

# Travaux scientifiques du Parc national de la Vanoise

Recueillis et publiés sous la direction de  
Philippe TRAUB  
Directeur du Parc national

Sous l'égide du Conseil scientifique  
présidé par Dominique GAUTHIER

Ce tome a été préparé sous la responsabilité de  
Jean-Pierre MARTINOT  
(Pôle Patrimoine, Parc national de la Vanoise)

Tome XXIV - 2009

Ministère de l'Écologie, de l'Énergie,  
du Développement durable et de la Mer  
en charge des Technologies vertes et  
des Négociations sur le climat  
Direction de l'eau et de la biodiversité  
Parc national de la Vanoise  
135 rue du docteur Julliand  
Boîte postale 705  
F-73007 CHAMBÉRY cedex  
Téléphone +33 (0)4 79 62 30 54  
Télécopie +33 (0)4 79 96 37 18  
Internet : [www.parcnational-vanoise.com](http://www.parcnational-vanoise.com)

ISSN 0180-961 X

## SOMMAIRE

Contents-----	p. 3
Composition du Conseil scientifique-----	p. 4
Lecture critique des articles-----	p. 5
Liste des collaborateurs du volume-----	p. 5
<b>Contributions scientifiques</b>	
Histoire des feux et de la dynamique végétale : reconstruction paléobotanique d'un écosystème subalpin de Vanoise méridionale / Lény Mercier, Aurélie Genries, Martin Lavoie, Adam A. Ali, Loïc Bircker et Christopher Carcaillet-----	p. 7
Impact des feux sur la richesse et la dynamique des communautés forestières subalpines en Vanoise / Aurélie Genries et Christopher Carcaillet-----	p. 19
Une forêt subalpine à Mélèze ( <i>Larix decidua</i> Mill.) dominant dans un vallon avalancheux : 9 000 ans d'histoire révélés par l'analyse des macrorestes végétaux d'un lac de Maurienne / Olivier Blarquez, Christopher Carcaillet et Brice Mourier-----	p. 33
Élévation de la limite supérieure du sapin pectiné ( <i>Abies alba</i> Mill.) depuis 1950 en Maurienne, Savoie / Fabien Beilhe, Christopher Carcaillet et Sandrine Chauchard-----	p. 45
Présence de pins prostrés dans le massif du Mont Cenis ( <i>Pinus mugo</i> Turra) : discussion sur la pérennité de la population / Christopher Carcaillet, Adam A. Ali, Nicolas Fauvart, Paul Roiron et Jean-Frédéric Terral-----	p. 57
Analyse et réflexions préliminaires sur l'évolution climatique en Vanoise / Michaël Delorme, Philippe Lebreton, Louis Reynaud et Dominique Allaine--	p. 69
Application de la technologie GPS au suivi du déplacement de bouquetins des Alpes ( <i>Capra ibex ibex</i> L.) dans les Parcs nationaux de la Vanoise et du Gran Paradiso (Italie) / Irène Girard, Christopher Adrados, Bruno Bassano et Georges Janeau-----	p. 105
Les mondes de la forêt de l'Orgère / Pierre Le Quéau-----	p. 127



## CONTENTS

Members of the scientific committee -----	p. 4
Reading committee-----	p. 5
List of contributors-----	p. 5
History of fire and vegetation dynamics : paleobotanic reconstruction of a subalpine ecosystem in the southern Vanoise / Lény Mercier, Aurélie Genries, Martin Lavoie, Adam A. Ali, Loïc Bircker et Christopher Carcaillet-----	p. 7
Impact of fires on the richness and dynamic of subalpine forest ecosystems in Vanoise / Aurélie Genries et Christopher Carcaillet -----	p. 19
A subalpine Larch forest ( <i>Larix decidua</i> Mill.) in an avalanche valley : 9000 years of history revealed by the analysis of plant remains in a Maurienne lake / Olivier Blarquez, Christopher Carcaillet et Brice Mourier-----	p. 33
Tree line uprising of the Silver Fir ( <i>Abies alba</i> Mill.) since 1950 in Maurienne, Savoie / Fabien Beilhe, Christopher Carcaillet et Sandrine Chauchard -----	p. 45
Presence of Mugo Pine in the Mont Cenis ( <i>Pinus mugo</i> Turra) : discussion on the viability of the population / Christopher Carcaillet, Adam A. Ali, Nicolas Fauvart, Paul Roiron et Jean-Frédéric Terral -----	p. 57
Analysis and preliminary thoughts on the climate change in Vanoise / Michaël Delorme, Philippe Lebreton, Louis Reynaud et Dominique Allaine--	p. 69
Use of the GPS technology to monitor the movement of Alpine ibex ( <i>Capra ibex ibex</i> L.) in the Vanoise and Gran Paradiso National Parks / Irène Girard, Christopher Adrados, Bruno Bassano et Georges Janeau-----	p. 105
The worlds of the Orgère forest / Pierre Le Quéau -----	p. 127

## COMPOSITION DU CONSEIL SCIENTIFIQUE DU PARC NATIONAL DE LA VANOISE

### *Président :*

M. Dominique GAUTHIER, Directeur du Laboratoire départemental vétérinaire et d'hygiène alimentaire (Gap) - Mammalogie, interactions activités humaines/faune sauvage.

### *Vice-Présidents :*

Mme Isabelle MAUZ, CEMAGREF (Grenoble) - Sociologie de l'environnement.

M. Gérard NICOU, Université de Savoie (Chambéry) - Hydrogéologie - Géologie des formations superficielles.

M. Dominique ALLAINE, Laboratoire de biométrie et biologie évolutive (Université Claude Bernard, Lyon 1) - Écologie évolutive, dynamique des populations.

Mme Françoise BALLE, Conservateur en chef du patrimoine, Conservation du Patrimoine de la Savoie (Chambéry) - Archéologie.

M. Bruno BASSANO, Parco nazionale Gran Paradiso - Écologie et éco-pathologie de la faune sauvage.

M. Jacques BLONDEL, CEF, UMR 5175 (Montpellier) - Biogéographie, biologie des populations animales et biologie de la conservation.

M. Philippe CHOLER, Laboratoire d'écologie alpine, Université Joseph Fourier (Grenoble) - Flore alpine et écologie fonctionnelle des communautés végétales alpines.

M. Philippe FLEURY, SUACI Montagne, GIS Alpes du Nord (Chambéry) - Agronomie.

M. Serge FUDRAL, Université de Savoie (Chambéry) - Géosciences, géologie structurale.

M. Raphaël LARRERE, INRA - STEPE (Ivry sur Seine) - Sociologue et spécialiste d'éthique environnementale.

M. Philippe LEBRETON, Professeur retraité de l'Université Lyon 1 - Biologie végétale, ornithologie.

M. Jean-Paul LEGROS, INRA - Unité LISAH, Directeur de recherche INRA (Montpellier) - spécialiste de science du sol.

M. Jean-Pierre LUMARÉ, Laboratoire de zoogéographie, Université Paul Valéry (Montpellier) - Biodiversité et entomofaune.

M. Yann MAGNANI, Office national de la chasse et de la faune sauvage / CNERA. Faune de montagne (Sevrier) - Gestion des Galliformes de montagne.

M. Olivier MANNEVILLE, Laboratoire de biologie alpine, Université Joseph Fourier (Grenoble) - Écologie végétale ; typologie, fonctionnement et dynamique des systèmes tourbeux et marécageux.

M. Claude MIAUD, Enseignant-chercheur, Université de Savoie (Chambéry) - Biologie des populations.

M. André MIQUET, Conservatoire du Patrimoine naturel de la Savoie (Le Bourget du Lac) - Biologie de la faune sauvage, gestion du patrimoine naturel.

M. Louis REYNAUD, Retraité Laboratoire de glaciologie CNRS, Université Joseph Fourier (Grenoble).

M. Daniel ROYBIN, GIS Alpes du Nord (Chambéry).

Mme Irène TILL-BOTTRAUD, Laboratoire d'écologie alpine, Université Joseph Fourier (Grenoble) - Biologie, génétique des populations de plantes.

M. Hubert TOURNIER, Laboratoire dynamique des écosystèmes d'altitude, Université de Savoie (Chambéry) - Écologie et ornithologie.

### *Membres associés du Comité :*

M. Michel BARTOLI - Compétences dans le domaine de la forêt.

M. Xavier BERNIER - Compétences dans le domaine de la géographie.

M. Jean-François LYON-CAEN - Compétences dans le domaine de l'architecture.

Mme Anne SGARD - Compétences dans le domaine de la géographie sociale.

**ONT CONTRIBUÉ À LA LECTURE CRITIQUE DES ARTICLES  
ET À LA COLLABORATION DE CE TOME**

Michaël DELORME (Pôle Patrimoine du Parc national de la Vanoise)

Philippe LEBRETON (Conseil scientifique du Parc national de la Vanoise)

Isabelle MAUZ (CEMAGREF, Grenoble – Conseil scientifique du Parc national de la Vanoise)

Jean-Pierre MARTINOT (Pôle Patrimoine du Parc national de la Vanoise)

**Coordination** : Sophie JOUTY, Documentaliste indépendante, Chambéry





# HISTOIRE DES FEUX ET DE LA DYNAMIQUE VÉGÉTALE : RECONSTRUCTION PALÉOBOTANIQUE D'UN ÉCOSYSTÈME SUBALPIN DE VANOISE MÉRIDIONALE

par Lény Mercier<sup>1</sup>, Aurélie Genries<sup>1,2</sup>, Martin Lavoie<sup>3</sup>, Adam A. Ali.<sup>1,2</sup>,  
Loïc Bircker<sup>1</sup> et Christopher Carcaillet<sup>1,2</sup>

**Résumé.** Des macrorestes végétaux enfouis dans des sédiments d'un petit lac tourbeux subalpin sont comparés aux quantités de charbon de bois mesurées dans les mêmes sédiments. Les analyses montrent que la forêt subalpine à pin cembro s'est établie dans un milieu peuplé de bouleaux et d'aulnes dans lequel se propageaient des feux à une fréquence moyenne de 236 ans. Les feux semblent stimulés par l'abondance d'aiguilles de pin cembro (combustible fin). En retour, les peuplements de pins cembro sont affectés par les feux sans pour autant disparaître. Seule une séquence de 4 feux en 130 ans altère durablement l'écosystème subalpin, voyant la disparition temporaire du pin cembro et durable des aulnes et de nombreux autres taxons. Les écosystèmes subalpins présentent une résilience importante aux feux à condition que ceux-ci ne soient pas trop rapprochés dans le temps.

**Mots-clés :** Paléoécologie - Forêts subalpines - Dynamique forestière - Feux de forêts - Massif de la Vanoise (Savoie) - Maurienne (Savoie).

**History of fire and vegetation dynamics : paleobotanic reconstruction of a subalpine ecosystem in the southern Vanoise**

**Key-words :** Paleoecology - Subalpine forests - Forest dynamics - Forest fires - Vanoise Mountains (France) - Maurienne (France).

## 1. INTRODUCTION

Le feu est une perturbation agissant sur la diversité spécifique et le cycle des nutriments par combustion de la phytomasse ; il participe ainsi au renouvellement des communautés et favorise la mosaïque paysagère (Whelan, 1995). Les incendies peuvent se produire sur des étendues variées, allant de l'arbre foudroyé à plusieurs millions d'hectares (Johnson, 1992 ; Gavin *et al.*, 2007). Les conséquences sont donc variables suivant le type de feu. Une telle perturbation modifie l'environnement aux échelles qui sont fonctions de l'ampleur des facteurs qui déterminent cette perturbation (Burel *et al.*, 1992). Ainsi, dans les systèmes à faible productivité où les espèces sont longévives, comme en haute montagne, la réponse des espèces et des communautés aux changements de fréquence de feux doit être analysée sur des durées supérieures à 100 ans. La reconstitution des incendies passés (paléofeux) est possible grâce à l'antracologie ou étude des charbons de bois (Carcaillet, 2007). Les conséquences des paléofeux sur les communautés subalpines sont peu étudiées (Tinner *et al.*, 1996 ; Carcaillet, 1998) et la réactivité de ces systèmes dominés par *Pinus cembra* reste à élucider (Ali *et al.*, 2005). Deux modèles conceptuels expliquent le renouvellement et la résilience de l'écosystème, soit (i) le remplacement des espèces d'un stade successional au suivant (« modèle de remplacement floristique » [Clements, 1916]), soit (ii) une dynamique sans apparition d'espèces où seules les proportions entre espèces sont sujettes à variation temporelle (« modèle de composition floristique initiale » [Egler, 1954]).

<sup>1</sup> Centre de Bio-Archéologie et d'écologie (UMR5059 CNRS), Université Montpellier 2, Institut de Botanique, 163 rue Broussonet, F-34090 Montpellier, France.

<sup>2</sup> Paleoenvironnements et Chronoécologie, Ecole Pratique des Hautes Études (PALECO, EPHE), Institut de Botanique, 163 rue Broussonet, F-34090 Montpellier France.

<sup>3</sup> Centre d'études nordiques, Département de géographie, Université Laval, Québec G1K 7P4, Canada.



Dans les écosystèmes boréo-alpins, le régime des paléofeux dépend du climat, de la végétation présente et des pratiques sociétales (Carcaillet, 1998 ; Tinner *et al.*, 1999 ; Gobet *et al.*, 2003). En outre, le climat régit la fréquence des incendies sur le long terme au niveau régional (Carcaillet *et al.*, 2007). Ainsi, le début de l'Holocène, qui correspond au début de l'interglaciaire contemporain (11 200 ans calibrés avant le présent = 11 200 cal. BP), est marqué par une remontée importante (+ 4-5°C) et rapide des températures estivales et annuelles jusqu'à 10 000 cal. BP, puis progressif (+ 2°C) jusqu'à 6000 cal. BP (Davis *et al.*, 2003). Les glaciers régressent, les forêts s'établissent et les incendies se font plus fréquents. Puis, les températures moyennes estivales et hivernales décroissent de 0,5°C depuis 6000 ans (Davis *et al.*, 2003). À la faveur de ce réchauffement postglaciaire, les espèces tempérées recolonisent l'arc alpin et l'ensemble de l'Europe à partir de refuges situés pour l'essentiel dans les péninsules sud-européennes (Van der Knaap *et al.*, 2005 ; Figueiral et Carcaillet, 2005). Suivant le réchauffement climatique, les premiers groupes humains s'installent dans les Alpes (Vorren *et al.*, 1993). En Maurienne, on retrouve de très rares traces dès le Néolithique vers 7000 cal. BP et des traces d'abris et de bergerie dès l'âge du Bronze moyen, soit vers 4500 cal. BP (Thirault, 2004).

Le début de l'Holocène constitue donc une période optimale pour l'étude des changements soumis aux forçages naturels : la similarité du climat de 8000 à 4000 cal. BP avec celui prévu pour la fin du XXI<sup>e</sup> siècle et la faible présence humaine laissent à penser que les études relatives à cette période apporteraient des informations utiles pour mieux comprendre les processus associés aux changements globaux actuels (Kutzbach *et al.*, 1998), comme un accroissement du risque de feux (Flannigan *et al.*, 1998 ; Mouillot *et al.*, 2002).

Parmi les méthodes paléobotaniques, l'étude des macrorestes végétaux sub-fossiles révèle des faits survenus autour du milieu de dépôt (lac, tourbière). Parce que la source des restes végétaux est à peu près identique à celle des charbons de bois (maximum 100 m), l'analyse macrofossile à haute résolution de longues séries sédimentaires permet de déchiffrer le rôle des feux sur les communautés forestières. La présente étude, fondée sur des données de Saint-Michel-de-Maurienne (limite sud-ouest de la Vanoise), vise à répondre à cette question, en utilisant une analyse de macrorestes végétaux à haute résolution et en la comparant à l'enregistrement des charbons sédimentaires.

## 2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 2.1. Site d'étude

Le site étudié (lac du Thyl, 45°14'26"N, 06°29'60"E) se trouve au nord-est de Saint-Michel-de-Maurienne (Savoie, France), à 2 035 m d'altitude. C'est un petit lac (1 300 m<sup>2</sup>) à fond tourbeux, d'une profondeur d'eau de 55 cm. Il est situé sur le versant de la Vanoise exposé au sud-ouest, sur la rive droite de l'Arc dans la vallée de la Maurienne (Figure 1). Le climat de cette vallée est soumis à des influences continentales caractérisées par de faibles précipitations (<1000 mm.an<sup>-1</sup>) également réparties tout au long de l'année, avec des précipitations modérées en été et un couvert neigeux faible en hiver.

La végétation actuelle autour du lac est composée de pelouses très diversifiées à *Carex sempervirens* et *Festuca rubra*, couvertes de ligneux bas : genévrier (*Juniperus sibirica*), rhododendron (*Rhododendron ferrugineum*), myrtille (*Vaccinium myrtillus*) et airelle des marais (*V. uliginosum*). On observe quelques boisements de conifères plantés à des fins de stabilisation des pentes et de restauration des terrains entre la fin du XIX<sup>e</sup> et le début du XX<sup>e</sup> siècle.



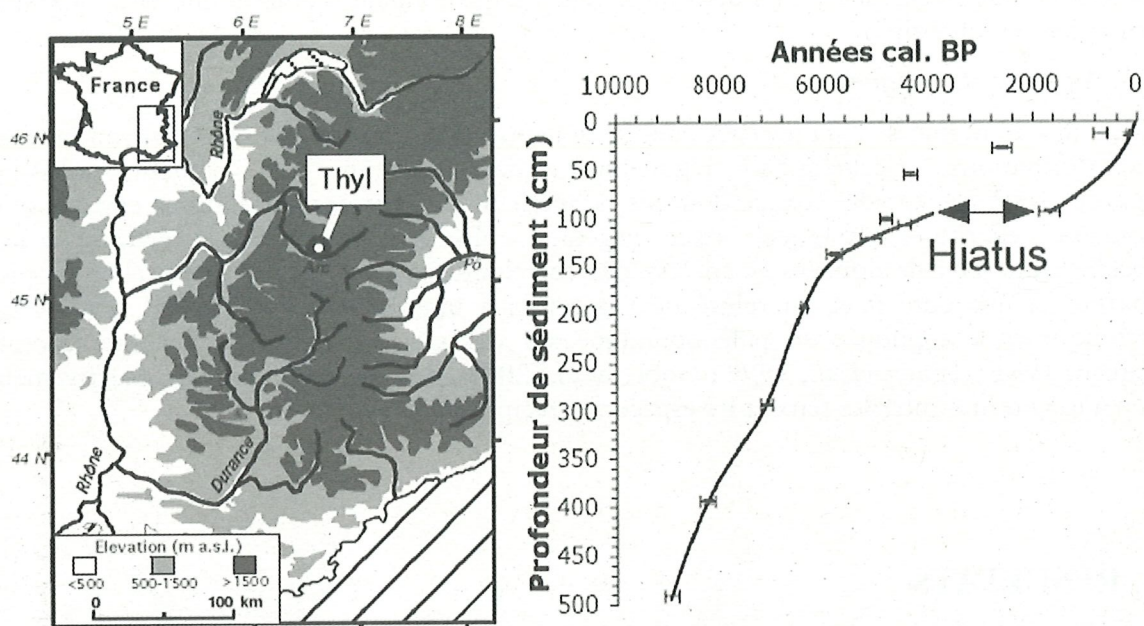


Figure 1. Carte de situation du site du lac du Thyl et distribution des âges au radiocarbone en fonction de la profondeur. Le modèle numérique âge/profondeur est illustré par la courbe construite à l'aide d'une fonction de lissage en interpolant les mesures au radiocarbone.

