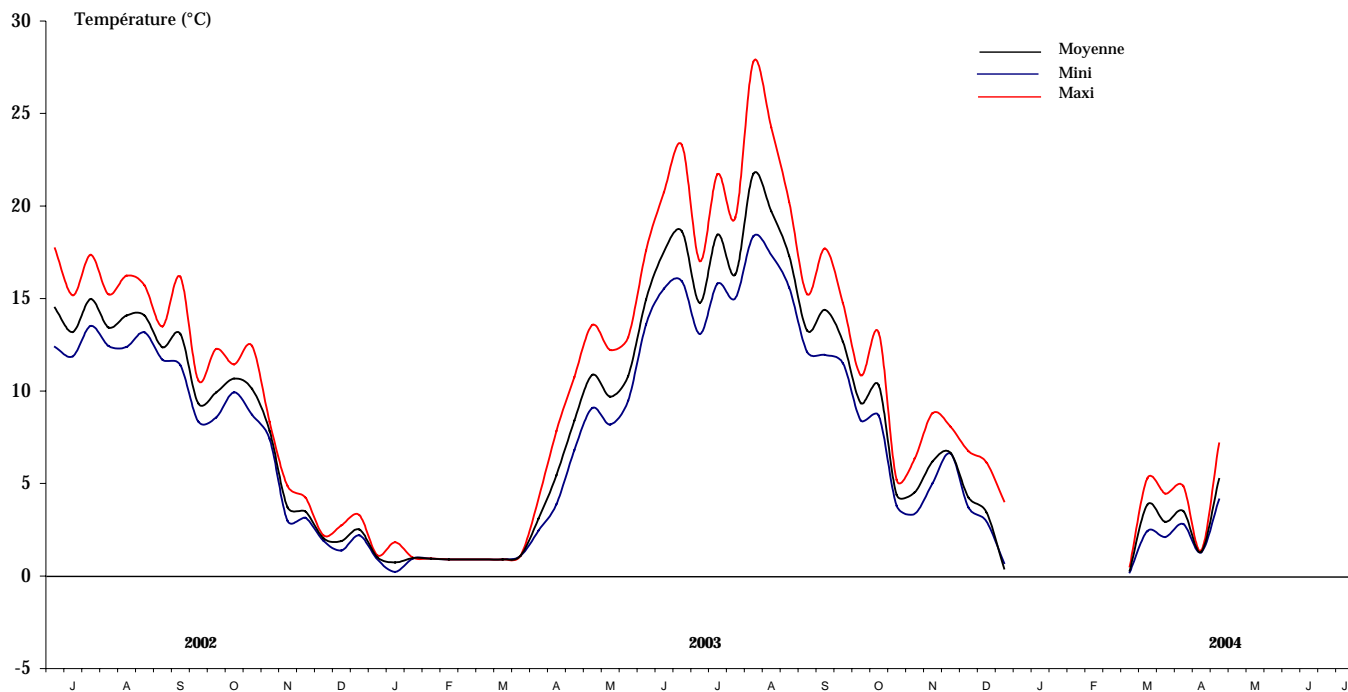


Figure 10 : Régime thermique en zone biotassique (lignex bas) (juillet 2002-juillet 2004).
Températures du sol (-10 cm) maximale, minimale et moyenne décadaires, tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).