## 2.2. Forage

En mars 2004, nous avons foré en son centre le lac gelé. De telles conditions permettent de garantir une plate-forme stable pour le prélèvement et la qualité du forage. Le contact avec la roche sous-jacente fut atteint à 550 cm sous la surface de l'eau. La carotte sédimentaire représente une hauteur totale de 500 cm.

## 2.3. Traitement des prélèvements

Chaque carotte est découpée en tranches d'1 cm d'épaisseur, soit des échantillons de sédiments de 22 cm<sup>3</sup> environ, volume exact mesuré par déplacement d'eau dans un bécher. Chaque échantillon est alors soumis à un traitement chimique ultrabasique visant à séparer par défloculation la gangue sédimentaire des restes végétaux. Après tamisage ménagé à l'eau à travers une maille de 160 µm, les restes végétaux sont identifiés sous loupe binoculaire (×40). L'identification des différents restes est conduite par comparaison avec des collections de référence et par consultation des atlas de macrofossiles (ex. : Berggren, 1969 ; Schoch *et al.*, 1988) ou des bases de données de macrofossiles en ligne (ex. : BioImages; SeedID).

Pour les nomenclatures, il a été tenu compte des ambiguïtés relatives à l'identification (Birks et Birks, 1980) : les graines de bouleau, *Betula pendula* et *B. pubescens*, peu discernables, sont regroupées sous le taxon *Betula pendula/pubescens* ; certains restes ne sont identifiés qu'au genre et sont donc notés sp (*Betula* sp, *Rubus* sp, ...). Quand une indication supplémentaire a pu être obtenue, elle est indiquée (ex. : *Carex sectio vesicariae*). Quand une forte présomption, fondée sur des arguments indirects, a pu mener à une identification, l'espèce a été notée *cf.*, comme pour *Sorbus cf. aucuparia*.

## 2.4. Datations

Douze datations au <sup>14</sup>C ont été réalisées par spectrométrie de masse par accélération (SMA). Ces mesures ont été effectuées sur des restes végétaux terrestres dans la mesure du possible,



sinon sur du sédiment massif lorsque les restes végétaux manquaient de masse. Les datations au  $^{14}\text{C}$  ont permis de calculer un modèle numérique âge/profondeur servant à inférer un âge simulé pour chaque échantillon.

### 2.5. Analyses statistiques

Le jeu de données obtenu après analyse constitue une série temporelle, à savoir une suite « d'informations » s'échelonnant régulièrement dans le temps. Des méthodes statistiques appropriées à ce type de jeux de données permettent d'établir des corrélations entre le jeu de données « charbons » et le jeu « restes végétaux ». De plus, une méthode mettant en jeu le décalage des jeux de données (« analyse par corrélation croisée ») permet de relier un pic de charbon à une date  $n$  et un relevé de végétation à une date  $n+x$  (Chatfield, 1975). Cette technique déjà appliquée en paléobotanique sur des séries temporelles à haute résolution (Green, 1981 ; Tinner *et al.*, 1999 ; Gobet *et al.*, 2003) permet de déterminer objectivement le lien à long terme entre les feux et les espèces, et réciproquement.

## 3. RÉSULTATS

### 3.1. Chronologie et modèle d'âge

De 495 à 95 cm, les datations au radiocarbone sont distribuées de façon régulière et quasi linéaire (Figure 1). À partir de 95 cm, des problèmes de distributions des âges radiocarbone en fonction de la profondeur sont manifestes. Les mesures radiocarbone réalisées en surface traduisent un « vieillissement des dates ». L'examen des protocoles de mesure et surtout des matériaux datés laisse entrevoir un vieillissement, notamment pour les deux échantillons datés à partir de sédiments massifs. Les sols du bassin versant du lac du Thyl contiennent de la houille (grès et schistes houillers du Carbonifère). Dans ce cas, les mesures sur du sédiment massif nécessitent une extraction préalable du carbone organique total, ce qui n'a pas été réalisé par le laboratoire de service malgré les indications techniques fournies. De 94 cm vers la surface, l'appui d'une série de mesures au plomb radioactif ( $^{210}\text{Pb}$ ) a permis de forcer un modèle d'âge qui tient compte du facteur de compaction au fur et à mesure que la profondeur s'accroît.

Le modèle numérique âge/profondeur permet de simuler des âges aux profondeurs d'échantillonnage des macrorestes végétaux. De 495 à 95 cm, on obtient une chronologie de 8940 à 3900 cal. BP. De 95 à 0 cm, la chronologie couvre les derniers 1 700 ans (Figure 1). La chronologie montre que le changement sédimentaire observé à 213 cm au centre du lac (gyttja vers tourbe minérotrophe) n'affecte pas le rythme d'accumulation sédimentaire (Figure 1). Ce changement est daté à 6550 cal. BP.

### 3.2. Taxons identifiés

Vingt-et-un taxons différents ont été identifiés (Figure 2). Les restes sont principalement des graines, des aiguilles, des fragments de rameaux, des écailles d'inflorescences mâle et femelle (bouleau, aulne, pin cembro), des fleurs et différentes pièces florales, ainsi que des fruits. Les espèces arborescentes sont représentées par *Pinus cembra* (pin cembro), *Abies alba* (sapin pectiné), *Betula* sp. (bouleaux), *Sorbus cf. aucuparia* (sorbier des oiseleurs), *Alnus* sp. (aulnes) et *Acer* sp. (érables). Les buissons sont composés de *Rubus* sp. (ronce, framboisier) et *Vaccinium* sp. (myrtille, airelle des marais ou airelle rouge). Trois taxons aquatiques ou hygrophiles ont été observés, *Potamogeton* sp. (potamot), *Hippuris vulgaris* (pesse) et *Ranunculus* gr. *aquatilis* (renoncule aquatique). Les taxons restants sont des plantes dont la rareté ou l'absence de caractère spécifique ne permet pas le regroupement par affinité, et une spore de champignon ectomycorrhizien du sol, *Coenococcum geophilum*, typiquement associé aux arbres comme les conifères ou les bouleaux (Figure 2).

La transition sédimentaire observée à 213 cm, soit 6550 cal. BP, correspond à un changement notable des types d'assemblages (Figure 2). Les fragments de laîche, *Carex*



*canescens*, deviennent abondants, alors que ceux d'aulne, de pesse, de laïche *Carex sectio vesicariae* et de pin cembro se raréfient transitoirement. La disparition quasi-totale des fragments de pesse, espèce inféodée aux eaux libres, souligne un changement hydrologique du lac vers un entourbement. D'une façon générale, la richesse taxinomique est plus grande avant qu'après cette transition : tous les taxons identifiés sont présents avant, et 11 seulement le sont ultérieurement (Figure 2). Le bouleau est le seul taxon qui soit constant quantitativement sur l'intégralité de la carotte, suggérant que les conditions de sédimentation n'ont pas modifié son enregistrement (Figure 3).

### 3.3. Taxons à dynamique commune, corrélations générales

Une première série d'analyses (Analyse en Composantes Principales ou ACP, non figurée) montre que les différents descripteurs d'une même espèce traduisent la même histoire : écailles d'inflorescence et graines de bouleau, écailles et graines d'aulne, aiguilles, brachyblastes, inflorescences mâles et sacs polliniques de pin cembro, fleurs et graines de sorbier, fruits et périgynes de laïche. Par ailleurs, les chutes d'abondances de pin cembro et de laïche *Carex sectio vesicariae* sont concomitantes des pics de charbon de plus grande ampleur et plus rapprochés (Figures 2 et 3).

### 3.4. Rôle du feu sur les espèces subalpines

Les statistiques fondées sur les corrélations-croisées entre les relevés de macrorestes et de charbons ont permis de définir trois catégories d'espèces (Figure 4) :

#### a) Les taxons négativement corrélés après feu (pin cembro, laïche de la section *vesicaria* et pesse)

Le pin cembro est le principal combustible s'accumulant préalablement aux incendies (Figure 4). En effet, on observe que l'évènement « feu » (maximum d'accumulation de charbon de bois) est positivement corrélé à l'abondance de restes de pin cembro et qu'après ce maximum la quantité d'aiguilles de pin cembro diminue et ce, sur le long terme (environ 150 à 200 ans), mais sans jamais disparaître, ce qui suggère des feux de surface de faible sévérité et non des feux de couronne, ces derniers de nature létale. Ce résultat souligne une certaine interdépendance entre feu et pin cembro : la probabilité d'incendie augmente avec l'abondance du pin dont il régule la population en retour sans éliminer les individus. En outre les corrélations-croisées ne montrent aucune relation entre sacs polliniques et charbons, suggérant une indépendance entre feux et arbres reproducteurs. Les deux autres espèces sensibles au feu (*Carex sectio vesicariae*, *Hippuris vulgaris*) sont inféodées aux milieux humides, et leurs corrélations négatives aux phénomènes d'incendie sont peut-être liées aux changements dans le cycle des nutriments associés à la combustion de phytomasse générant une minéralisation importante lors des incendies, qui pourrait affecter la disponibilité en nutriments ou le pH des eaux (moins acides).

#### b) Les taxons favorisés par le feu (bouleau, érable et sapin pectiné)

La faible abondance du cembro après incendie laisse proliférer deux taxons, sapin pectiné (*Abies alba*) et érable (*Acer* sp.). Cependant, l'affinité du sapin pour le feu pourrait être uniquement un artefact (Figure 4). En effet, son abondance à cette altitude est faible. Il est également probable que l'occurrence d'aiguilles de sapin lors des pics de charbon soit liée au fait que des arbres sensibles au feu perdent massivement leurs aiguilles l'année suivant la perturbation, phénomène lié au stress engendré par la chaleur et la déshydratation. L'érable présente un profil différent. Les données semblent indiquer que ce taxon ne se répand de manière notable qu'immédiatement après l'incendie.

Les bouleaux sont également favorisés par le feu (Figure 4) ; ces résultats sont cohérents avec leur écologie : espèces héliophiles, adaptées aux perturbations en raison d'une bonne dispersion des graines et de rejets de souche, exigeantes en nutriments ne supportant guère la compétition. Avantage par des perturbations, ce taxon se maintient sur l'ensemble de la séquence sédimentaire, indiquant une excellente résilience en général et une indépendance au



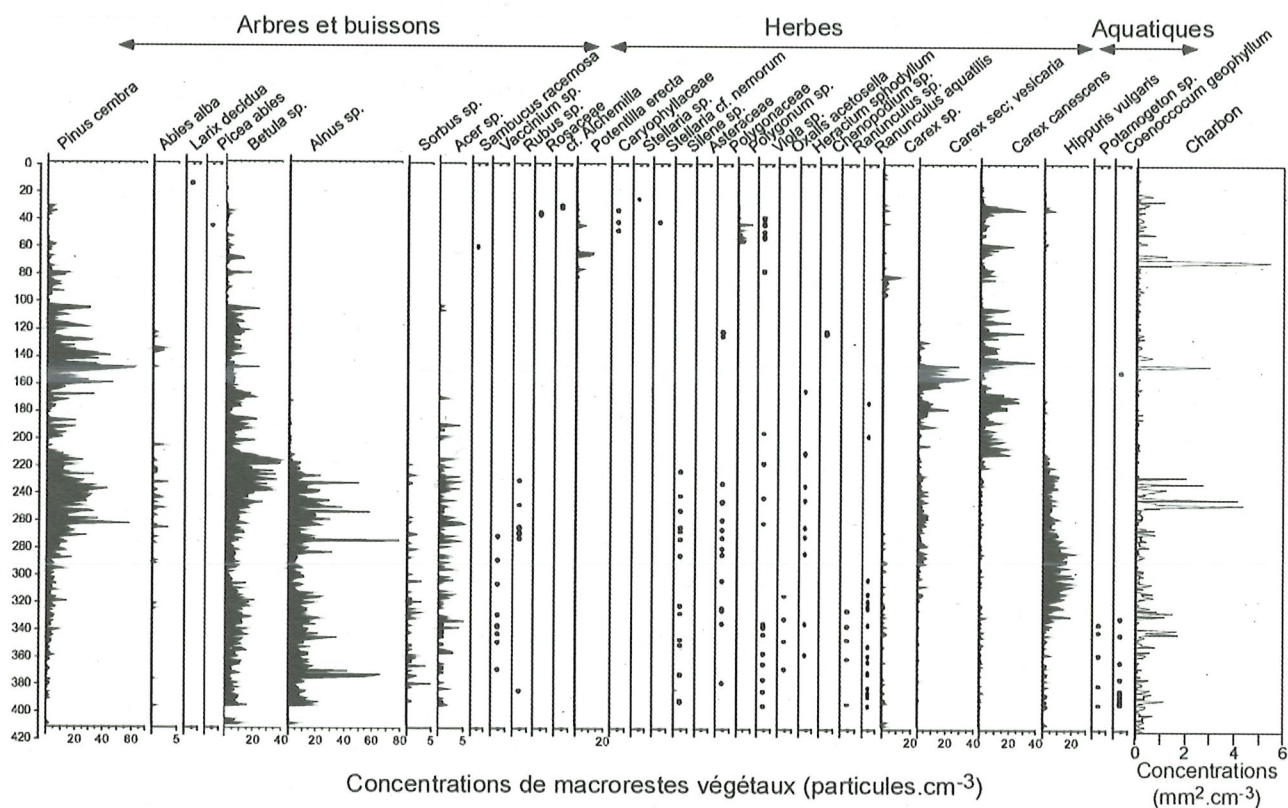


Figure 2. Diagramme des macrorestes végétaux et des charbons de bois distribués en fonction de la profondeur. Les valeurs sont exprimées en concentration de macrorestes (restes.cm<sup>-3</sup>) et de surface de charbon de bois (mm<sup>2</sup>.cm<sup>-3</sup>).

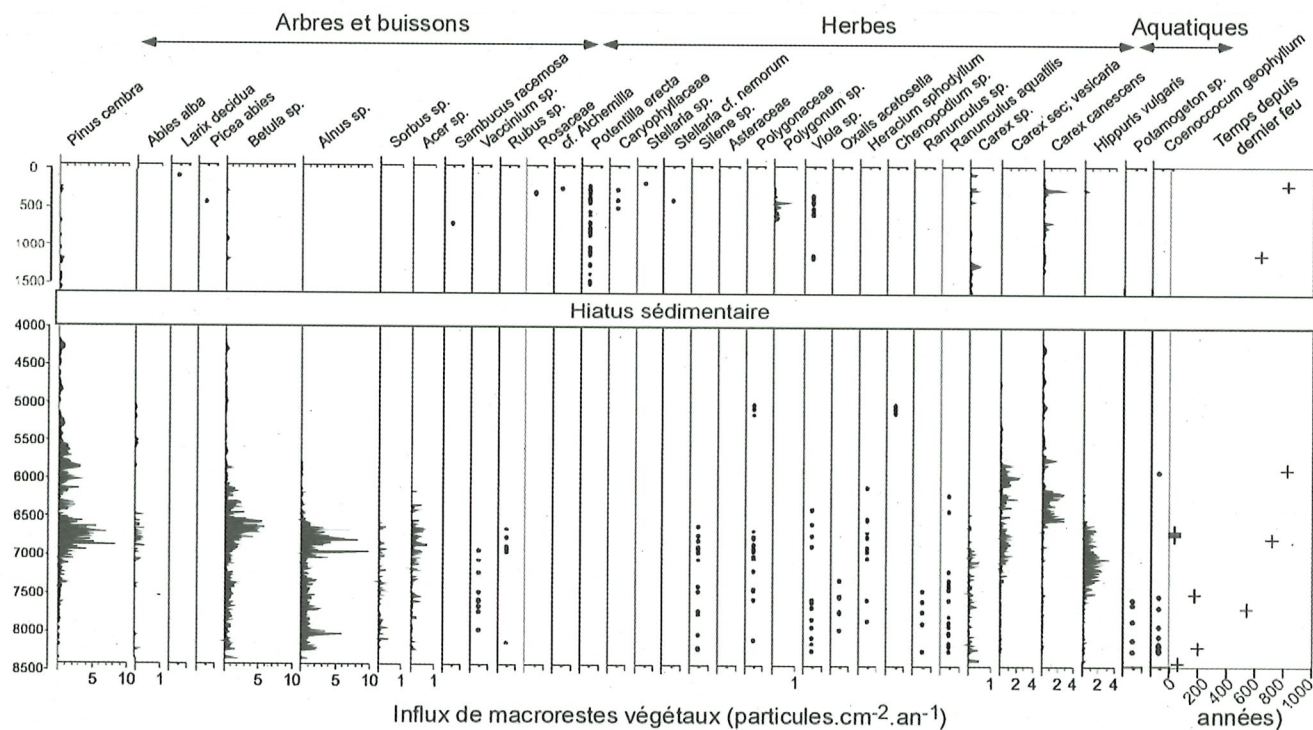


Figure 3. Diagramme des influx de macrorestes végétaux distribués en fonction de l'axe de temps déduit du modèle numérique âge/profondeur. Les données de feux sont exprimées en intervalles depuis le dernier feu.

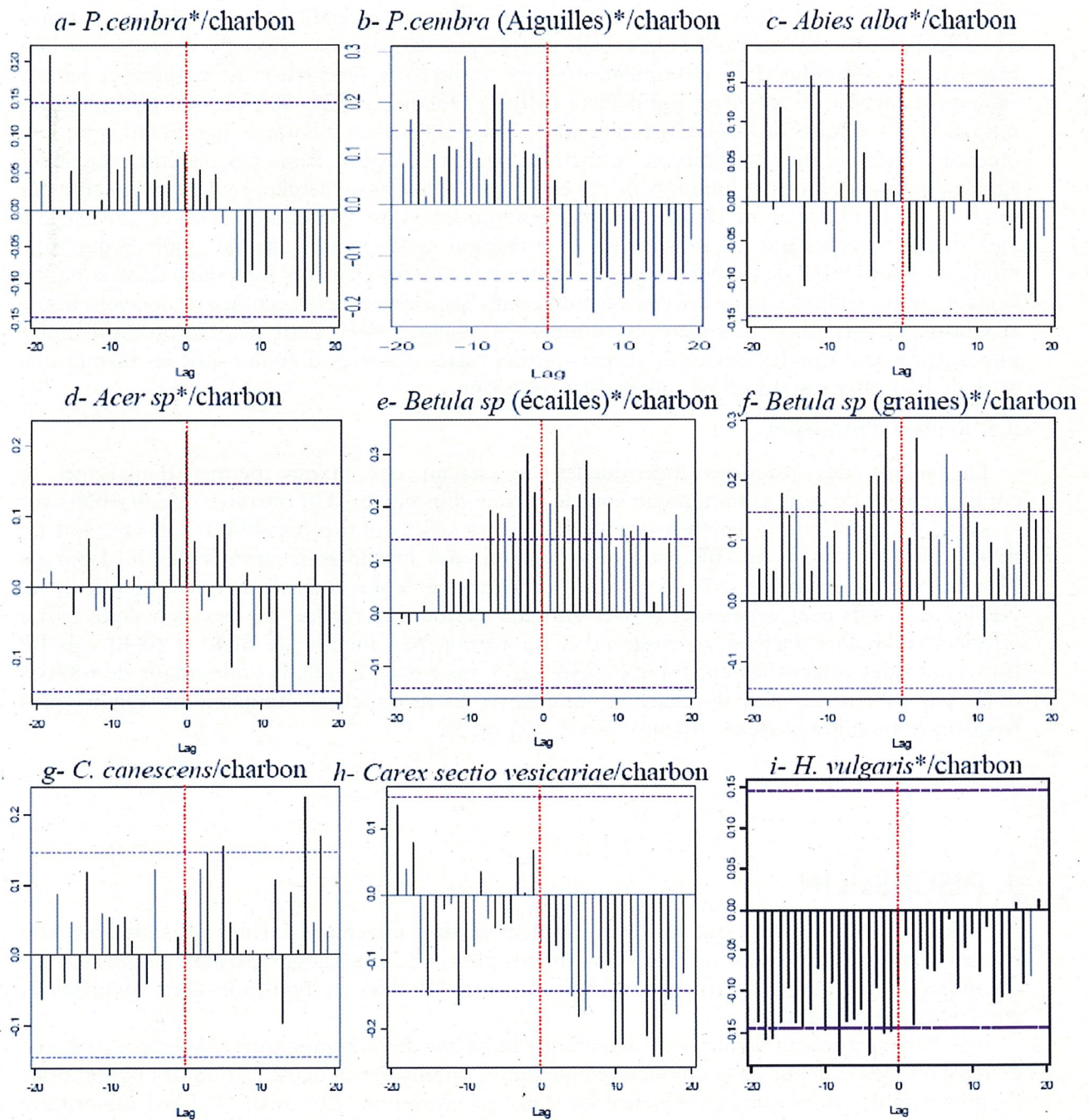


Figure 4. Corrélations-croisées d'indicateurs sélectionnés en relation avec la série sédimentaire de charbon.



regard des feux à intervalles courts (<50 ans) affectant la forêt de pins cembro entre 6820 et 6700 cal. BP, et à tout autre processus au cours de la période 6700-3900 cal. BP (Figure 3). De plus, les restes enregistrés (graines, écailles) sont adaptés à une dispersion par anémochorie. La mosaïque des perturbations, y compris chablis, attaque d'insectes et avalanches, à une échelle plus vaste que le pourtour du lac tourbeux pourrait expliquer aussi la quasi-constance des relevés de macrorestes pour cette espèce.

### c) Les taxons ne montrant pas de sensibilité au feu

Des taxons semblent insensibles aux incendies, soit parce qu'ils ne proviennent pas de zones proches du lieu de dépôt, ayant été transportés par le vent et/ou des animaux en provenance des pentes alentour, soit parce que leur écologie les rend plus ou moins insensibles au feu. Par exemple, les aulnes (*Alnus* sp.) semblent peu corrélés aux incendies. Ce résultat est *a priori* assez surprenant ; taxon boréo-alpin bien adapté aux basses températures, il assure un bon turnover des individus dans la population grâce à une forte production de graines, et semble également capable de régénérer rapidement (Moe et Odland, 1992). De plus, leur bois n'est pas inflammable. Autant de caractéristiques qui souligneraient un avantage significatif après un incendie, bien que nos résultats ne le mettent pas en évidence. Mais ces résultats suggèrent également que les facteurs limitants de ces espèces ne sont pas à chercher seulement du côté des incendies mais plutôt au niveau de variables édaphiques, voire climatiques. C'est ce que suggère leur disparition presque totale lors de la transition sédimentaire abrupte, qui traduit une modification notable de la dynamique des nutriments et des éléments minéraux dans le bassin versant. Aujourd'hui, l'aulne est peu commun dans les forêts de pins cembro, et souvent limité aux bords de torrents et de rivières (Gensac, 1974 ; Chas, 1994). Cette disparition est d'autant plus surprenante que les modes de dispersion des restes observés d'aulnes sont les mêmes que ceux de bouleaux restant stables après cette transition.

### 3.5. Régime d'incendies

La somme des réactions individuelles de chacun des taxons permet d'envisager le comportement de cette communauté sous le régime d'incendies. On retrouve des charbons sur la presque totalité de la partie basse de la carotte sédimentaire (de 494 à 230 cm, soit de 8940 cal. BP à 6550 cal. BP), ce qui indiquerait des incendies récurrents dès le début de l'Holocène, bien avant l'arrivée locale d'hypothétiques groupes de pasteurs et d'agriculteurs au Néolithique. On peut cependant diviser en deux périodes le régime des feux sur cette partie inférieure : la plus ancienne correspond à un régime peu intense de 8940 à 6840 cal. BP (moyennes des intervalles entre feux :  $236 \pm 235$  ans ;  $n = 9$ ), puis la zone allant de 6840 à 6700 cal. BP où les pics de charbon sont élevés et rapprochés, indiquant un régime plus fréquent (intervalles moyens : 40 ans ;  $n = 4$  ; Figure 3).

## 4. DISCUSSION

Nos résultats indiquent que les feux semblent surtout affecter les arbres du sous-bois, soit des feux de surface, peu sévères. De 70 à 100 ans plus tard, une catégorie d'âges de pins devant atteindre la maturité est théoriquement manquante. Érables et bouleaux sont favorisés et envahissent le peuplement.

Il se dessine ainsi un scénario de dynamique holocène des communautés associées au régime de feux où, dès le début de la colonne sédimentaire, on observe la densification des populations de pins cembro alors que la fréquence des feux est moyenne (236 ans). D'abord minoritaire dans des assemblages composés principalement de bouleaux et d'aulnes, le pin cembro prend progressivement de l'importance. Les premiers sacs polliniques s'observent environ 1 150 ans après les premières aiguilles, suggérant de faibles densités de pin reproducteur pendant très longtemps. Bien que le régime des feux soit soutenu dès le début de la séquence, le pin cembro



ne semble pas affecté, voire même favorisé. En effet, même si les jeunes pins sont éliminés par le feu, le pin cembro profite de cette ouverture pour se disséminer. Doté de grosses graines non ailées, il est disséminé presque exclusivement par le casse-noix moucheté (*Nucifraga caryocatactes*) qui constitue des réserves de graines dans des caches aménagées en milieu ouvert (pelouse alpine, prairie subalpine ou clairières). Les caches abandonnées sont à l'origine de la régénération du cembro en bosquets, puisque les caches contiennent généralement une dizaine de graines (Tomback *et al.*, 1993 ; Camaret *et al.*, 1998). Le même processus de facilitation par le feu, combiné à un oiseau vecteur de dispersion des graines, s'opère pour *Pinus albicaulis*, espèce jumelle, analogue et vicariante des Rocheuses américaines (Tomback *et al.*, 2001). Les incendies ouvrent l'espace, permettant l'installation intermittente d'érables et de sapins, mais aussi de bouleaux et d'aulnes qui maintiennent une population constante, utilisant les perturbations pour se disperser. L'érable n'envahit pourtant pas le milieu : favorisé par les trouées créées lors des incendies, il est cependant sensible aux feux et la diminution des intervalles entre deux feux limite son expansion (Tinner *et al.*, 2000). De plus, il est ici proche de sa limite altitudinale (Gensac, 1974 ; Carcaillet et Brun, 2000). En effet, l'érable sycomore (l'espèce d'érable le plus alticole, et le plus probable ici) ne croît que rarement au-dessus de 2 000 mètres d'altitude et la récurrence des incendies alliée aux conditions alticoles difficiles ne devait pas lui permettre de maintenir une population dense (Carcaillet et Brun, 2000). Ces observations suggèrent des feux éclaircissant périodiquement le sous-bois et éliminant les jeunes arbres ; l'espace libéré est immédiatement recolonisé par l'ensemble des espèces de la communauté, deux genres de manière transitoire (*Alnus*, *Acer*), les autres de manière permanente. Ce scénario de dynamique suggère que les communautés subalpines à pin cembro s'ajustent mieux au modèle de « composition floristique initial » (Egler, 1954) plutôt qu'au modèle « successional de remplacement floristique » (Clements, 1916).

L'accentuation du régime de feux (4 feux calculés en 130 ans, de 6820 à 6700 cal. BP, Figure 3), provoquée pour partie par la densification du peuplement de pins cembro qui entraîne un accroissement du matériel inflammable disponible (Figure 4), va entraîner la régression du peuplement de pins cembro par effet rétroactif : les jeunes pins ne régénèrent plus et laissent la place aux bouleaux. Avec la répétition des incendies, les individus censés régénérer la forêt sont systématiquement éliminés au profit d'espèces plus tolérantes aux perturbations, car rejetant de souche, disséminant abondamment leurs graines, et à court cycle de vie, y compris les espèces herbacées comme les *Carex*.

#### *Un scénario dynamique atypique*

Les données suggèrent une mise en place rapide des boisements de pins cembro (première occurrence vers 8500 cal. BP) à partir d'une végétation ligneuse composée principalement de bouleaux et d'aulnes. Avec la densification du peuplement de pins cembro, on n'observe pas de changement net de composition spécifique (Figure 2). La mise en place d'une cembraie mixte à bouleaux et aulnes tranche radicalement avec les modèles successionnels proposés en milieu subalpin en s'appuyant sur les forêts actuelles. Le cembro est décrit comme une espèce caractéristique du climax, qui reliaierait le mélèze (*Larix decidua*), espèce plus rapide à coloniser mais également défavorisée lors de la fermeture du milieu (Ozenda, 1985). Si ce processus s'observe en dynamique de post-déprise pastorale (Didier, 2001 ; Motta et Lingua, 2005), ce remplacement d'espèce n'a pas été observé ici, d'autant que le mélèze n'apparaît jamais, sinon en sommet de séquence sédimentaire (300 dernières années), et ce de façon très anecdotique, matérialisé par des fragments d'aiguilles. Par ailleurs, l'abondance des restes d'aulnes est remarquable : on les trouve constamment du bas de la carotte sédimentaire (8500 cal. BP) et abondamment jusqu'à 6640 cal. BP, ce qui suggère que les aulnes (*A. incana*, *A. viridis*) participent massivement à la composition naturelle des forêts subalpines. Après la transition sédimentaire de 6550 cal. BP, seuls subsistent bouleaux et érables rejoints ensuite par le cembro dont la quantité enregistrée de restes retrouve vers 5900 cal. BP, soit environ 600 ans plus tard, des niveaux équivalents à ce qui précède la chute. Les restes d'aulnes vont disparaître localement alors que les traits adaptatifs des aulnes sont proches de ceux des bouleaux qui, eux, restent constants ; seules de rares occurrences de graines et d'écales de



strobile laissent penser que les aulnes étaient toujours présents sans pour autant être abondants jusqu'à 3900 cal. BP. Ce nouvel assemblage est moins riche, moins diversifié à partir de 6500 cal. BP. Enfin, le remplacement d'une espèce de laîche par une autre est le signe d'un changement environnemental probablement d'ordre nutritionnel. Cette transition marque l'accélération brutale de l'atterrissement du lac par une tourbière minérotrophe, ce qui accroît l'impression d'un changement d'ordre géochimique dans le bassin versant.

## 5. CONCLUSION

Cette étude montre que le feu est un élément naturel et récurrent des écosystèmes subalpins, où il joue un rôle dans la mise en place holocène des forêts, mais aussi dans le fonctionnement des forêts subalpines à pin cembro, phénomène inobservable de nos jours en l'absence d'incendies. Il est ainsi manifeste que le feu n'est pas une perturbation néfaste aux écosystèmes subalpins. Seule une augmentation de la fréquence des incendies au-delà d'un seuil de régénération des espèces semble en mesure d'affecter les populations de pins cembro (*cf.* vers 6700 cal. BP). La dynamique naturelle des forêts de pins cembro n'implique pas la mise en place de stades successionnels avec remplacement d'espèces par d'autres, mais elle met en œuvre des phénomènes de variation de l'abondance relative des espèces en fonction du temps depuis la dernière perturbation. Cette étude montre qu'en utilisant des analyses sédimentaires à haute résolution, il est possible d'établir des corrélations précises entre feux et dynamiques végétales dans un écosystème subalpin. Ce type d'analyse permet d'accéder à des informations que les travaux d'écologie des communautés n'atteignent généralement pas en raison de la durée d'observation nécessaire (plusieurs dizaines d'années à plusieurs siècles).

**Remerciements.** Cette étude a bénéficié du soutien de l'Institut national des sciences de l'Univers (programme CONSECOL, ACI ECCO, responsable : C. Carcaillet). Les auteurs remercient B. Vannière et S. Ivorra pour leur aide précieuse lors du forage du lac.

## BIBLIOGRAPHIE

- Ali A.A., Carcaillet C., Talon B., Roiron P. et Terral J.F. (2005). *Pinus cembra* L. (arolla pine), a common tree in the inner French Alps since the early Holocene and above the present treeline: a synthesis based on charcoal data from soils and travertine. *J. Biogeogr.* 32 : 1659-1669.
- Berggren G. (1969). *Atlas of seeds and small fruits of Northwest-European plant species. Part 2, Cyperaceae.* Suède, Stockholm : Swedish Museum Natural History.
- BioImages. <http://www.bioimages.org.uk/>
- Birks H.J.B. et Birks H.H. (1980). *Quaternary Palaeoecology.* Londres : E. Arnold. VIII-289 p.
- Burel F., Baudry J., Clergeau P., Constant P. et Eybert M.C. (1992). Approche spatiale des phénomènes écologiques : échelles et hiérarchie. *Bull. Ecol.* 23 : 93-101.
- Camaret S., Guérin B. et Leclerc D. (1998). Impact of Nutcracker (*Nucifraga caryocatactes* L.) on the spatial distribution of Swiss Stone Pine (*Pinus cembra* L.) regeneration. *Bull. Soc. Zool. Fr.* 123(4) : 383-392.
- Carcaillet C. (1998). A spatially precise study of Holocene fire history, climate and human impact within the Maurienne valley, North French Alps. *J. Ecol.*, 86 : 384-396.
- Carcaillet C. (2007). Charred particles analyses. In : *Encyclopedia of Quaternary Science* / sous la dir. de S.A. Elias. Amsterdam ; Boston ; Paris : Elsevier. p. 1582-1593.



- Carcaillet C. et Brun J.J. (2000). Changes in landscape structure in the northwestern Alps over the last 7000 years: lessons from soil charcoal. *J. Veg. Sci.*, 11 : 705-714.
- Carcaillet C., Bergman I., Delorme S., Hörnberg G. et Zackrisson O. (2007). Long-term fire frequency not linked to prehistoric occupations in northern Swedish boreal forest. *Ecology*, 88 : 465-477.
- Chas E. (1994) *Atlas de la flore des Hautes-Alpes*. Gap : Conservatoire botanique national de Gap-Charance ; [Caussois] : Conservatoire des espaces naturels de Provence et des Alpes du Sud ; [Gap] : Parc national des Ecrins. 1 vol. (816 p.).
- Chatfield C. (1975). *The analysis of time series: theory and practice*. Londres : Chapman and Hall. 1 vol. (263 p.).
- Clements F.E. (1916). *Plant succession : an analysis of the development of vegetation*. Washington DC : Carnegie Institute. 512 p. (Publication ; 242).
- David F. et Barbero M. (2001). Les érables dans l'étage subalpine : une longue histoire. *C. R. Acad. Sci. Paris, Série Sci. Vie*, 324 : 159-164.
- Davis B.A.S., Brewer S., Stevenson A.C., Guiot J. et Data Contributors (2003). The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data. *Quat. Sci. Rev.*, 22 : 1701-1716.
- Didier (2001). Invasion patterns of European larch and Swiss stone pine in subalpine pastures in the French Alps. *For. Ecol. Manag.*, 145 : 67-77.
- Egler F.E. (1954). Vegetation science concepts. I. Initial floristic composition – a factor in old-field vegetation development. *Vegetatio*, 4 : 412-418.
- Figueiral I. et Carcaillet C. (2005). A review of Late Pleistocene and Holocene biogeography of highland Mediterranean pines (*Pinus* type *sylvestris*) in Portugal, based on wood charcoal. *Quat. Sci. Rev.*, 24 : 2466-2476.
- Flannigan M.D., Bergeron Y., Engelmark O. et Wotton B.M. (1998). Future wildfire in circumboreal forests in relation to global warming. *J. Veg. Sci.*, 9 : 469-476.
- Gavin D.G., Hallett D.J., Hu F.S., Lertzman K.P., Prichard S.J., Brown K.J., Lynch J.A., Bartlein P. et Peterson D.L. (2007). Forest fire and climate change in western North America: insights from sediment charcoal records. *Frontiers Ecol. Environ.*, 7 : 499-506.
- Gensac P. (1974). Catalogue écologique des plantes vasculaires du Parc national de la Vanoise et des régions limitrophes. *Trav. sci. Parc natl. Vanoise*, t. IV : 1-232.
- Gobet E., Tinner W., Hochuli P.A., van Leeuwen J.F.N. et Ammann B. (2003). Middle to Late Holocene vegetation history of the Upper Engadine (Swiss Alps): the role of man and fire. *Veget. History Archaeobot.*, 12 : 143-163.
- Green D.G. (1981). Time-series and post-glacial forest ecology. *Quat. Res.*, 15 : 265-277.
- Johnson E.A. (1992). *Fire and vegetation dynamics : studies from the North American boreal forest.*, Cambridge : Cambridge University Press. 129 p. (Cambridge Studies in Ecology).
- Kutzbach J., Gallimore R., Harrison S., Behling P., Selin R., Laarif F. (1998). Climate and biome simulations for the past 21,000 years. *Quat. Sci. Rev.*, 17 : 473-506.
- Moe D. et Odland A. (1992). The influence of the temperature climate on the vertical distribution of *Alnus incana* (Betulaceae) through the Holocene in Norway. *Acta Bot. Fenn.*, 144 : 35-49.
- Motta et Lingua (2005). Human impact on size, age, and spatial structure in a mixed European larch and Swiss stone pine forest in the Western Italian Alps. *Can. J. For. Res.*, 35 : 1809-1820.
- Mouillot F., Rambal S. et Joffre R. (2002). Simulating climate change impacts on fire frequency and vegetation dynamics in Mediterranean-type ecosystems. *Global Change Biol.*, 8 : 423-437.
- Ozenda P. (1985). *La végétation de la chaîne alpine dans l'espace montagnard européen*. Paris : Masson. 330 p.
- Schoch W.H., Pawlik B. et Schweingruber F.H. (1988). *Botanische Makroreste = Botanical macroremains = Macrorestes botaniques*. Berne : P. Haupt. 227 p. Textes en allemand, anglais et français.
- SeedID. [http://www.ag.ohio-state.edu/~seedbio/seed\\_id/index.htm](http://www.ag.ohio-state.edu/~seedbio/seed_id/index.htm)
- Thirault E. (2004). *Echanges néolithiques : les haches alpines*. Montagnac : M. Mergoïl. 468 p.-50 p. de pl. (Préhistoires ; 10). Texte remanié de Th. de doctorat : Histoire : Lyon 2 : 2001.
- Tinner W., Ammann B. et Germann P. (1996). Treeline fluctuations recorded for 12,500 years by soil profiles, pollen, and plant macrofossils in the Central Swiss Alps. *Arctic Alp. Res.*, 28 : 131-147.
- Tinner W., Hubschmid P., Wehrli M., Ammann B. et Conedera M. (1999). Long-term forest fire ecology and dynamics in southern Switzerland. *J. Ecol.*, 87 : 273-289.
- Tinner W., Conedera M., Gobet E., Hubschmid P., Wehrli M. et Ammann B. (2000). A palaeoecological attempt to classify fire sensitivity of trees in the southern Alps. *Holocene*, 10 : 565-574.
- Tomback D.F., Holtmeyer F.K., Mattes H., Carsey K.S. et Powell M.L. (1993). Tree clusters and growth form distribution in *Pinus cembra* a bird disperse pine. *Arct. Alp. Res.*, 25 : 374-381.