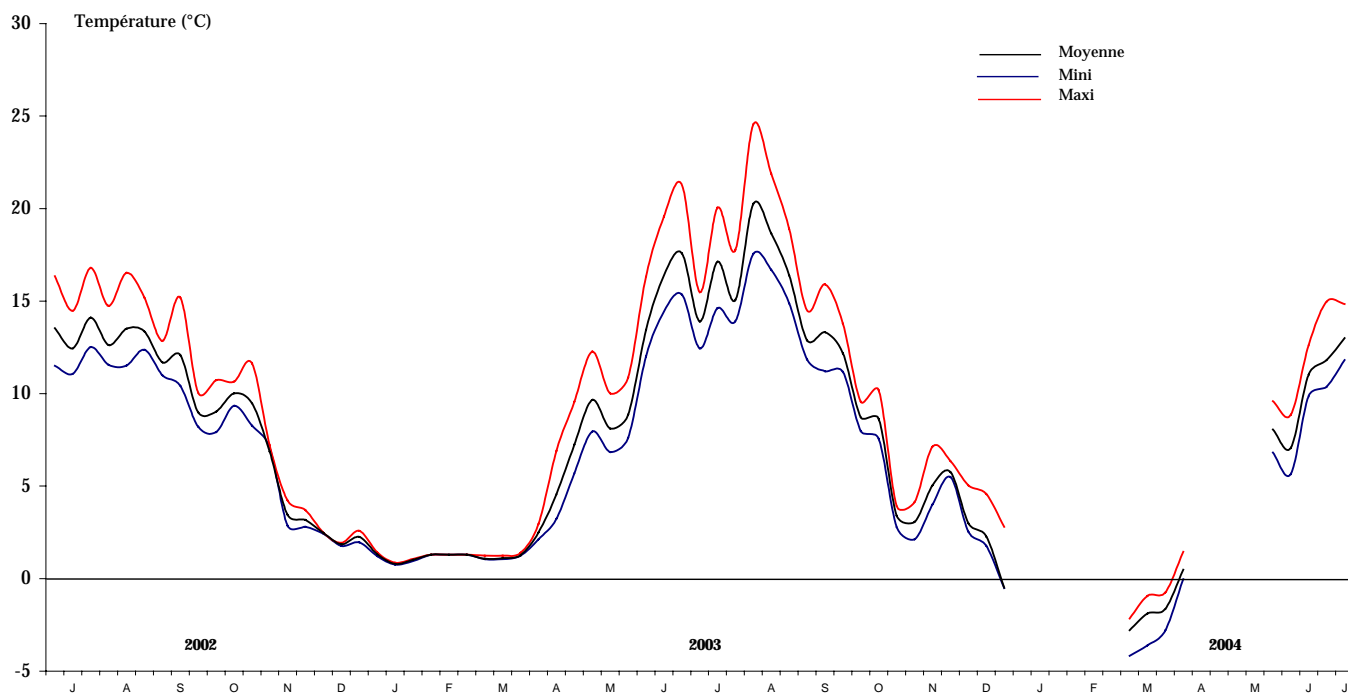


Figure 11 : Régime thermique en zone hétérostasique (juillet 2002-juillet 2004).
Températures du sol (-10 cm) maximale, minimale et moyenne décadaires, tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).

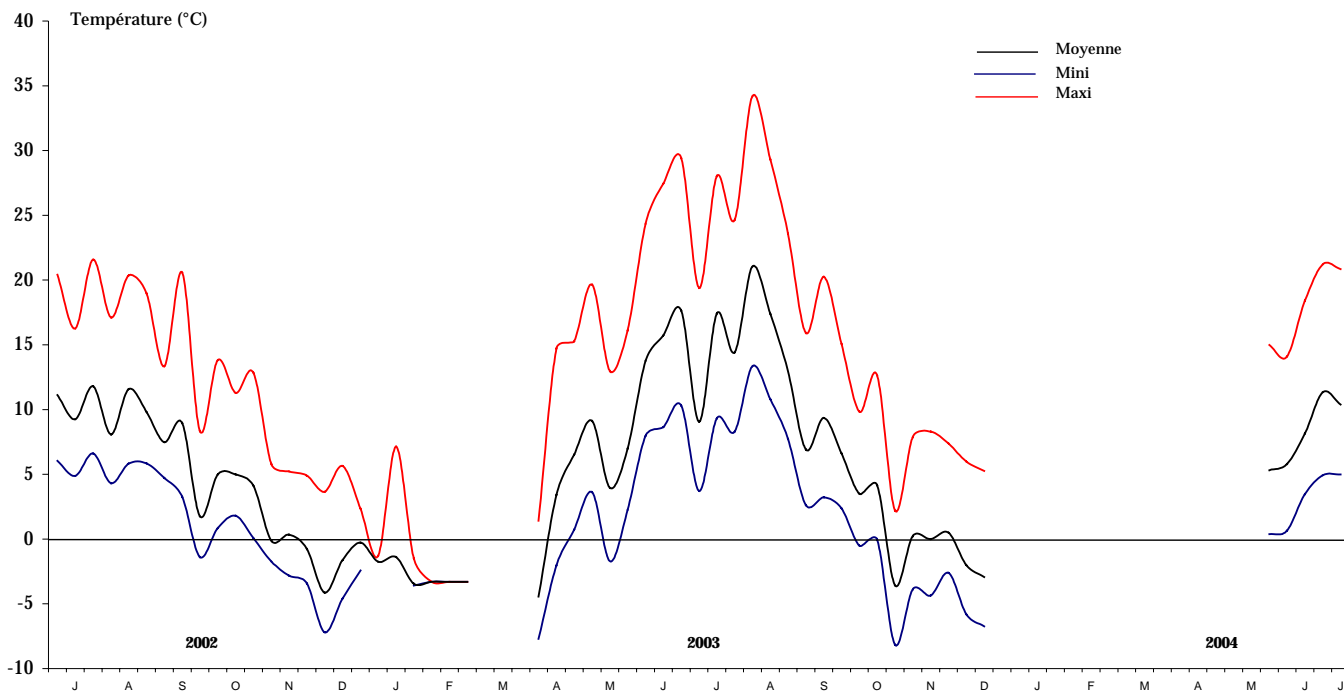


Figure 12 : Régime thermique en zone rhexistasique (juillet 2002-juillet 2004).
Températures du sol (-10 cm) maximale, minimale et moyenne décadaires, tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).

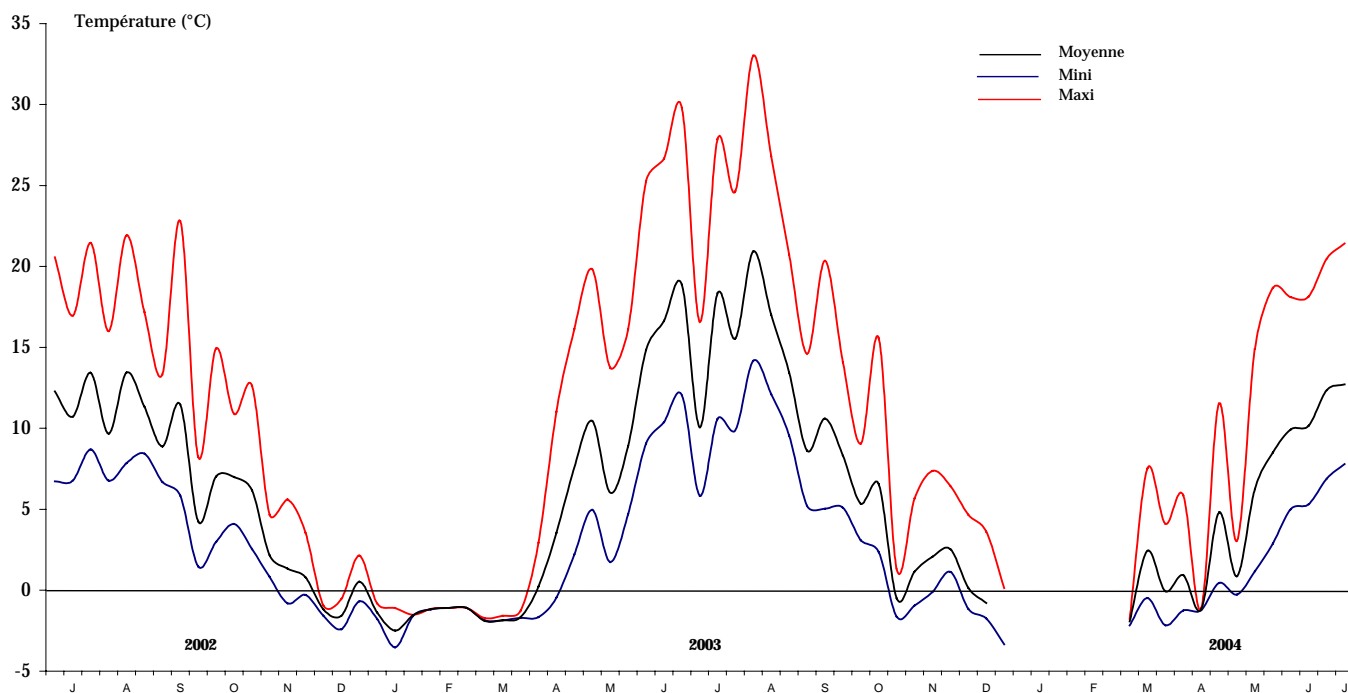


Figure 13 : Régime thermique du sol à -10 cm (gradient biorhexistasique) (juillet 2002-juillet 2004).
Températures minimales décadaires, tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).