PARC NATIONAL DE LA VANOISE

- Tomback D.F., Arno S.F. et Keane R.E. (2001). *Whitebark Pine Communities : ecology and restoration*. Washington, DC : Island Press. 440 p.
- Van der Knaap W.O., van Leeuwen J.F.N., Finsinger W., Gobet E., Pini R., Schweizer A., Valsecchi V., Ammann B. (2005). Migration and population expansion of *Abies*, *Fagus*, *Picea*, and *Quercus* since 15000 years in and across the Alps, based on pollen-percentage threshold values. *Quat. Sci. Rev.*, 24 : 645-680.
- Vorren K.D., Morkved B. et Bortenschlager S. (1993). Human impact on the Holocene forest line in the Central Alps. *Veget. History Archaeobot.*, 2 : 145-156.
- Whelan R.J. (1995). *The ecology of fire*. Cambridge : Cambridge University Press. 346 p. (Cambridge studies in ecology).

## IMPACT DES FEUX SUR LA RICHESSE ET LA DYNAMIQUE DES COMMUNAUTÉS FORESTIÈRES SUBALPINES EN VANOISE

par Aurélie Genries<sup>1,2,3</sup> et Christopher Carcaillet<sup>1,2</sup>

**Résumé.** Des analyses de charbons de bois, et de pollen et de spores ont été réalisées sur les sédiments d'un petit lac tourbeux des Alpes de Savoie, afin d'estimer l'impact à court terme des feux holocènes sur la végétation forestière subalpine. L'analyse en continu des mésocharbons a permis de mettre en évidence l'occurrence de 17 feux depuis 9 000 ans. Quatre feux majeurs ont été sélectionnés dans deux situations différentes en terme de fréquence de feux. Les dynamiques végétales ont été reconstituées à haute résolution avant et après ces feux. L'étude de différents paramètres (nature de végétation brûlée, richesse pollinique) a mis en évidence que des incendies isolés durant des périodes à faible fréquence de feux de végétation ont influencé la dynamique forestière subalpine au cours de l'Holocène, ce qui n'a pas été observé lors de feux se produisant en période de haute fréquence, suggérant que ces écosystèmes forestiers étaient en équilibre avec l'occurrence des feux.

**Mots-clés :** Paléoécologie - Feu - Perturbations - Biodiversité - Holocène - Palynologie - Charbons de bois - Maurienne (Savoie).

**Impact of fires on the richness and dynamic of subalpine forest ecosystems in Vanoise**

**Key-words :** Paleocology - Fire - Disturbances - Biodiversity - Holocene - Palynology - Wood charcoals - Vanoise Mountains (France) - Maurienne (France).

### INTRODUCTION

Le réchauffement climatique en cours (Jones *et al.*, 2001 ; Dufresne *et al.*, 2002) et les changements de modes de précipitation (Pal *et al.*, 2004 ; Sheffield et Wood, 2008) pourraient influencer les régimes de feux dans les décennies à venir (Grissino-Mayer et Swetnam, 2000 ; Flannigan *et al.*, 2005). De plus, l'abandon des pratiques agricoles dans le sud de l'Europe depuis la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle a conduit à un accroissement du stock de combustible et à une augmentation de la connectivité des massifs forestiers (Roche *et al.*, 1998 ; Chauchard *et al.*, 2007). Dans ce contexte de hausse du risque de feu, cette reconquête des milieux par la végétation soulève la question de leur sensibilité et de leur mode de réponse. Un changement du régime des perturbations pourrait effectivement altérer l'intégrité des écosystèmes, et donc modifier leurs modalités de réponse aux perturbations naturelles (Schumacher et Bugmann, 2006). De plus, des siècles de suppression des forêts et de climat non propice aux feux ont conduit à un manque de connaissances sur l'impact du feu vis-à-vis des écosystèmes de montagne. Pourtant, le feu semble avoir été la perturbation naturelle principale ayant influencé les dynamiques végétales pendant l'Holocène dans les Alpes (Vorren *et al.*, 1993 ; Wick, 1994 ; Tinner *et al.*, 1996 ; Carcaillet, 1998). Les données anthracologiques (charbons de bois dans les

<sup>1</sup> Centre de Bio-archéologie et d'écologie (UMR5059 CNRS), Université Montpellier 2, Institut de Botanique, 163 rue Broussonet, F-34090 Montpellier, France.

<sup>2</sup> Paléoenvironnements et chronoécologie (PALECO EPHE), École Pratique des Hautes Études, Institut de Botanique, 163 rue Broussonet, 34090 Montpellier, France.

<sup>3</sup> Institut des Sciences de l'Évolution (UMR5554 CNRS), Université Montpellier 2, place Eugène Bataillon, Case 061, 34095 Montpellier cedex 05, France.

Correspondance : aurelie.genries@univ-montp2.fr



sols ou les sédiments) attestent l'existence d'incendies anciens dans les écosystèmes de haute montagne (Tessier *et al.*, 1993 ; Carcaillet *et* Thinson, 1996 ; Talon *et al.*, 1998 ; Carnelli *et al.*, 2004 ; Ali *et al.*, 2005).

La plupart de ces travaux a étudié le rôle à long terme des feux (Genries *et al.*, 2009b), et a notamment révélé la présence de communautés ligneuses à plus de 2 500 m d'altitude (Carcaillet *et al.*, 1998 ; Talon *et al.*, 1998 ; Carnelli *et al.*, 2004). La limite supérieure des arbres a ainsi baissé d'au moins 150 m dans le Briançonnais (Nakagawa *et al.*, 2000), et de 300 m environ en Savoie (Carcaillet *et al.*, 1998), dans le Queyras (Talon *et al.*, 1998 ; Ali *et al.*, 2005) et dans les Alpes suisses (Tinner *et al.*, 1996). La structure de cette limite a également été modifiée : dans le massif de la Vanoise, la zone de combat (écotone entre les étages subalpin forestier et alpin asylvatique) constituait probablement une limite supra-forestière plus étendue qu'actuellement (Carcaillet et Brun, 2000).

L'influence à court terme des incendies sur la composition de la végétation forestière n'est pas connue, dans les Alpes françaises en particulier. L'objectif du travail présenté est de mettre en évidence cette influence dans le passé, sur des durées de quelques décennies, en comparant des analyses en haute résolution des charbons de bois et du pollen. Les charbons de bois permettent de reconstruire l'histoire des feux, et les grains de pollen donnent accès aux changements de la végétation passée. Ces analyses ont été réalisées sur les sédiments d'un petit lac tourbeux subalpin dans la vallée de la Maurienne (Savoie, France).

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Site d'étude

Le lac du Thyl (45°14'26"N, 06°29'59"E ; 2 038 m d'altitude) est un petit lac tourbeux (1 300 m<sup>2</sup>) avec un bassin versant réduit (<10× surface lac). Le lac, de 50 cm de profondeur d'eau, n'a pas d'affluent et présente un petit effluent intermittent. Il a été précédemment étudié sous le nom de Pré Bérard par David et Barbero (2001) et Muller *et al.* (2006). Il est situé sur la commune de Saint Michel-de-Maurienne (Savoie), dans la haute vallée de la Maurienne. Cette vallée est l'une des plus sèches de l'arc alpin. Son régime d'aridité saisonnière est du type continental européen (Fournier, 1985).

L'étage subalpin supérieur, au sein duquel le lac se situe, est généralement dominé par une végétation majoritairement composée de conifères (*Pinus cembra*, *Larix decidua*, *Picea abies*) et d'Ericaceae (*Vaccinium uliginosum*, *V. vitis-idaea*, *V. myrtillus*, *Rhododendron ferrugineum*) (Bartoli, 1966 ; Gensac, 1972). Au XVIII<sup>ème</sup> siècle, le territoire de Saint-Michel-de-Maurienne était presque totalement déboisé jusqu'à la déprise agricole de la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle. Aujourd'hui, la végétation environnant le lac est pâturée par des moutons, des vaches et des chevaux de juin à octobre. Elle est constituée de prairies subalpines à *Carex sempervirens* et *Festuca rubra*, et quelques ligneux bas tels que *Juniperus sibirica*, *Rhododendron ferrugineum*, *Cotoneaster integerrima*, *Vaccinium myrtillus* ou *V. uliginosum*.

### Prélèvement des sédiments

Un « carottier russe » (Jowsey, 1966) hémicirculaire muni d'une chambre de prélèvement de 1000 × 75 mm a été utilisé pour le prélèvement des sédiments. Quatre carottes ont été extraites, et l'analyse a été menée sur la plus longue d'entre elles (495 cm).



## Datations et modèle d'âge

La chronologie est basée sur une série de mesures au  $^{210}\text{Pb}$  et 12 datations  $^{14}\text{C}$  par AMS réalisées sur des macrorestes terricoles ou sur du sédiment brut. Les âges  $^{14}\text{C}$  (années BP = *before present*) ont été étalonnés à l'aide du logiciel Calib 5.0 (Stuiver et Reimer, 1993). Les âges calibrés (années cal. BP) ont été réunis par une courbe lissée pour construire un modèle d'âge-profondeur permettant d'affecter par interpolation un âge à chaque échantillon (Figure 1).

## Analyse des charbons

Des volumes de  $1\text{ cm}^3$  ont été extraits en continu le long de la carotte pour quantifier les charbons après défloculation et tamisage ménagé à l'eau du sédiment. Le protocole est basé sur la défloculation des sédiments dans une solution à 3 % de  $\text{NaP}_2\text{O}_4$  (métaphosphate de sodium), et leur tamisage à travers une maille de  $160\ \mu\text{m}$ , ce qui garantit l'origine locale ( $<500\text{ m}$ ) des particules de charbon (Higuera *et al.*, 2005). Les charbons ont été comptés sous loupe binoculaire à  $\times 40$ , et classés selon leur taille à l'aide d'un quadrillage de  $10\times 10$  carrés, ayant chacun une surface de  $0,0625\text{ mm}^2$ . Huit catégories de surfaces de mésocharbon ont été définies sur un gradient exponentiel. Les quantifications de charbon ont alors été reportées en concentrations ( $\text{mm}^2.\text{cm}^{-3}$ ). Le modèle âge-profondeur issu des datations a ensuite été appliqué à ces concentrations afin d'estimer le taux d'accumulation de charbon (TAC,  $\text{mm}^2.\text{cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$ ). Les séries de TAC ont été transformées en séries à pas de temps constant (20 ans) en utilisant le programme CHARSTER (Gavin *et al.*, 2006). Enfin, les séries de charbon ont été détendancées afin de reconstruire les événements de feu sur une base statistique (Carcaillet *et al.*, 2009).

## Analyse pollinique

L'analyse pollinique a été réalisée dans le but d'obtenir une résolution de 100 ans sur l'ensemble de l'Holocène. Une analyse à haute résolution temporelle a été effectuée autour des quatre feux reconstruits, en échantillonnant le sédiment en continu (tous les centimètres). Ceci a permis de reconstituer la composition de la végétation avant le feu et sur des périodes de 60 à 280 années après feu (dépendamment du taux de sédimentation). Les sommes polliniques minimales sont de 500 grains sur l'ensemble de la carotte, et de 250 grains sur les zones analysées en haute résolution autour des feux. Les identifications polliniques ont été basées sur des atlas (Reille, 1995-1999) et sur la collection de référence de l'Institut des sciences de l'évolution de Montpellier. Les pourcentages polliniques ont été calculés sur la base d'une somme excluant les espèces aquatiques (ex. *Hippuris*, *Potamogeton*), les Cyperaceae et les spores de Ptéridophytes (Berglund et Ralska-Jasiewiczowa, 1986).

## Traitement des données

Du fait de différents paramètres propres à chaque espèce (importance de la banque de graines, vitesse de germination des graines, disponibilité des ressources, compétition, ...), chaque espèce ne réagit pas de la même façon après le passage d'un feu, et il est attendu qu'une dynamique végétale se mette en place (Tinner *et al.*, 1999). Pour le vérifier, des analyses statistiques ont été effectuées afin de tester la significativité des éventuels changements du pourcentage de ligneux et du nombre de taxons polliniques avant et après feu. Un test *t* de Student a été réalisé sur les moyennes pré- et post-feu afin de vérifier le degré de différence entre les valeurs.

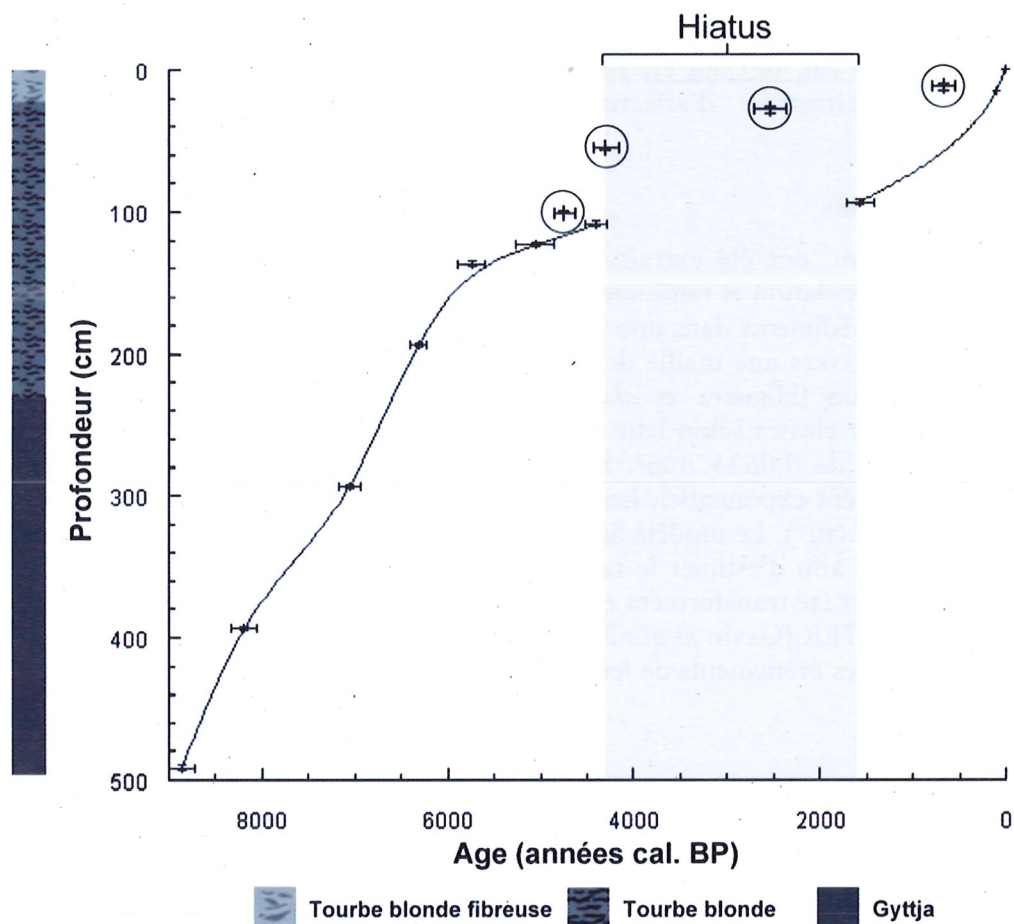


Figure 1. Modèle âge/profondeur des sédiments du lac du Thyl.  
 Les cercles indiquent les dates qui n'ont pas été prises en compte dans la construction du modèle.  
 Période manquante correspond à un hiatus sédimentaire inexplicé.

## RÉSULTATS

### Cadre chronologique et reconstitution des feux

Le modèle âge-profondeur (Figure 1) couvre près de 9 000 ans et présente un hiatus entre 3900 et 1600 ans cal. BP. Les influx de charbon (Figure 2a) indiquent deux phases majeures: (1) entre 9000 et 6600 ans cal. BP, avec un influx de charbon élevé, et (2) de 6600 ans cal. BP à l'actuel, avec un faible influx.