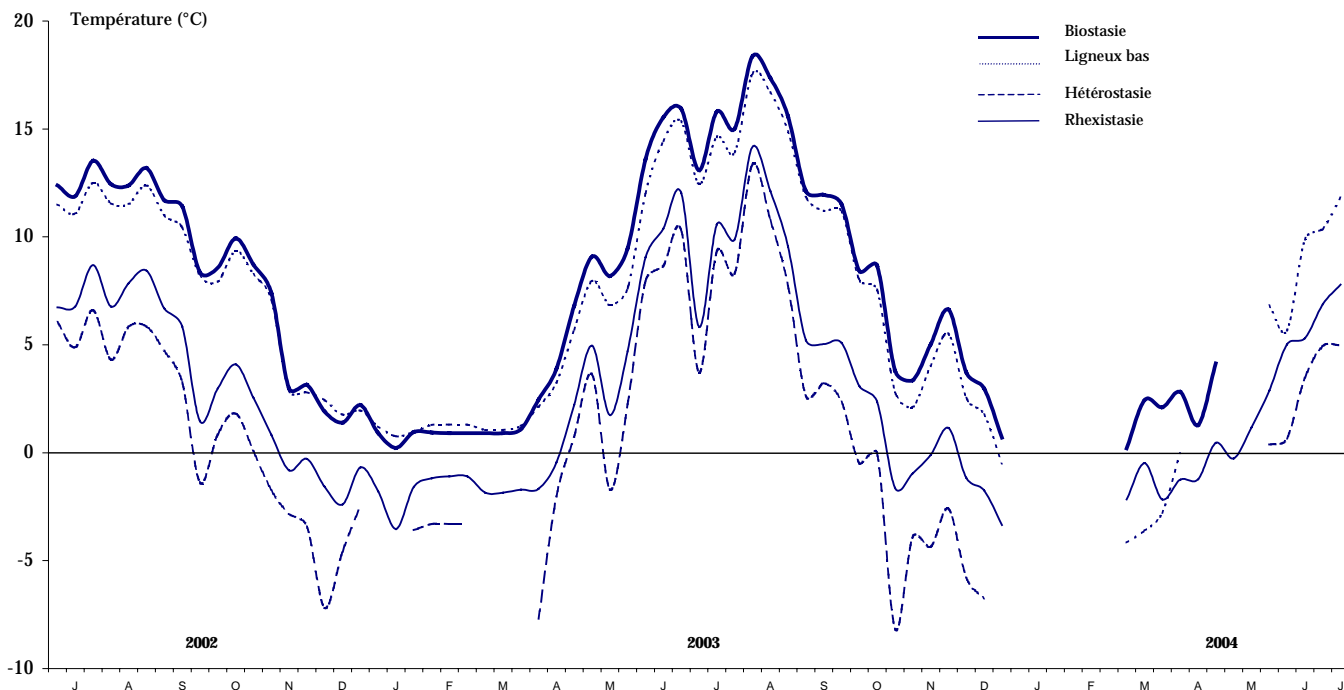
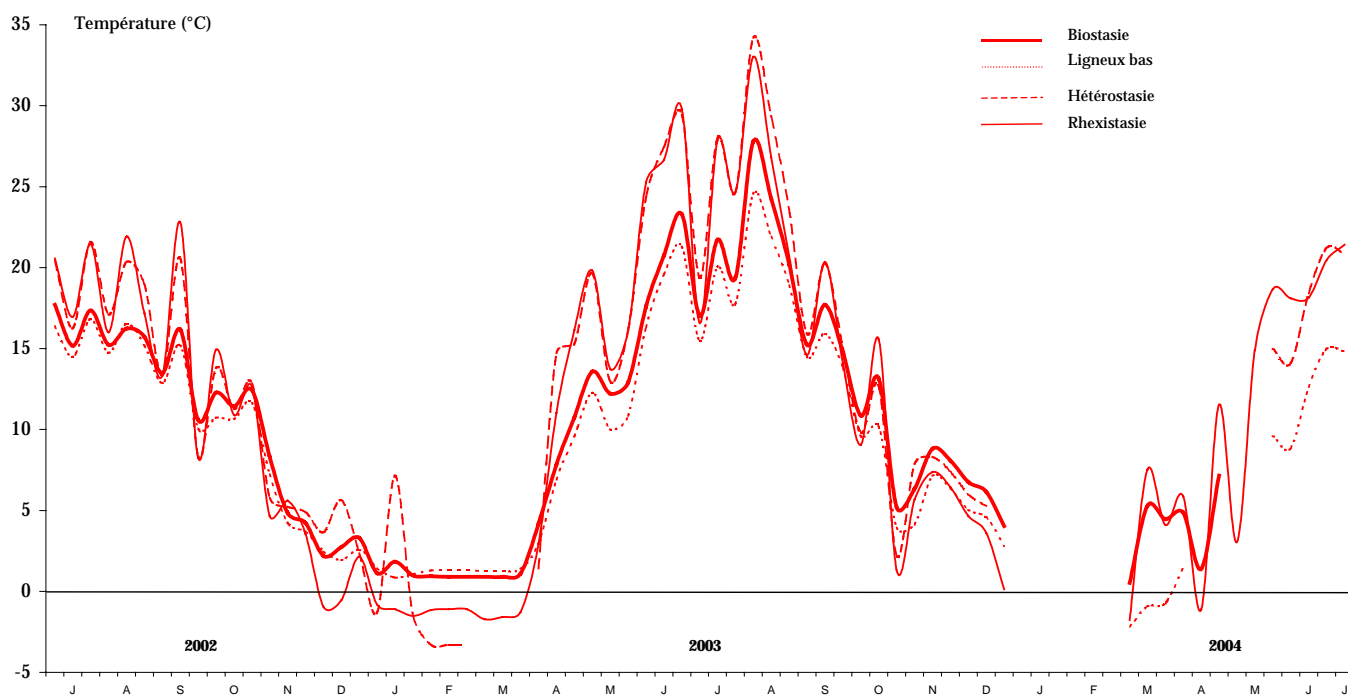


Figure 14 : Régime thermique du sol à -10 cm (gradient biorhexistasique) (juillet 2002-juillet 2004).
Températures maximales décadaires, tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m).



ANNEXE R : Illustrations de terrain



Cliché SA, 2003.

Photo 1 : Vue générale de la zone apico-proximale, prise au contact du bombement central (Aulp du Seuil). Le cône apical et la bande ZAPBR1 sont situés en amont du ligneux (*Rhamnus alpina* L.). On remarque aisément les chenaux latéraux à matériaux mobiles et le piquetage herbacé qui s'est installé dans le prolongement du nerprun. L'angle de prise de vue ne permet pas de le déceler mais cette partie du cône est légèrement déjetée vers la gauche.



Cliché SA, 2003.