Au total, 17 feux ont été identifiés, avec des intervalles entre feux compris entre 30 et 1 930 ans (Figure 2b). Les deux phases mises en évidence présentent des intervalles moyens entre feux très différents: la première est caractérisée par une haute fréquence de feux (intervalle moyen de  $173 \pm 61$  ans), et la seconde par une basse fréquence, avec seulement 3 feux en 6 600 ans (Figure 2b).



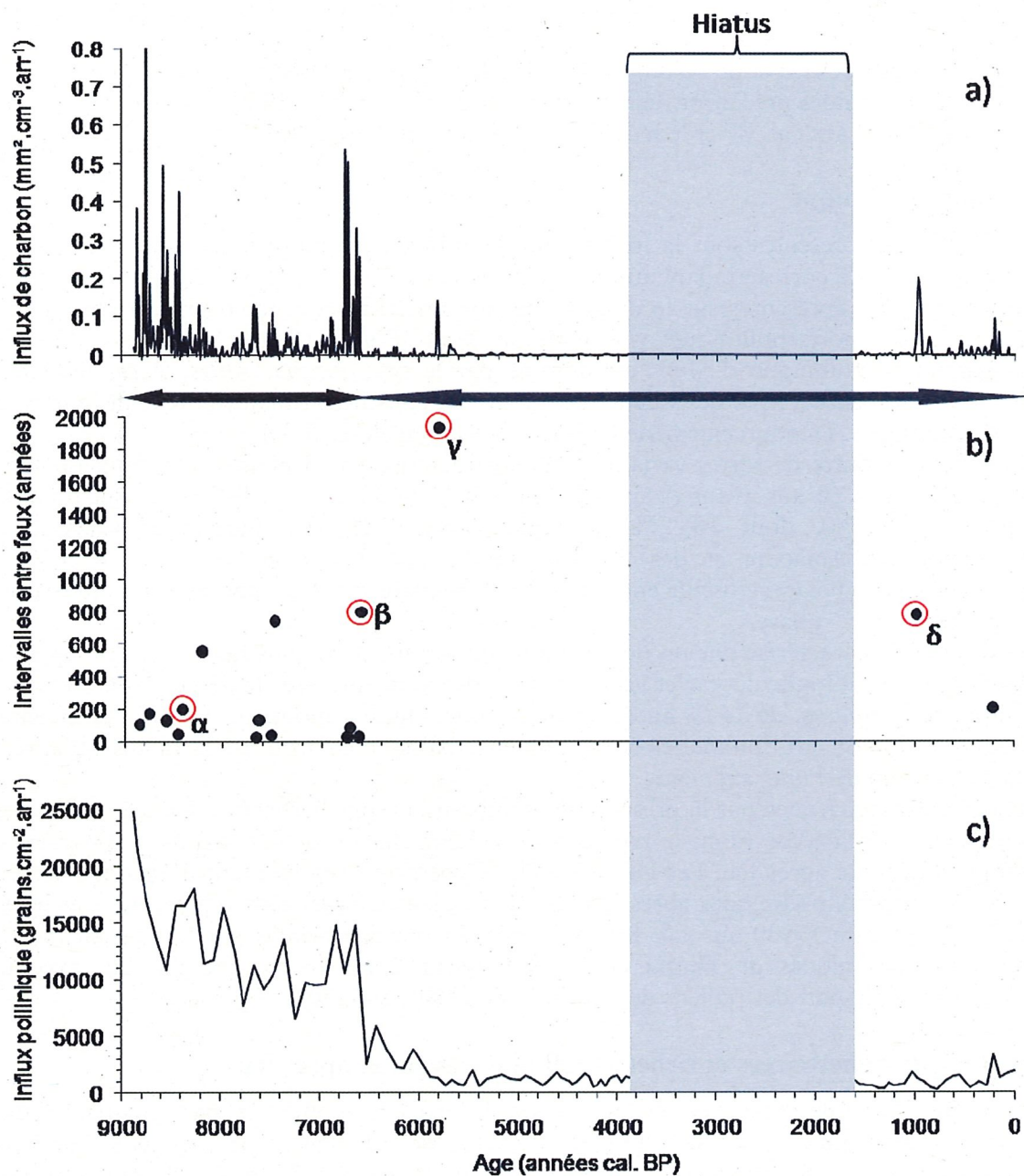


Figure 2. Influx de charbon (a), intervalles entre les feux (b), influx pollinique (c) au lac du Thyl. La zone grisée correspond au hiatus sédimentaire.

Afin d'étudier la dynamique post-feu selon des fréquences d'incendie variées, quatre feux ont été sélectionnés:  $\alpha$  et  $\beta$  dans la partie inférieure de la séquence sédimentaire ;  $\gamma$  et  $\delta$  dans la partie supérieure. Les feux  $\alpha$  et  $\beta$  interviennent chacun à la fin d'une série d'incendies espacés d'environ 140 ans pour  $\alpha$  et de 70 ans pour  $\beta$ . Les feux  $\gamma$  et  $\delta$  ne sont précédés d'aucun incendie dans les 500 ans qui les précèdent. Le feu  $\alpha$  est daté à 8410 ans cal. BP, le feu  $\beta$  à 6600 ans cal. BP, le feu  $\gamma$  à 5810 ans cal. BP et le feu  $\delta$  à 970 ans cal. BP (Figure 2b).

### Diagramme pollinique

Les résultats sont présentés sous la forme d'un diagramme en pourcentages, où figurent les 4 séquences  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  et  $\delta$  correspondant aux feux des mêmes noms (Figure 3). 32 taxons sur les 106 identifiés, ont été représentés sur le diagramme simplifié. La séquence  $\alpha$  présente très peu de variations. Les apports polliniques y sont dominés par *Pinus* ( $18 \pm 1$  %) et *Alnus* ( $17 \pm 1$  %). L'enregistrement pollinique d'*Alnus* est dominé par le type *incana*. *Abies*, *Acer*, *Betula*, les Apiaceae et les Poaceae, avec des valeurs de 5 à 10 %, constituent majoritairement le reste des apports polliniques. Le pourcentage de Cyperaceae est peu élevé (5 %).

La séquence  $\beta$  montre de fortes variations et se caractérise par 3 phases. Les deux premières correspondent aux 20 ans avant et après le feu, daté à 6600 ans cal. BP. Elles sont dominées par *Pinus* ( $37 \pm 1$  %), dont  $10 \pm 1$  % de *Pinus cembra*. Le feu marque une hausse des pourcentages des Apiaceae et des Poaceae, tandis que *Betula* passe de 10 à 5 %. Le pourcentage des Cyperaceae oscille entre 5 et 10 % pendant ces deux phases, alors qu'il atteint 40 % pendant la 3<sup>ème</sup> phase.

La séquence  $\gamma$  se caractérise par un nombre plus important de taxons herbacés. Les Apiaceae, les Asteraceae, les Ranunculaceae et les Poaceae se développent après le début du feu. L'apport pollinique de *Juniperus*, de 15 % au début de la zone, chute à moins de 1 %. Le pourcentage pollinique de *Pinus*, qui domine les autres ligneux, baisse d'environ 20 % tandis qu'après le feu, la proportion de *Pinus* augmente.

La séquence  $\delta$  est marquée par la présence de nombreux taxons herbacés : Rosaceae, *Plantago*, Cannabinaceae et Poaceae (dont le type céréales). Pour chacun de ces taxons, le pourcentage pollinique augmente après feu. Les Poaceae et les Cyperaceae représentent, respectivement, 10 et 30 % des apports polliniques après le feu  $\delta$ . Les aulnes (*Alnus*) sont représentés par le type *viridis* alors qu'avant 6500 ans cal. BP ils étaient surtout représentés par le type *incana*. Les pourcentages polliniques de *Betula* et *Pinus* baissent après le passage du feu, avec une augmentation de la part des pollens de pins indifférenciés pendant la séquence.

### Rapport ligneux-herbacées et richesse pollinique avant et après feu

La moyenne du pourcentage en ligneux avant les feux  $\alpha$  et  $\beta$  n'est pas significativement différente de celle qui est observée après ces feux (Tableau I). Par contre, les feux  $\gamma$  et  $\delta$  sont associés à une baisse significative du pourcentage de ligneux de 7,7 et 9,3 % respectivement (test  $t$  ;  $p = 0,01$ ). Pour ce qui est de la séquence sédimentaire entourant le feu  $\beta$ , seuls les 3 niveaux post-feu ont été intégrés dans les calculs. En effet, le passage du lac en tourbière à 228 cm de profondeur correspond à une modification du mode d'enregistrement du site et aurait pu biaiser les résultats.

La richesse pollinique (nombre de taxons) n'a pas varié de façon significative entre la période avant et celle après les feux  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  (Tableau I). Par contre, une moyenne de 34,0 taxons est observée avant le feu  $\delta$ , tandis qu'elle est de 39,6 après (au profit des taxons herbacés; Figure 3), ce qui constitue une différence significative (test  $t$  ;  $p = 0,01$ ).







Feux étudiés	Moyenne		t calculé	t limite	Significativité
	Avant	Après			
Moyenne des pourcentages de ligneux (abondance relative)					
$\alpha$	69,7	67,8	1,769	2,093	ns
$\beta$	80,6	81,8	0,926	2,776	ns
$\gamma$	84,4	76,7	6,595	2,145	**
$\delta$	66,6	57,4	7,558	2,145	**
Moyenne du nombre de taxons polliniques avant et après feux (richesse)					
$\alpha$	32,3	32,1	0,291	2,093	ns
$\beta$	28,0	28,7	0,650	2,776	ns
$\gamma$	33,3	31,2	2,022	2,145	ns
$\delta$	34,0	39,6	4,389	2,145	**

Tableau I. Tests t de Student de significativité des différences de moyennes des pourcentages de ligneux et du nombre de taxons polliniques avant et après les incendies (ns = non significatif ; \* significatif  $p=0,05$  ; \*\* significatif  $p=0,01$ ).

## DISCUSSION

### Impact des feux sur la structure de la végétation

Le feu, considéré comme facteur de destruction totale ou partielle de biomasse (Grime, 1977), est à l'origine de profonds bouleversements des communautés mixtes montagnardes dans le Tessin (Suisse), avec la mise en place de successions secondaires (Tinner *et al.*, 1999). Nos données ne mettent pas en évidence de tels changements de végétation entre les quatre séquences sélectionnées. Bien que cette absence de résultat puisse être liée aux échelles de perception différentes des données polliniques et anthracologiques, il suggère que les feux subalpins n'ont pas systématiquement conduit à une destruction significative de la biomasse locale conduisant à modifier durablement les communautés subalpines.

Toutefois, certains résultats apparaissent significatifs. Les feux  $\alpha$  et  $\beta$  sont survenus dans des environnements semblables composés par *Pinus cembra*, *Betula*, *Alnus* type *incana*, *Acer* et *Abies* (Figure 3), à la fin de périodes marquées par de fortes fréquences de feux ( $173 \pm 61$  ans en moyenne; Figure 2b). Les végétations qui précédaient les feux  $\alpha$  et  $\beta$  comprenaient des feuillus pionniers ou post-pionniers (*Betula*, *Alnus*, *Acer*; Figure 3) révélant la persistance d'un environnement perturbé (David et Barbero, 2001). L'occurrence de ces incendies semble ne pas avoir influencé de manière significative la végétation, ce qui indique son importante résilience. Ceci peut expliquer qu'aucune réaction type de la végétation au feu n'ait été mise en évidence à l'aide de la séquence pollinique à basse résolution (100 ans) ni même avec les séquences à haute résolution (continu pré- et post-feu).

Les feux  $\gamma$  et  $\delta$  sont survenus après de longues périodes sans feux ( $\geq 790$  ans). Les communautés végétales autour du site n'étaient probablement plus résilientes aux feux. La chute des pourcentages polliniques des taxons ligneux (Figure 3), et l'accroissement des pourcentages du pollen non arboréen (Tableau I) pourraient donc être interprétés comme traduisant des modifications structurelles du milieu. En effet, le feu  $\gamma$  a eu lieu dans une végétation fermée dominée par *Pinus cembra* (Figure 3). Sachant qu'il faut parfois 120 ans avant qu'un pin cembro commence à produire du pollen en abondance (Contini et Lavarello, 1982), on peut penser que le feu  $\gamma$  daté de 5810 ans cal. BP ait été très destructeur. Toutefois, le feu  $\gamma$  apparaît ne pas avoir modifié la structure forestière du milieu environnant, puisque les résultats ne



montrent pas d'augmentation de la richesse pollinique pour le feu  $\gamma$ , alors qu'elle a été mise en évidence pour le feu  $\delta$ . Ce dernier est survenu dans un milieu ouvert, marqué par une forte représentation des taxons herbacés. Les taxons apparus après le feu  $\delta$  sont pour la majorité liés à l'accroissement des pratiques agropastorales, comme Cannabinaceae, *Plantago*, Rosaceae ou céréales (Behre, 1981). Ceci correspond probablement à un développement des activités humaines au niveau de la vallée, et suggère un lien entre le feu et des pratiques agropastorales. Par ailleurs, la courbe de l'influx de charbon laisse supposer que l'événement de feu  $\delta$  a été le plus sévère et/ou le plus proche, puisqu'il s'étale sur 3 niveaux, c'est-à-dire sur environ 50 ans (Figure 2a).

### Évaluation de la nature des feux

Bien que les feux  $\gamma$  et  $\delta$  soient associés à des régressions significatives du pourcentage pollinique de certains taxons ligneux (Tableau I), la majorité de ces ligneux a continué à polliniser dans les décennies qui ont suivi les incendies, le pourcentage de ligneux enregistré demeurant supérieur à 50 %. Ceci suggère que ces feux ont affecté les arbres, mais qu'ils n'ont pas complètement détruit la canopée (Genries *et al.*, 2009a).

Dans les forêts subalpines à pin cembro, seuls les arbres âgés d'au moins 60 ans seraient en mesure de se reproduire en raison du caractère tardif de leur maturité sexuelle (Contini et Lavarello, 1982). Le dénombrement des graines et des aiguilles de *Pinus cembra* (Mercier *et al.*, 2009) suggère que les feux étaient des feux de surface, qui ont épargné les arbres matures et principalement brûlé les pins cembro du sous-bois. Il est également possible que ces feux étaient peu étendus ou qu'ils se soient produits loin du lac. Cette dernière hypothèse est tout de même peu vraisemblable au vu de l'importance des pics d'influx de charbon correspondant à ces feux (Higuera *et al.*, 2005), et de la topographie entourant le lac (faible surface du bassin versant).

### Impact du feu sur la végétation : peut-on généraliser ?

Les résultats montrent qu'il doit être envisagé que les incendies n'ont pas systématiquement un effet sur la diversité taxinomique pollinique, ou que celui-ci peut être négligeable. Par ailleurs, aucune relation entre les incendies et la richesse pollinique n'a été mise en évidence, ce dernier paramètre étant difficile à interpréter. En outre, il existe divers types d'incendies qui diffèrent par leur intensité, leur étendue et leur contexte environnemental (Johnson, 1985). Plusieurs études antérieures réalisées dans des contextes biogéographiques différents ont mis en évidence de grandes disparités de réponse des écosystèmes naturels aux incendies : tandis que ces derniers n'ont pas d'effet significatif sur les formations forestières boréales analogues aux forêts subalpines à divers titres (Carcaillet *et al.*, 2001), ils apparaissent être un élément majeur de la dynamique forestière dans les Alpes suisses (Tinner *et al.*, 1999). Néanmoins, l'étude de Tinner *et al.*, (1999) a été réalisée sur des lacs de faible altitude (377 et 416 m) en zone de transition entre le collinéen et le montagnard dans la région d'influence climatique méditerranéenne. Cette localisation est susceptible de réduire les apports polliniques lointains, particulièrement importants dans les sites de haute altitude (Ortu *et al.*, 2006). Par conséquent, les modifications de la végétation environnante engendrées par le passage d'un incendie peuvent être masquées dans les enregistrements sédimentaires par les apports polliniques régionaux et lointains. En outre, les fortes variations de l'enregistrement du pollen, qui peuvent être liées aux conditions stationnelles (Coûteaux, 1981), rendent délicate l'interprétation des fluctuations observées. La petite taille du site étudié permet toutefois d'obtenir certaines informations sur la végétation locale (Jacobson et Bradshaw, 1981 ; Muller *et al.*, 2006).

L'impact d'un incendie sur la végétation dépend de sa composition, et plus particulièrement du degré de résistance ou de résilience des espèces qui la constituent. Même si les feux  $\alpha$  et  $\beta$  d'une part,  $\gamma$  et  $\delta$  d'autre part sont semblables car ils interviennent dans une même période de fréquence d'incendies, tous sont survenus dans des contextes différents pour de nombreux autres critères, ce qui pourrait expliquer l'absence de réponse identique de la végétation. Ainsi, lorsque les feux  $\gamma$  et  $\delta$  sont survenus, la quantité de biomasse au sol accumulée pendant les périodes sans feux, était peut-être plus importante que lors des feux  $\alpha$  et  $\beta$ . Il est donc possible



que les feux  $\gamma$  et  $\delta$  aient été plus intenses, donc détectables au niveau pollinique. Aussi, la diversité du couvert végétal détermine fortement sa réponse au passage du feu : certaines espèces brûlent plus facilement que d'autres, et d'autres sont adaptées à des régimes élevés de perturbations telles que *Betula* (Schulze *et al.*, 2005).

Par ailleurs, une étude menée sur *Pinus albicaulis* (espèce vicariante, analogue et jumelle de *P. cembra* sur le continent américain) suggère que le feu favorise le développement de la communauté (Tomback *et al.*, 2001). Une fréquence de feux relativement élevée serait même nécessaire au maintien de *P. albicaulis* en favorisant les conditions de dispersion et d'enfouissement des graines par le casse-noix. En outre, l'étude montre que la population de *P. albicaulis* décline depuis que des mesures ont été prises afin de réduire le nombre d'incendies. L'analyse pollinique (Figure 3), indique que *P. cembra* a longtemps été présent autour du lac du Thyl. Enfin, cette espèce s'est installée sur le site lorsque la fréquence des incendies était assez élevée (Figure 2b) dans un environnement de feuillus (Figure 3). L'installation de communautés de *P. cembra* pourrait donc être favorisée par le feu. Il en est de même pour *Betula* et *Alnus* très présents au début de l'Holocène sous pression ignée.