Photo 2 : Déstructuration en forme de « boomerang » (Aulp du Seuil). Forme typique de déstructuration des surfaces peintes, sur les chenaux latéraux à matériaux mobiles du cône d'éboulis de l'Aulp du Seuil.



Cliché SA, mars 2003.

Photo 3 : Vue générale de la zone apico-proximale, prise au contact du bombement central (Aulp du Seuil). L'accumulation des débris est très chaotique et la patine claire des matériaux révèle l'instabilité du secteur. En période de fonte, le cône apical est régulièrement remanié et alimenté en blocs par de petites avalanches de slush et des splash avalancheux (en provenance du replat situé sur la petite corniche). Dans le passé, ce sont aussi probablement ces types d'avalanche qui ont contribué à la création du bombement central, dont la granulométrie est extrêmement hétérogène et la structure chaotique.



Cliché SA, 2003 (ZMBR10, Aulp du Seuil)



Cliché SA, 2003 (La Plagne)



Cliché SA, 2003 (Aulp du Seuil)

Photo 4 : Freinage géodynamique induit par la présence de *Centranthus angustifolius*. La trajectoire des matériaux est déviée de part et d'autre de la touffe (a). Au cours des phases de reptation nivale, les matériaux emprisonnés sont redistribués (b et c).

Photo 5 : Vue prise dans le prolongement du chenal latéral de gauche. Le cercle indique la zone où il est sectionné.

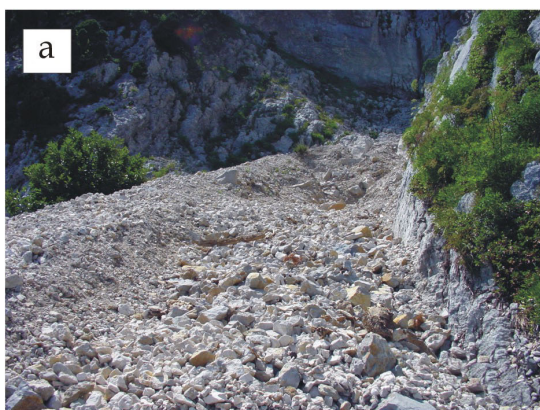


Cliché SA, 2002 (Aulp du Seuil).



Cliché SA, 2002 (ZAPBJ9, Aulp du Seuil).

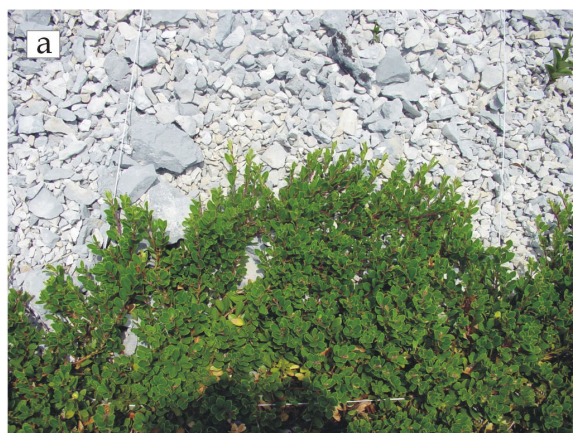
Photo 6 : Vue de la portion du chenal latéral gauche située à l'aval du chaos de blocs. Au fond, on aperçoit le bombement central et la transition est nette. Le chenal est presque uniquement colonisé par *Centranthus agustifolius*.



Clichés SA, 2003 (Aulp du Seuil)



Photo 7 : Impact d'une avalanche de forte intensité sur le chenal latéral de droite. Le chenal a subi une purge partielle (a). La couche de pierraille atteignait par endroit, plus d'un mètre d'épaisseur (b).



Clichés SA, 2003 (La Plagne).

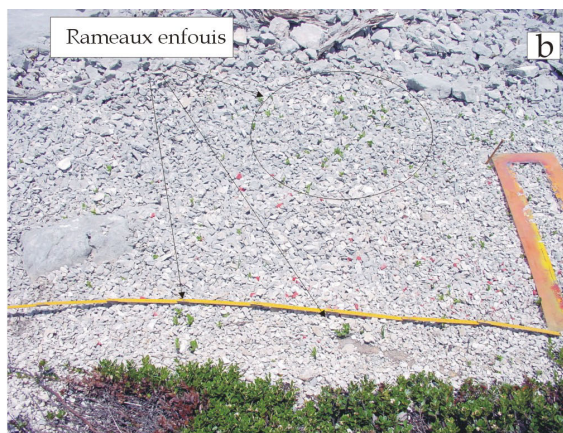
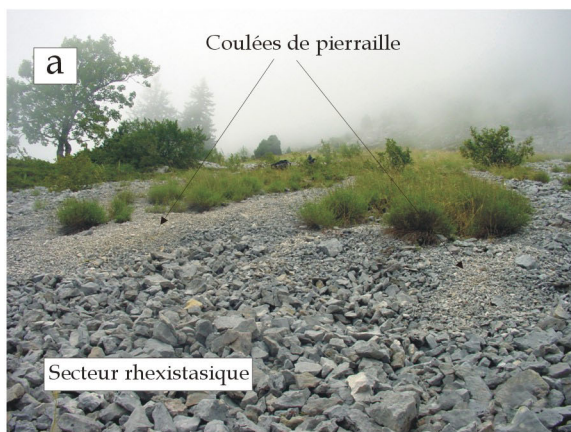