### Mode de sédimentation et influx de charbon et de pollen

La courbe d'influx de charbon présente deux phases, la première avec des influx élevés, et la seconde avec des influx plus faibles (Figure 2a). Parallèlement, il ressort que l'influx pollinique est plus élevé ( $13\ 280 \pm 880$  grains.cm<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>) pendant la période ancienne, que pendant la période récente ( $1\ 340 \pm 110$  grains.cm<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>) (Figure 2c). La chute d'influx pollinique il y a 6 600 ans est associée à la fermeture centripète du lac et à sa transformation vers une tourbière. C'est en effet à ce niveau que le sédiment passe d'une gyttja tourbeuse à une tourbe blonde composée de restes d'Hypnacées et de Cyperaceae. Une phase de sécheresse attestée dans les Alpes du sud pourrait en être à l'origine (Digerfeldt *et al.*, 1997). Par ailleurs, la présence continue de *Pediastrum integrum*, une algue d'eau libre eutrophe, avant ce changement de sédiment, et sa quasi-absence dans les niveaux suivants, confirment le comblement de la dépression qui aura certainement débuté plusieurs siècles plus tôt. Une hypothèse possible pour expliquer la chute des influx de pollen et de charbon à ce niveau consiste donc en une filtration des eaux de ruissellement alimentant le lac par la ceinture tourbigène herbacée. La chute de l'influx de charbon pourrait donc être le résultat d'un changement du mode de sédimentation. Une autre hypothèse implique un changement rapide des nutriments dans le bassin versant peu avant le changement de sédimentation. En effet, une étude parallèle portant sur l'analyse des éléments géochimiques (Mourier, 2008) montre une transformation de grande ampleur dans les signatures chimiques sédimentaires contemporaines des chutes d'influx pollinique et de charbon. Cette modification du cycle géochimique et du rythme d'érosion affectant les sols aurait pu affecter le couvert végétal, et donc le combustible pour des feux éventuels. Du fait de l'existence de ces différents paramètres, probablement liés les uns aux autres, il apparaît très difficile de statuer sur l'existence d'un changement de fréquence des incendies pendant l'Holocène.

## CONCLUSION

L'étude anthracologique et pollinique d'un petit lac subalpin de Vanoise confirme son histoire en partie forestière, alors qu'il est actuellement entouré de pelouses. Les analyses ont montré que le scénario de dynamique pré- post-feu est variable d'un feu à l'autre. Les résultats suggèrent par ailleurs que la canopée productrice de pollen n'était que faiblement affectée par les incendies, qui auraient davantage brûlé les arbres immatures de sous-bois. Cela indiquerait qu'il n'existe pas une réponse-type de la végétation après le passage des feux, car ceux-ci se produisent dans des conditions physiques toujours différentes. Par ailleurs, certains taxons manifestent une bonne résilience aux perturbations (*Betula*). Le pin cembro *Pinus cembra*



semble avoir été favorisé par les feux lors de son expansion au début de l'Holocène, ou pour le moins il y serait indifférent. La réalisation d'études similaires sur d'autres lacs subalpins, n'ayant pas encore évolué en tourbières et se trouvant peu exposés aux vents, permettrait de vérifier les résultats obtenus.

**Remerciements.** Nous remercions Adam Ali, Sarah Ivorra et Boris Vannière pour l'aide apportée sur le terrain, ainsi que Jacqueline Ferrier, Serge D. Muller et Patrick Schevin pour leur aide durant les traitements et les analyses polliniques. Le premier auteur a bénéficié d'une allocation de recherche MENRT et le travail réalisé a été financé par le programme national ECCO (INSU-CNRS). Cette publication est la contribution ISEM 2008-100.

## BIBLIOGRAPHIE

- Ali A.A., Carcaillet C., Talon B., Roiron P. et Terral J.F. (2005). *Pinus cembra* L. (arolla pine), a common tree in the inner French Alps since the early Holocene and above the present tree line: a synthesis based on charcoal data from soils and travertines. *J. Biogeogr.*, 32 : 1659-1669.
- Bartoli C. (1966). Etudes écologiques sur les associations végétales forestières de la Haute-Maurienne. *Ann. Sci. For.*, 23 : 432-751.
- Behre K.E. (1981). The interpretation of anthropogenic indicators in pollen diagrams. *Pollen Spores*, 23 : 225-245.
- Berglund B.E. et Ralska-Jasiewiczowa M. (1986). Pollen analysis and pollen diagrams. Dans : *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology* / sous la dir. de B.E. Berglund. New York ; Londres : J. Wiley. (International geological correlation programme ; project 158B). p. 455-484.
- Carcaillet C. (1998). A spatially precise study of Holocene fire history, climate and human impact within the Maurienne valley, North French Alps. *J. Ecol.*, 86 : 384-396.
- Carcaillet C., Ali A.A., Blarquez O., Genries A., Mourier B., Bremond L. (2009). Spatial variability of fire history in subalpine forest: from natural to cultural regimes. *Ecoscience* 16(1) : 1-12.
- Carcaillet C., Bergeron Y., Richard P.J.H., Fréchette B., Gauthier S. et Prairie Y.T. (2001). Change of fire frequency in the eastern Canadian boreal forests during the Holocene : does vegetation composition or climate trigger the fire regime ? *J. Ecol.*, 89 : 930-946.
- Carcaillet C. et Brun J.-J. (2000). Changes in landscape structure in the northwestern Alps over the 7000 years: lessons from soil charcoal. *J. Veg. Sci.*, 11 : 705-714.
- Carcaillet C., Talon B. et Barbéro M. (1998). *Pinus cembra* et incendies pendant l'Holocène, 300 m au-dessus de la limite actuelle des arbres dans le massif de la Vanoise (Alpes du nord-ouest). *Écologie*, 29 : 277-282.
- Carcaillet C. et Thinin M. (1996). Pedoanthracological contribution to the study of the evolution of the upper treeline in the Maurienne valley (North French Alps): methodology and preliminary data. *Rev. Palaeobot. Palyno.*, 91 : 399-416.
- Carnelli A.L., Theurillat J.P., Thinin M., Vadi G. et Talon B. (2004). Past uppermost tree limit in the Central European Alps (Switzerland) based on soil and soil charcoal. *Holocene*, 14 : 393-405.
- Chauchard S., Carcaillet C. et Guibal F. (2007). Patterns of land-use abandonment control tree-recruitment and forest dynamics in mediterranean mountains. *Ecosystems*, 10 : 936-948.
- Contini L. et Lavarello Y., (1982). Le pin cembro (*Pinus cembra* L.) : répartition, écologie, sylviculture et production. Paris : INRA. 197 p.
- Coûteaux M. (1981). Caractérisation pollenanalytique en Oisans des milieux forestiers et des milieux supraforestiers dans l'actuel et dans le passé. Dans : *La limite supérieure de la forêt et sa valeur de seuil : colloque de Perpignan, 16 avril 1981* / organisé par Gérard Soutadé [et al.] ; [Ed. par la] Commission d'étude des phénomènes périglaciaires, Commission de la géographie des montagnes, Institut d'estudis andorrans, Centre de géographie physique de Paris X. Perpignan : Institut d'études andorranes, 1982. p. 139-159.
- David F. et Barbéro M. (2001). Les érables dans l'étage subalpin : une longue histoire. *C. R. Acad. Sci. Paris, Série III*, 324 : 159-164.



- Digerfeldt G., Beaulieu de J.-L., Guiot J. et Mouthon J., (1997). Reconstruction and paleoclimatic interpretation of Holocene lake-level changes in Lac de Saint-Léger, Haute-Provence, southeast France. *Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol.*, 136 : 231-258.
- Dufresne J.L., Friedlingstein P., Berthelot M., Bopp L., Ciais P., Fairhead L., Le Treut H. et Monfray P. (2002). On the magnitude of the positive feedback between future climate change and the carbon cycle. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 1405, doi : 10.1029/2001GL013777.
- Flannigan M.D., Logan K.A., Amiro B.D., Skinner W.R. et Stocks B.J. (2005). Future area burned in Canada. *Climatic Change*, 72 : 1-16.
- Fourrier J. (1985). Contribution à l'étude des Alpes intermédiaires françaises : la moyenne Maurienne; bioclimatologie, groupements forestiers et impacts humains. Thèse 3<sup>ème</sup> cycle : écologie appliquée : Grenoble 1., 88 p.
- Gavin D.G., Hu F.S., Lertzman K. et Corbett P. (2006). Weak climatic control of stand-scale fire history during the late Holocene. *Ecology*, 87 : 1722-1732.
- Genries A., Mercier L., Lavoie M., Muller S.D., Radakovitch O. et Carcaillet C. (2009a). The effect of fire frequency on local cembra pine populations. *Ecology*, 90(2) : 476-486.
- Genries A., Muller S.D., Carcaillet C., Mercier L. et Bircker L. (2009b). Local-scale processes control spatial variability of subalpine vegetation trajectories during the Holocene in the Maurienne valley (French Alps). *Ecoscience*, 16(1) : 13-24.
- Gensac P. (1972). Notice explicative de la carte écologique Moûtiers Parc national de la Vanoise 1/100000. *Trav. sci. Parc natl. Vanoise*, II : 49-73.
- Grime J.P. (1977). Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. *Am. Nat.*, 111 : 1169-1194.
- Grissino-Mayer H.D. et Swetnam T.W. (2000). Century-scale climate forcing of fire regimes in the American Southwest. *Holocene*, 10 : 213-220.
- Higuera P.E., Sprugel D.G. et Brubaker L.B. (2005). Reconstructing fire regimes with charcoal from small-hollow sediments: a calibration with tree-ring records of fire. *Holocene*, 15 : 238-251.
- Jacobson Jr. G.L. et Bradshaw R.H.W. (1981). The selection of sites for paleovegetational studies. *Quat. Res.*, 16 : 80-96.
- Johnson E.A. (1985). Disturbance: the process and the response. An epilogue. *Can. J. For. Res.*, 15 : 292-293.
- Jones P.D., Osborn T.J. et Briffa K.R. (2001). The evolution of climate over the last millennium. *Science*, 292 : 662-667.
- Jowsey P.C. (1966). An improved peat sampler. *New Phytol.*, 65 : 245-248.
- Mercier L., Genries A., Lavoie M., Ali A.A., Bircker L., Carcaillet C. (2009). Histoire des feux et de la dynamique végétale : reconstruction paléobotanique d'un écosystème subalpin de Vanoise méridionale. *Trav. sci. Parc natl. Vanoise*, XXIV : 7-18.
- Mourier B. (2008). Contribution de l'approche sédimentaire à la reconstitution de l'histoire des sols - Définition de traceurs pédologiques et applications sur des sédiments lacustres de montagne (Maurienne, Savoie, France). Thèse de Doctorat : Université de Savoie, Chambéry.
- Muller S.D., Nakagawa T., Beaulieu J.-L. de, Court-Picon M., Fauquette S. et Genries A., (2006). Paléostrutures de végétation à la limite supérieure des forêts, dans les Alpes françaises internes. *C. R. Biologies*, 329 : 502-511.
- Nakagawa T., Edouard J.L. et Beaulieu J.L. de (2000). A scanning electron microscopy (SEM) study of sediments from lake Cristol, Southern French Alps, with special reference to identification of *Pinus cembra* and other alpine *Pinus* species based on SEM pollen morphology. *Rev. Paleobot. Palyno.*, 108 : 1-15.
- Ortu E., Brewer S. et Peyron O., (2006). Pollen-inferred palaeoclimatic reconstructions in mountain areas: problems and perspectives. *J. Quat. Sci.*, 21(6) : 615-627.
- Pal J.S., Giorgi F. et Bi X. (2004). Consistency of recent European summer precipitation trends and extremes with future regional climate projections. *Geophys. Res. Lett.*, 31 : L13202.1-L13202.4.
- Reille M. (1995-1999). *Pollen et Spores d'Europe et d'Afrique du Nord*. Marseille : Laboratoire de botanique historique et palynologie. 4 vol. (vol. 1 : 535 p. ; vol. 2 : 329 p. ; vol. 3 : 523 p. ; vol. 4 : 243 p.)
- Roche P., Tatoni T. et Médail F. (1998). Relative importance of abiotic and land use factors in explaining variation in woody vegetation in a French rural landscape. *J. Veg. Sci.*, 9 : 221-228.
- Schulze E.-D., Wirth C., Mollicone D. et Ziegler W. (2005). Succession after stand replacing disturbances by fire, wind throw, and insects in the dark Taiga of Central Siberia. *Oecologia*, 146 : 77-88.



- Schumacher S. et Bugmann H. (2006). The relative importance of climatic effects, wildfires and management for future forest landscape dynamics in the Swiss Alps. *Global Change Biol.*, 12 : 1435-1450.
- Sheffield J. et Wood E.F. (2008). Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Clim. Dyn.*, 31 : 79-105.
- Stuiver M. et Reimer P.J., (1993). Extended <sup>14</sup>C database and revised CALIB radiocarbon calibration program. *Radiocarbon*, 35 : 215-230.
- Talon B., Carcaillet C. et Thinon M. (1998). Études pédoanthracologiques des variations de la limite supérieure des arbres au cours de l'Holocène dans les Alpes françaises. *Géogr. Phys. Quat.*, 52 : 195-208.
- Tessier L., Beaulieu J.-L. de, Coûteaux M., Edouard J.-L., Ponel P., Rolando C., Thinon M., Thomas A. et Tobolski K. (1993). Holocene palaeoenvironments at the timberline in the French Alps ; a multidisciplinary approach. *Boreas*, 22 : 244-254.
- Tinner W., Ammann B. et Germann P. (1996). Treeline fluctuations recorded for 12,500 years by soil profiles, pollen, and plant macrofossils in the central Swiss. *Artic Alp. Res.*, 28 : 131-147.
- Tinner W., Hubschmid P., Wehrli M., Ammann B. et Conedera M. (1999). Long-term forest fire ecology and dynamics in southern Switzerland. *J. Ecol.*, 87 : 273-289.
- Tomback D.F., Arno S.F. et Keane R.E. (2001). *Whitebark Pine Communities*. Washington, DC : Island Press. 440 p.
- Vorren K.D., Mørkved B. et Bortenschlager S. (1993). Human impact on the Holocene forest line in the Central Alps. *Veget. Hist. Archaeobot.*, 2 : 145-156.
- Wick L. (1994). Early Holocene reforestation and vegetation change at a lake near the alpine forest limit: Lago Basso (2 250 m asl), northwestern Italy. *Diss. Bot.*, 234 : 555-563.





# UNE FORÊT SUBALPINE À MÊLÈZE DOMINANT DANS UN VALLON AVALANCHEUX : 9 000 ANS D'HISTOIRE RÉVÉLÉS PAR L'ANALYSE DES MACRORESTES VÉGÉTAUX D'UN LAC DE MAURIENNE

par Olivier Blarquez <sup>1,2</sup>, Christopher Carcaillet <sup>1,2</sup> et Brice Mourier <sup>1,3</sup>

**Résumé.** Les recherches paléoécologiques réalisées à ce jour dans les Alpes ont sous-estimé la prise en compte de certains processus majeurs comme les avalanches. En outre, l'existence passée de mosaïques écologiques n'a jamais été démontrée. En Maurienne, les peuplements forestiers subalpins de l'Holocène sont considérés comme invariants, avec des forêts homogènes composés uniquement de pin cembro (*Pinus cembra*). La place des espèces résilientes comme le mélèze (*Larix decidua*) dans ces écosystèmes holocènes demeure inconnue. Cette étude envisage l'hypothèse selon laquelle ces espèces aujourd'hui expansionnistes ont comme habitat naturel des milieux perturbés comme les couloirs d'avalanches, et que les paysages forestiers holocènes étaient diversifiés, constitués d'une mosaïque d'habitats. La mise en évidence de cette mosaïque passée est autorisée par l'analyse paléoécologique fondée sur des macrorestes végétaux terrestres dans un contexte à fort régime d'avalanches. La comparaison avec les données provenant d'un site témoin (non soumis aux avalanches) permet d'explorer l'impact des avalanches sur la dynamique à long terme des écosystèmes subalpins passés et sur l'existence d'une mosaïque écologique. L'analyse statistique a permis de mettre en évidence que les sites furent botaniquement assez semblables au début de l'Holocène, avec une abondance du genre *Betula* (bouleaux). À partir de 8 500 ans avant nos jours, les deux sites suivent des trajectoires écologiques différentes. Le site soumis aux avalanches est composé de forêts mixtes à mélèze. La trajectoire du site témoin (non soumis aux avalanches) s'explique par l'abondance du pin cembro (*Pinus cembra*), et l'absence de restes de mélèze. Ces résultats indiquent que des forçages écologiques différents ont contraint la dynamique passée des deux écosystèmes. Les avalanches agissent sur le maintien d'une mosaïque paysagère subalpine, en favorisant les espèces résilientes, dont le mélèze, depuis au moins 8 500 ans avant nos jours.

**Mots-clés :** Paléoécologie - Forêts subalpines - Dynamique forestière - Holocène - Avalanches - *Larix decidua* - Massif de la Vanoise (Savoie) - Maurienne (Savoie).

**A subalpine Larch forest (*Larix decidua* Mill.) in an avalanche valley : 9000 years of history revealed by the analysis of plant remains in a Maurienne lake**

**Key-words :** Paleoecology - Subalpine forests - Forest dynamics - Holocene - Avalanches - *Larix deciduas* - Vanoise Mountains (France) - Maurienne (France).

## INTRODUCTION

Les avalanches de neige constituent une perturbation naturelle et majeure des écosystèmes subalpins (Kulakowski *et al.*, 2006 ; Rixen *et al.*, 2007). Selon leurs fréquences, les avalanches sont susceptibles de maintenir ceux-ci à un état d'équilibre dynamique (Oldeman, 1990). La variabilité spatiale et temporelle des avalanches est également susceptible de maintenir une mosaïque de communautés au niveau du paysage dans la ceinture subalpine. Dans les vallées

<sup>1</sup> Centre de Bio-Archéologie et d'écologie (UMR 5059 CNRS), Université Montpellier 2, Institut de botanique, 163 rue Broussonet, 34090 Montpellier, France.

<sup>2</sup> Paléoenvironnement et chronoécologie (PALECO, EPHE), École pratique des Hautes Études, Institut de botanique, 163 rue Broussonet, 34090 Montpellier, France.

<sup>3</sup> Laboratoire CARTELE (UMR 42 INRA), Université de Savoie, 73376 Le Bourget du Lac, France.



internes des Alpes, une telle mosaïque paysagère est bien représentée. L'étage subalpin (1 700-2 300 m d'altitude) comprend divers écosystèmes comme les prairies principalement localisés en versant sud au sein desquels une dynamique forestière intense s'installe au fur et à mesure de l'abandon agropastoral (Didier, 2001 ; Motta et Lingua, 2005). Cette dynamique est dominée par l'installation précoce du mélèze *Larix decidua*, puis de l'épicéa *Picea abies*, et du pin cembro *Pinus cembra* (Didier, 2001; Risch *et al.*, 2004 ; Motta *et al.*, 2006). L'expansion du pin cembro est intense en haute altitude. En dessous de 2 000 m, la dynamique du sapin *Abies alba* est forte au sein de forêts à pin à crochet *Pinus mugo* ssp. *uncinata*, pin sylvestre *Pinus sylvestris* ou épicéa *Picea abies* (Motta et Garbarino, 2003 ; Motta et Edouard, 2005).

La déprise agropastorale et les avalanches génèrent une forte variabilité des écosystèmes subalpins actuels se matérialisant par une importante mosaïque de paysages. Cependant cette mosaïque actuelle n'est pas révélée par les études paléoécologiques, qui font implicitement état d'écosystèmes forestiers de composition homogène ; l'image d'une ceinture dominée par le pin cembro depuis 9000 cal BP semble être largement acceptée (ex. : David, 1995 ; Carcaillet *et al.*, 1998 ; Carcaillet et Brun, 2000 ; Carneli *et al.*, 2004 ; Ali *et al.*, 2005a ; Muller *et al.*, 2006). Au sein de ces écosystèmes actuellement largement soumis aux activités humaines et ce depuis au plus 6 000 ans (Talon *et al.*, 1998 ; Ali *et al.*, 2005b), la présence de peuplements dominés par les mélèzes n'est révélée que tardivement aux alentours de 2 000 ans avant le présent, en corollaire de l'intensification des activités sylvo-agropastorales lors de l'époque dite de l'Empire romain (David, 1995 ; Nakagawa *et al.*, 2000). L'absence d'enregistrement de mélèze ne serait pas due à son absence au sein des écosystèmes naturels holocènes, mais résulterait d'un manque d'archives dans des contextes écologiques appropriés permettant sa mise en évidence. Cette espèce héliophile, exigeante en termes de ressources et très résiliente, est communément rencontrée au sein des couloirs d'avalanches. Nous formulons donc l'hypothèse que des peuplements de mélèzes auraient pu être entretenus naturellement dans des habitats naturellement perturbés par les avalanches.

Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons analysé et comparé les archives paléoécologiques de deux sites proches soumis à des régimes différents d'avalanches : un site hors système avalancheux (témoin) et un site dans un vallon où la topographie génère nécessairement des avalanches. Les indicateurs paléoécologiques retenus dans cette analyse sont les macrorestes végétaux (graines, feuilles, aiguilles, bourgeons, etc.) dont le faible pouvoir de dispersion (quelques dizaines de mètres) implique une représentation strictement locale de la végétation, aux abords immédiats du lieu de sédimentation. Cette étude s'appuie sur une chronologie précise établie par des datations radiocarbone. Ces végétations soumises à des régimes d'avalanches différents vont différer par leur dynamique, leur composition et leur structure, afin de déterminer la fonction des avalanches sur la diversité paysagère passée des communautés forestières subalpines. Seules les données du lac en contexte avalancheux sont présentées *in extenso*, celles du site témoin (hors avalanches) proviennent d'une autre étude (Mercier, 2005 ; Genries *et al.*, 2009).

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Site d'étude

Le site d'étude se situe dans la partie centrale de la vallée de la Maurienne (Figure 1). Le lac du Loup (45°11'15"N – 6°32'16"E) est situé sur le versant nord du massif du mont Thabor à 2 032 m d'altitude, sur la commune d'Orelle, et le lac du Thyl à 2 020 m (45°14'26"N ; 6°29'60"E) sur la commune de St-Michel-de-Maurienne (Figure 1). Le lac du Loup est localisé au centre d'un ancien cirque glaciaire dont les pentes longues et abruptes (>30°) favorisent des avalanches très récurrentes. Le lac du Thyl est situé le long d'une pente douce et, de surcroît, le lac se situe sur un épaulement le protégeant des mouvements massifs de neige (Figure 2).



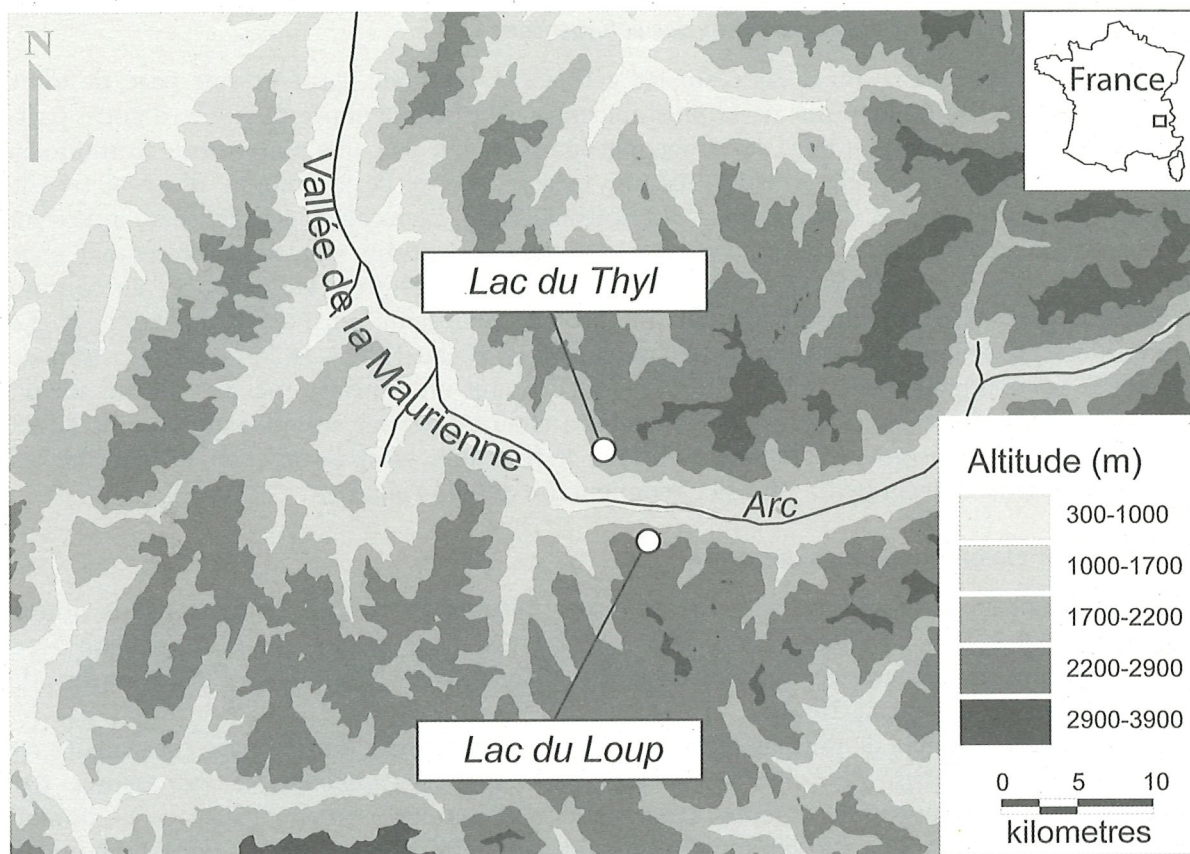


Figure 1. Localisation des deux sites d'étude

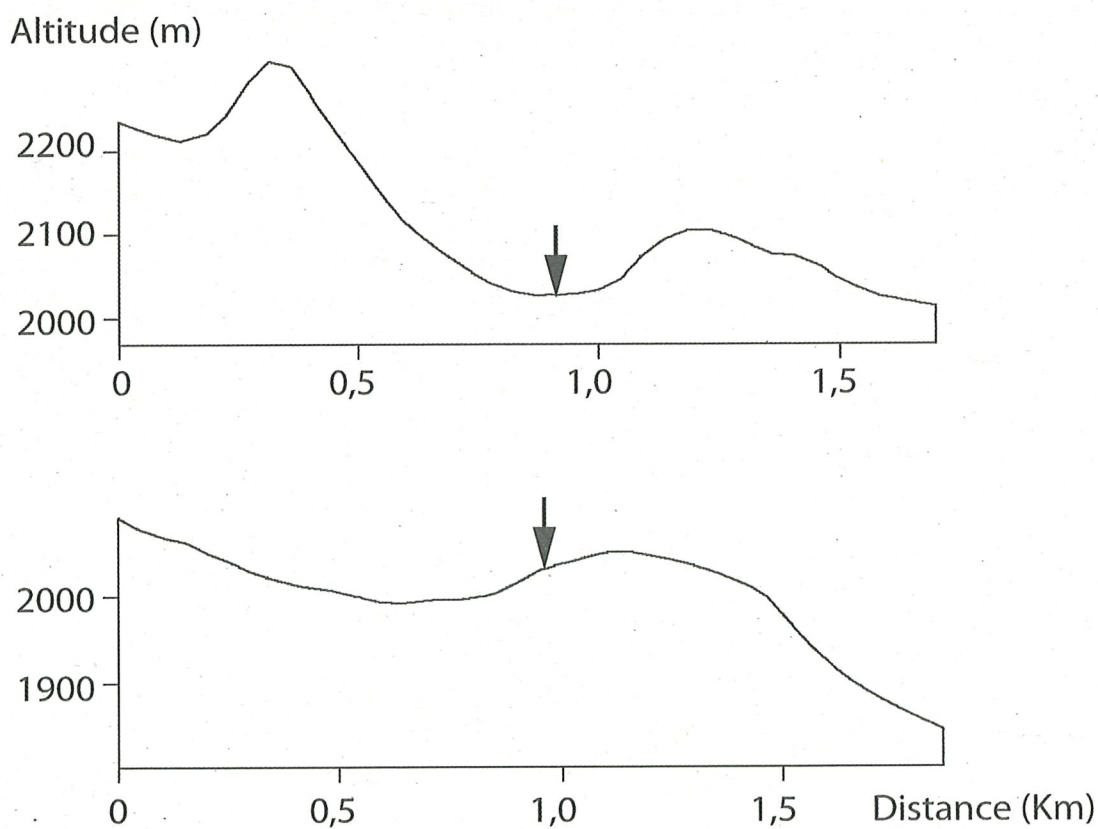


Figure 2. Profil topographique du site des lacs du Loup (a) et du Thyl (b).  
La localisation des deux lacs est indiquée par la flèche noire.

### *Prélèvement du sédiment et préparation des échantillons*

Le forage a été effectué en mars 2006 sur lac gelé. Cette méthode permet d'une part, de forer au centre du lac afin de disposer de la plus ancienne série sédimentaire possible, d'autre part, d'assurer (i) des conditions stables de forage par comparaison avec une plate-forme flottante en été, (ii) la verticalité des prélèvements, (iii) une mesure précise de la colonne d'eau et (iv) de l'épaisseur des sédiments et de l'interface eau libre/sédiment. Le forage a été réalisé à l'aide d'un carottier de type "Russe" (Jowsey, 1965). Les sédiments extraits du lac se présentent sous forme de carottes hémicylindriques (1000×75 mm). Chaque carotte a été découpée en continu à chaque centimètre ; chaque échantillon (ou niveau) représente ainsi 1 cm de sédiment. Le volume des échantillons a été mesuré par déplacement d'eau (Bhiry et Filion, 2001) afin de normaliser les comptages par volume (Birks, 2001). Avant un tamisage ménagé à l'eau sur un tamis de 160 µm, les échantillons sont défloculés à chaud dans une solution aqueuse de KOH pour dissocier les liaisons des acides humiques et fulviques, afin de libérer les macrorestes végétaux contenus dans la gyttja (matrice sédimentaire de boue algale).

### *Identification et comptage des macrorestes*

L'identification et le comptage des macrorestes végétaux ont été effectués sous loupe binoculaire (×6,3 à 57). L'identification des macrorestes a été réalisée par comparaison avec des échantillons de collections de référence, de l'Herbier de Montpellier, et des atlas de référence (ex. Cappers *et al.*, 2006).

La distinction des espèces de pins susceptibles de s'être développées dans le passé aux alentours du site (*Pinus sylvestris*, *P. mugo* ssp. *mugo*, *P. mugo* ssp. *uncinata*) a été assurée par l'observation anatomique de coupes transversales d'aiguilles, au microscope à lumière transmise (×50 à 500). Le ratio hauteur/largeur des cellules épidermiques est dans la majorité des cas supérieur à 2 pour *P. mugo* (ssp. *mugo* et ssp. *uncinata*), compris entre 1 et 2 pour *P. sylvestris* (Boratyńska et Bobowicz, 2001). La distinction entre les deux sous-espèces de *P. mugo* n'est pas réalisable sur le matériel fossile partiellement dégradé. La détermination s'est donc limitée à *P. mugo* subsp. *mugoluncinata* et sera notée *P. mugo*.

### *Datations*

La chronologie des carottes du lac du Loup a été établie à l'aide de 9 mesures <sup>14</sup>C obtenues par spectrométrie de masse par accélération (AMS par convention). Les dates radiocarbone ont été calibrées à 2σ à l'aide du logiciel Calib (Stuiver et Reimer, 1993) version 5.0.1 et grâce à la base de données IntCal04. Nous avons choisi arbitrairement la médiane de la plage de valeurs calibrées ( $p=1,0$ ) pour établir le modèle numérique. Les dates sont données en années calibrées avant le présent noté cal. BP (Before Present = 1950 par convention). Le modèle numérique âge/profondeur est fondé sur une interpolation par lissage entre les dates. Cette méthode permet de lisser le taux d'accumulation du sédiment en fonction du temps et élude le biais lié à un nombre insuffisant ou irrégulier de dates.

### *Représentation des résultats*

Dans les diagrammes de macrorestes, les valeurs ont été exprimées en influx, ou nombre de fragments par unité de surface et par an (nb.cm<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>). Les taxons représentant moins de 1% de la quantité totale de macrorestes sont représentés en présence/absence. Pour aider à la description, le zonage des diagrammes est fondé sur l'influx de macrorestes des taxa arboréens atteignant plus de 1% de la quantité totale de macrorestes. Ces zones représentent des périodes pour lesquelles les enregistrements de macrorestes restent statistiquement stables en termes de composition et d'abondance. Cependant les assemblages de macrorestes peuvent présenter une certaine variabilité temporelle. Ainsi certaines zones sont subdivisées en sous-zones statistiquement représentatives. Ce zonage est obtenu par une analyse de la dissimilarité entre niveaux adjacents, réalisée par le programme CONISS qui met en place une procédure



multivariée d'analyse incrémentée de la somme des carrés sous contrainte, c'est-à-dire la stratigraphie (Grimm, 1987).

### *Analyses numériques*

Les données de macrorestes du lac du Loup sont comparées à des données de macrorestes disponibles pour un site proche (Mercier, 2005). Les données de ce site ne sont pas décrites ici, car ce site est utilisé en tant que site "témoin référentiel" dans l'analyse statistique. Les analyses numériques ont été réalisées sur les séquences synchrones des séries sédimentaires du lac du Loup et du lac du Thyl en s'appuyant sur la chronologie établie par Mercier (2005), c'est-à-dire de 8850 à 1800 années BP. Une interpolation linéaire des courbes d'influx de macrorestes des deux sites a été réalisée. Au total 354 niveaux avec une résolution de 20 ans ont été interpolés et simulés de 1800 à 8850 BP. L'interpolation linéaire a été réalisée par la fonction aspline du programme Akima 0.5-1 sous le logiciel R 2.4.1 (Akima, 1970 et 1991). Les assemblages de macrorestes sont donc comparables à date égale entre les deux sites sur les séries sédimentaires des lacs du Loup et du Thyl de 1800 à 8850 BP.

Une analyse en composante principale (ACP) a été réalisée sur les valeurs d'influx de macrorestes interpolées entre les assemblages de macrorestes des deux sites. Cette analyse a été réalisée sur les taxa arboréens principaux atteignant plus de 1% de la quantité totale de macrorestes. Les données ont été centrées réduites au préalable afin de ne considérer que les variations de l'amplitude des changements de macrorestes et pour s'affranchir de différences d'ordre taphonomique inter-site comme la valeur absolue des influx (Fuller, 1998).

## RÉSULTATS

### *Chronologie et taux d'accumulation sédimentaire*

La partie supérieure du forage du lac du Loup n'est pas disponible, c'est-à-dire les 50 premiers centimètres de sédiments à partir de l'interface eau libre/sédiment. Le carottier employé ne convient pas à l'extraction de sédiments trop liquides. La série sédimentaire débute au niveau 200 cm en dessous du niveau de l'eau (1800 cal. BP) et se termine au niveau 385 cm (9135 cal. BP, Tableau I, Figure 3).

### *Zonage*

Le zonage des diagrammes d'influx de macrorestes fait apparaître 3 zones principales pour le lac du Loup, pouvant être séparées en sous-zones (Figure 4).

- *Loup-1a (9080-8450 cal. BP)* (Figure 4) : Les assemblages de macrorestes sont largement dominés par *Betula* sp. (bouleau) durant cette période. *Pinus cembra* (pin cembro) et *Larix decidua* (mélèze) sont présents en très faible quantité dès le début de la zone.
- *Loup-1b (8400-7500 cal. BP)* : Entre 8400 et 8000 cal. BP, les assemblages sont dominés par *Betula* sp. ainsi que par *Pinus* type *mugo/uncinata* (pin mugo ou p. à crochet). Aux alentours de 8200 à 8000 cal. BP une chute de ces deux taxa s'accompagne d'une augmentation de représentation du mélèze ainsi que d'*Abies alba* (sapin), puis du pin cembro aux alentours de 7700 cal. BP. Une première occurrence du genre *Vaccinium* s'effectue vers 8000 cal. BP. Les graines de ce genre ne possèdent pas de réel critère diagnostique permettant une détermination spécifique : il s'agit donc de *Vaccinium myrtillus*, *V. uliginosum* ou *V. vitis-idaea*. La fin de cette période est caractérisée par des assemblages mixtes composés de feuillus (ex. *Betula* sp.) et de conifères (*Abies*, *Pinus cembra*, *Larix*), les conifères représentant l'essentiel des macrorestes.