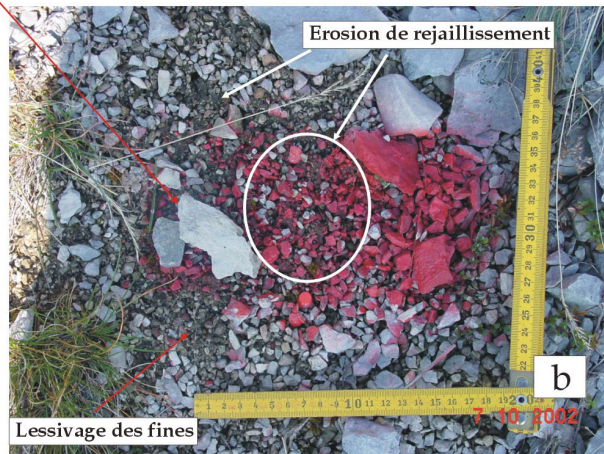
Photo 8 : Bordures à *Arctostaphylos uva-ursi*. La zone d'enracinement de l'individu peut être située à plusieurs mètres du contact avec la plage colluviale. Les tiges rampantes recouvrent progressivement les matériaux (a). Celles qui sont parfois recouvertes par les colluvions, sont libérées par la nivéo-reptation (b). La bande Z1BR2 a été complètement détruite par les mouvements du manteau neigeux et les déplacements sont importants (b). Le pochoir indique la localisation originelle de la surface peinte (b).



Clichés SA, septembre 2002. La Plagne.

Photo 9 : Vues de la terminaison distale de la micro-lave hydro-gravitaire. Les coulées de pierraille graveleuses mobiles recouvrent progressivement le secteur rhexistasique à *Centranthus angustifolius*. La différence de couleur dans la patine des matériaux indique les zones d'instabilité.

Arrivée de blocs



Clichés SA, 2002 (La Plagne)

Photo 10 : Impact de bloc et processus d'accumulation ponctuelle (a). Ablation sous l'effet du lessivage des fines et de l'érosion de rejaillissement (b).

ANNEXE S

Déstructuration des surfaces peintes et vitesses moyennes de déplacement. Périodes du 28 avril 2003 au 20 novembre 2003 et du 20 novembre 2003 au 20 mai 2004.

Figure 1a : Déstructuration des surfaces peintes. Période du 28 avril 2003 au 20 novembre 2003.
 Tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m)

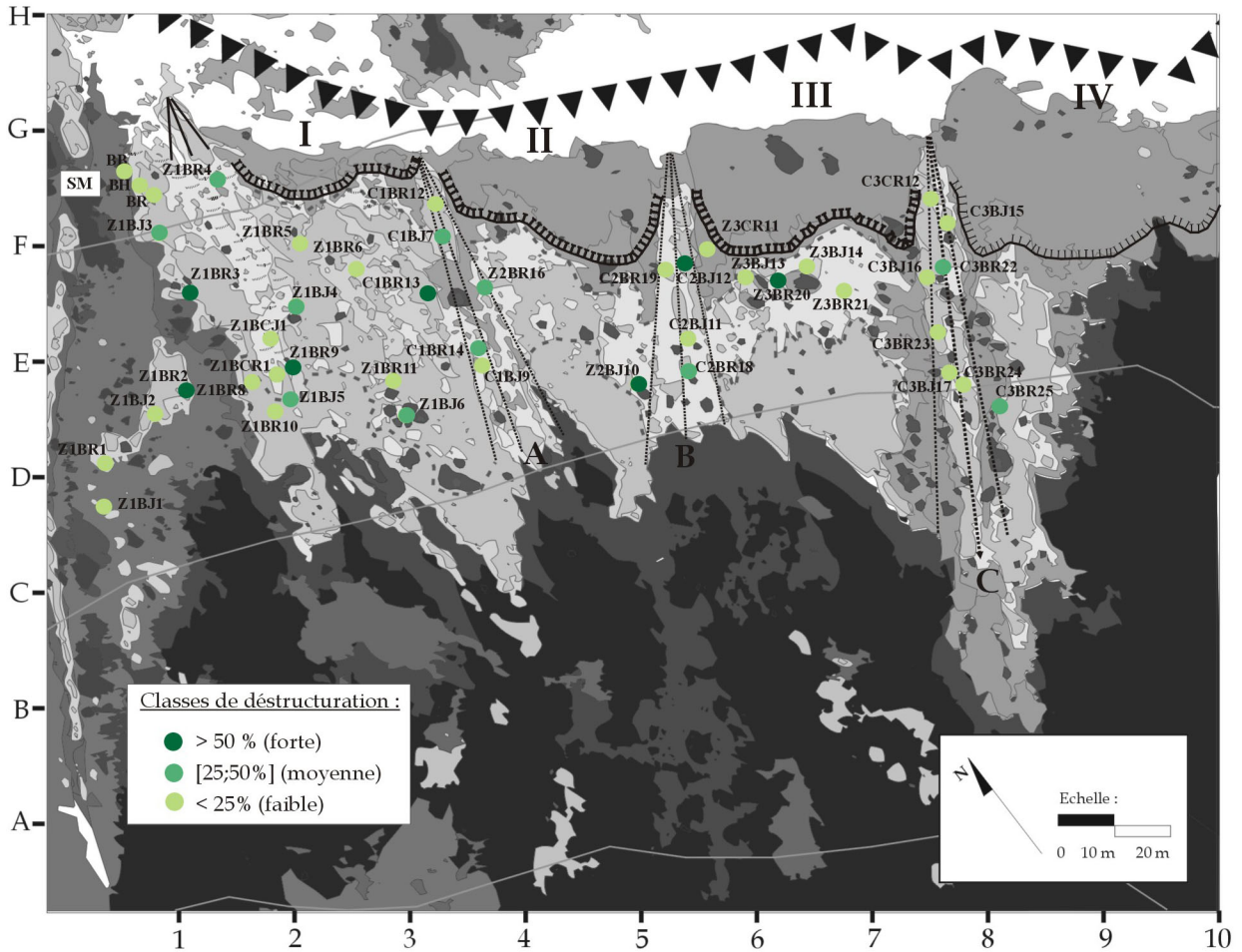


Figure 1b : Vitesses moyennes de déplacement. Période du 28 avril 2003 au 20 novembre 2003.
 Tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m)

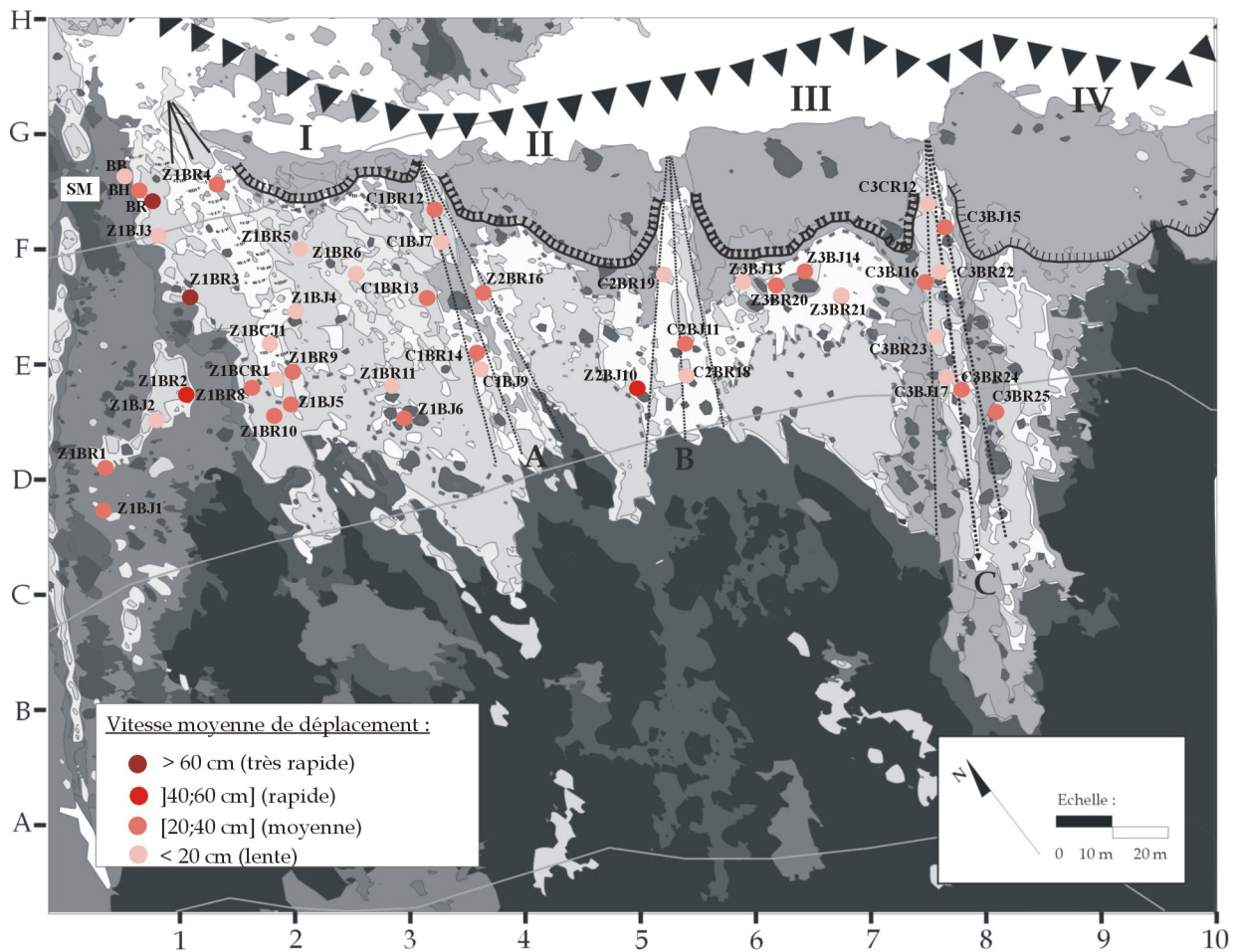


Figure 2a : Déstructuration des surfaces peintes. Période du 20 novembre 2003 au 20 mai 2004.
 Tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m)

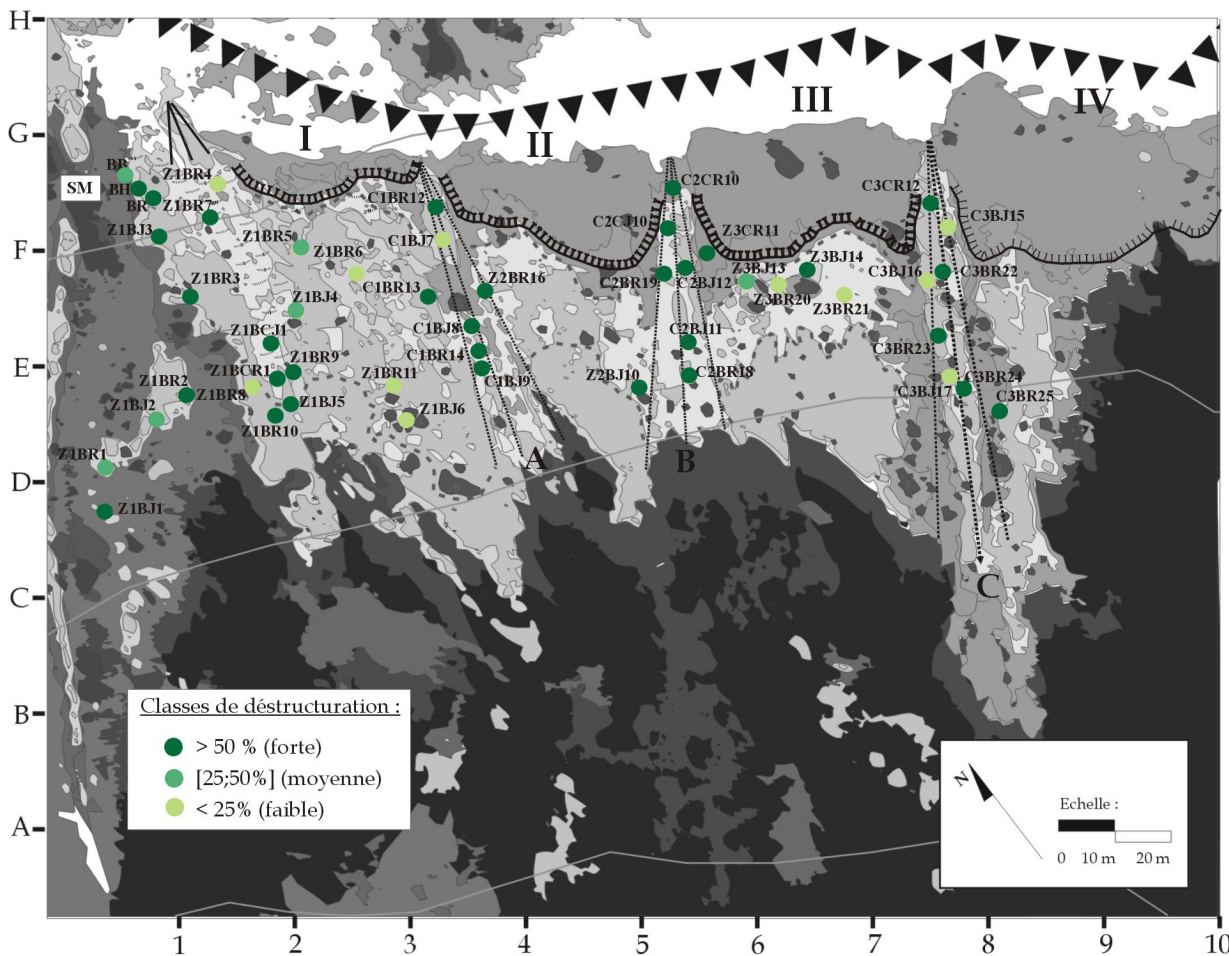


Figure 2b : Vitesses moyennes de déplacement. Période du 20 novembre 2003 au 20 mai 2004.
 Tablier d'éboulis de La Plagne (1647 m)