Profondeur sous la surface du lac (cm)	Code Laboratoire	Age <sup>14</sup> C (années BP)	Étendue des âges calibrés (années calibrées BP)
202-205	Poz-18280	1985 ± 30	1876-1995
223-225	SacA-8347	2630 ± 30	2723-2786
240-242	SacA-6901	3385 ± 30	3559-3701
278-281	SacA-6902	4790 ± 30	5470-5593
300-303	SacA-6900	5040 ± 40	5708-5902
340-342	SacA-6899	5640 ± 40	6315-6494
360-366	SacA-8349	5795 ± 35	6496-6671
373-378	SacA-8350	7785 ± 40	8454-8632
380-385	Poz-18282	8160 ± 50	9008-9262

Tableau I. Dates <sup>14</sup>C pour le lac du Loup.

Les datations ont été réalisées par spectrométrie de masse par accélération (AMS) sur des macrorestes végétaux terrestres contenus dans le sédiment : aiguilles de *Pinus cembra* et de *Larix decidua*, graines de *Betula* sp.

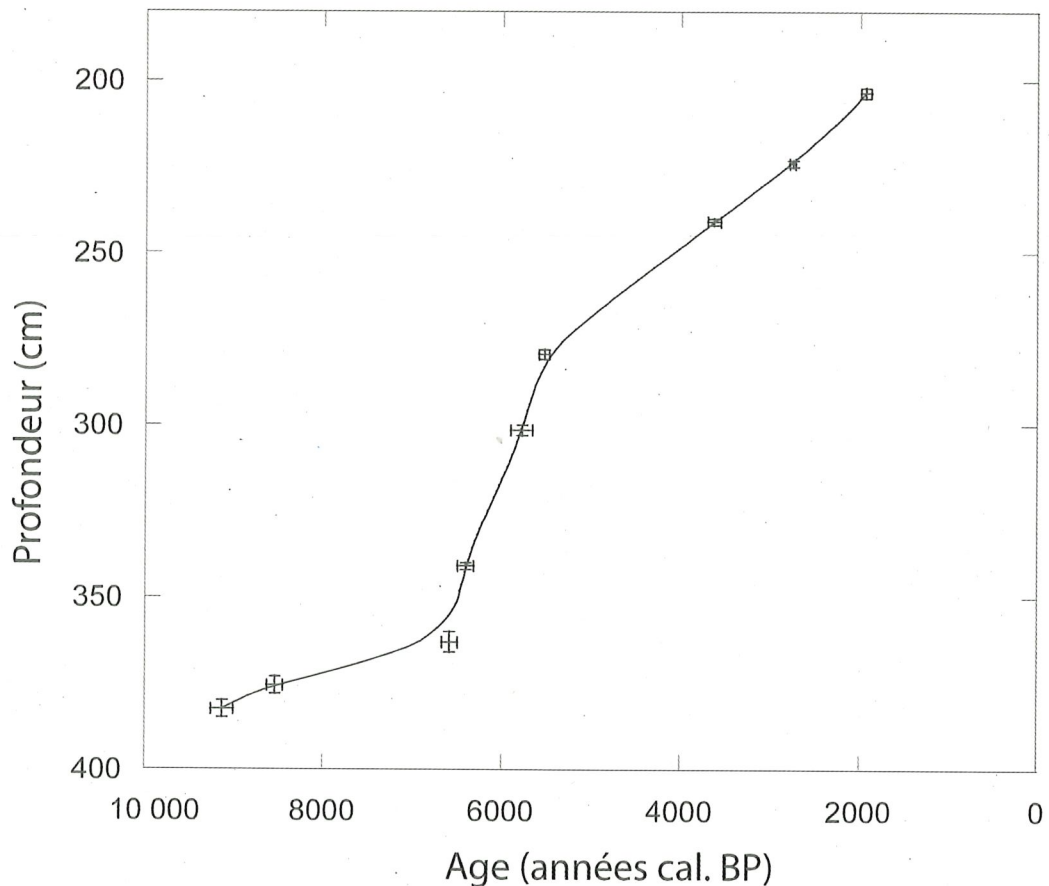


Figure 3. Distribution des dates radiocarbones et modèle âge/profondeur pour le lac du Loup. La profondeur est exprimée en cm sous la surface de l'eau, les âges sont donnés en années calibrées BP (avant 1950).



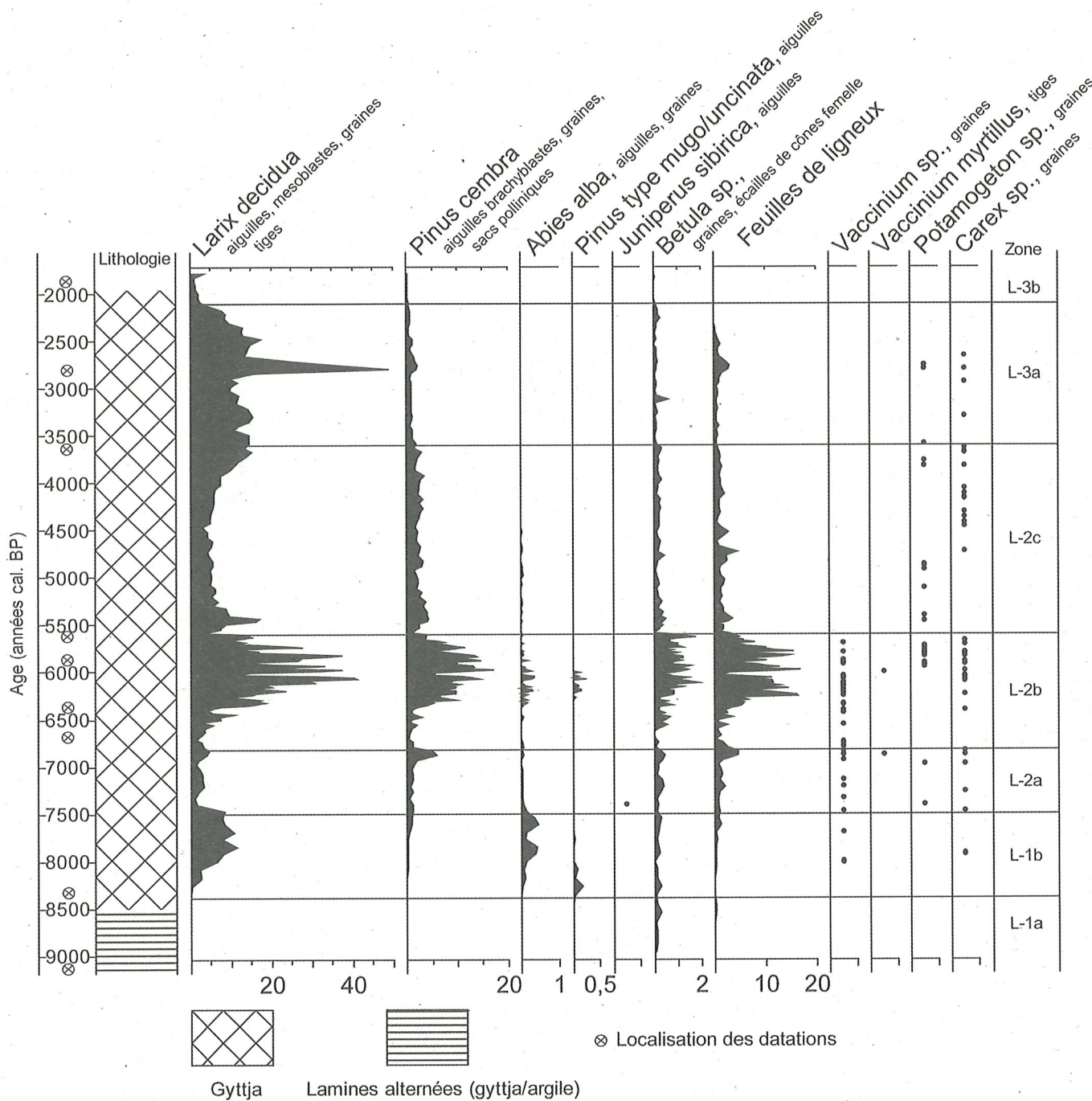


Figure 4. Diagramme simplifié des influx de macrorestes par taxon en fonction du temps, pour le lac du Loup.

Les taxa représentés par un point sont donnés en présence/absence.  
 Les âges sont donnés en années BP.

- **Loup-2a (7500-6800 cal. BP)** : dès 7500 cal. BP, on assiste à une chute de l'influx du mélèze qui se maintient néanmoins à des taux élevés. Le pin cembro qui est relativement stable depuis 7700 cal. BP connaît un pic d'influx à partir de 7000 cal. BP. Les airelles sont plus fréquemment représentées durant la fin de cette période. Des fragments de jeunes tiges de myrtille (*Vaccinium myrtillus*) sont notés lors du pic de pin cembro. La fin de cette période est caractérisée par des assemblages mixtes composés de feuillus (ex. *Betula* sp.) et de conifères (ex. *Abies*, *Pinus cembra*, *Larix*), ces derniers représentant le principal groupe de taxa.
- **Loup-2b (6800-5600 cal. BP)** : Cette période débute par une forte diminution des influx des taxa de 6700 à 6400 cal. BP. Dès 6400 cal. BP, leurs influx augmentent à nouveau. Le seul taxon à ne pas suivre ce schéma est *P.* type *mugoluncinata* dont la présence est simplement attestée lors de la chute entre 6700 et 6500 cal. BP, alors qu'il n'était plus observé depuis 7700 cal. BP, date de l'essor du pin cembro (L-1b). Tous les taxa connaissent un maximum holocène aux alentours de 6000 cal. BP, avec des influx moyens respectifs sur la période 6400-5600 cal. BP de  $20,0 \pm 4,0$ ,  $9,0 \pm 2,0$  et  $0,9 \pm 0,2$  nb.cm<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup> pour le mélèze, le pin cembro et les bouleaux. Les valeurs d'influx après 6000 cal. BP commencent à régresser. *Betula* fait exception, profitant temporairement de la chute de *Pinus cembra*, de *Larix*, d'*Abies* et de *Pinus mugo* avant de chuter eux-mêmes dès 5600 cal. BP, soit 400 ans après. La fin de cette période souligne la disparition totale du pin mugo ainsi que des airelles (*Vaccinium* sp.).
- **Loup-2c (5600-3600 cal. BP)** : Les valeurs d'influx de mélèze, de pin cembro et de bouleaux sont significativement plus faibles durant cette période que précédemment, avec par exemple une moyenne de  $7,0 \pm 2,0$  contre  $18,0 \pm 5,0$  nb.10 cm<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup> pour la période précédente et pour le mélèze, (différence significative à  $p < 0,05$ , test U de Mann-Whitney). Le sapin est irrégulièrement représenté et disparaît définitivement à partir de 4500 cal. BP. En général, l'influx des principaux taxa (*Larix*, *Pinus cembra*, *Betula*) reste relativement stable durant l'ensemble de la période, avec une nette dominance du mélèze.

En résumé, la période comprise entre 7500-3600 cal. BP est marquée par la suprématie des restes de mélèze sur ceux des autres taxa forestiers, les restes de mélèze représentant en moyenne  $69 \pm 5\%$  de l'influx total de macrorestes. Deux événements principaux de chute d'influx des taxa forestiers ont eu lieu, l'un à partir de 6700 cal. BP, l'autre à partir de 5600 cal. BP. Ce furent des événements majeurs tous les taxa ayant été touchés. Cette période est également marquée par la disparition de *P. mugo* au-delà de 6000 cal. BP, de *Vaccinium* sp. au-delà de 5600 cal. BP, et d'*Abies alba* au-delà de 4500 cal. BP.

- **Loup-3a (3600-2000 cal. BP)** : *Betula* et *Pinus cembra* chutent dès 3600 cal. BP ; leurs influx sont plus bas qu'ils ne l'étaient lors de la période précédente (L-2c) : de  $0,24 \pm 0,05$  à  $0,13 \pm 0,05$  nb.cm<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup> pour les bouleaux, et de  $2,7 \pm 0,4$  à  $1,0 \pm 0,2$  nb.cm<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup> pour le pin cembro (L-2c versus L-3a, différence significative à  $p < 0,05$ , test U). Cette chute est à mettre en relation avec l'augmentation de l'influx du mélèze. En 300 ans, de 3900 à 3600 cal. BP, l'influx du mélèze a doublé, passant de  $7,5 \pm 2,0$  à  $14,0 \pm 4,0$  nb.cm<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup> de la zone L-2c à L-3a (différence significative à  $p < 0,05$ , test U). Enfin, un pic de macrorestes est enregistré de 2800 à 2400 cal. BP. Fait remarquable, ce pic concerne principalement *Pinus cembra* et *Larix*. Pour *Larix*, les valeurs d'influx sont extrêmes, avec une valeur moyenne de  $23 \pm 7$  nb.cm<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>.
- **Loup-3b (2050-1780 cal. BP)** : Seuls trois taxa sont observés lors de cette période : *Larix*, *Pinus cembra* et *Betula*. Les valeurs d'influx chutent sévèrement durant cette période, avec une moyenne de  $2,5 \pm 0,7$  nb.cm<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>, toutes espèces confondues.

#### Analyse en composante principale (ACP)

Une ACP a été réalisée sur une matrice contenant les deux séries macrofossiles du lac du Loup et du lac du Thyl afin de discerner leurs trajectoires au cours de l'Holocène sur une base quantitative (influx de macrorestes centrés-réduits, âge synchronisé). Les deux premières composantes principales de l'espace factoriel portent respectivement 46,1 et 32,5% de la



variance totale (Figure 5), soit près de 80% de l'information de la matrice des données. La composante n°1 discrimine *Larix*, en valeur positive, de *Betula* et *Alnus*, en valeur négative. La composante n°2 oppose *P. cembra* et *Betula* en valeur positive, aux taxa caractérisés par de faibles occurrences comme *P. type mugoluncinata*, *Abies*, *Sorbus* et *Acer* en valeur négative. Au début de l'Holocène (8850 à 7790 cal. BP), les deux séries présentent des similitudes au sein du plan factoriel 1/2, sans jamais se confondre pour autant (Figure 5). Si les assemblages du lac du Loup se situent sur la composante n°2 de l'ACP en raison de l'abondance de *P. cembra* et de *Betula*, ceux du L. du Thyl sont distribués autour du pôle négatif de la composante n°2 caractérisée par *Alnus* et *Betula*. Au cours de cette période, les assemblages du lac du Loup s'éloignent significativement de ceux du lac du Thyl, et ce jusqu'à la fin de l'Holocène. Dès 7770 cal. BP les assemblages du lac du Loup se caractérisent par l'abondance de *Larix decidua* alors que ceux du Thyl sont marqués par *Pinus cembra* et l'absence de *Larix decidua* et ce, jusqu'à la fin de l'Holocène.

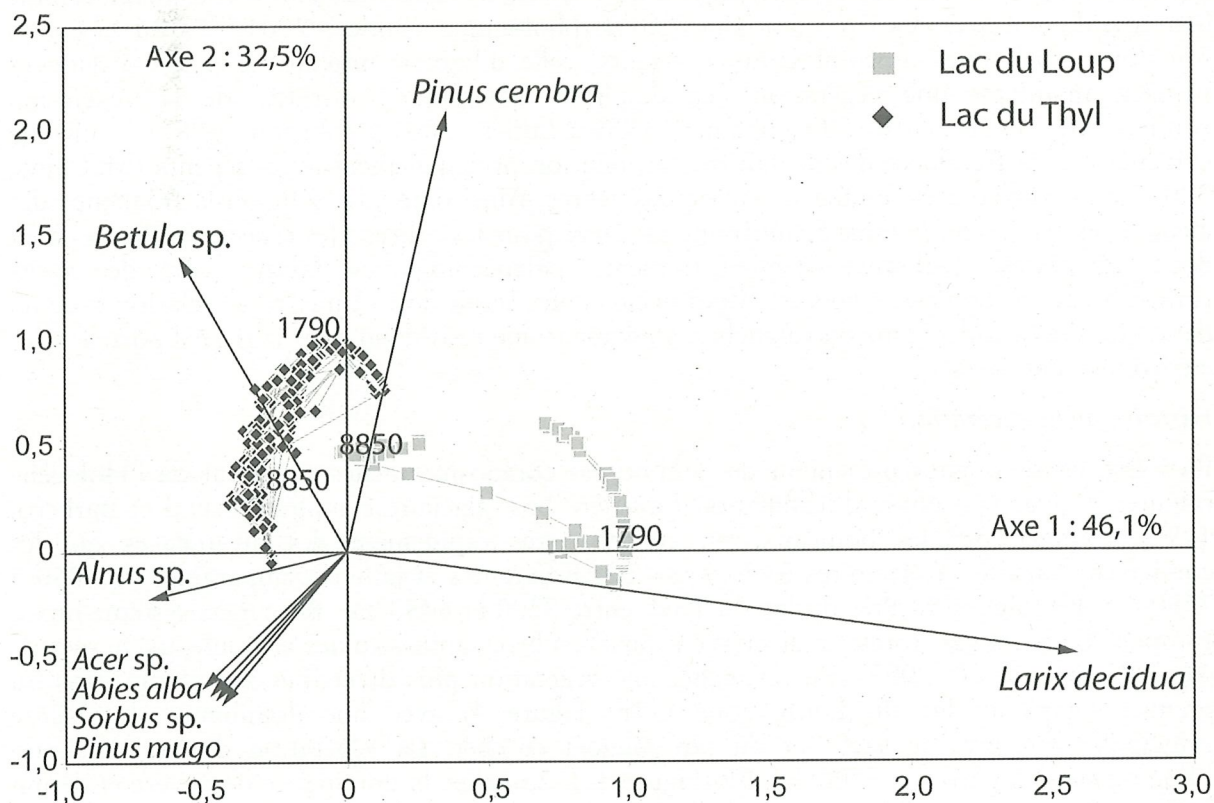


Figure 5. Premier plan factoriel de l'analyse en composante principale (ACP) réalisée sur les données d'influx de macrorestes des deux sites, les losanges noirs illustrent la trajectoire des communautés du lac du Thyl, et les carrés gris représentent la trajectoire du lac du Loup, les dates sont données en années calibrées BP.

## DISCUSSION

### *Impact des avalanches sur la dynamique forestière subalpine*

La présence continue du mélèze de 9000 à 2000 cal. BP autour du lac du Loup et son absence aux abords du lac du Thyl traduisent la différence de processus écologiques sur la composition des communautés forestières. La divergence rapide des trajectoires des deux sites (Figure 5), plus particulièrement le déplacement de la trajectoire écologique du lac du Loup vers des assemblages dominés par le mélèze, tend à appuyer l'hypothèse du rôle des avalanches dans la



structuration des communautés forestières. Le mélèze présente à priori une forte résilience : il est intolérant à l'ombre, sa faible capacité compétitrice et un fort pouvoir de dispersion et de germination sur sol nu en font une espèce de milieux perturbés (Solichon, 1993). Le mélèze pourrait aussi être lié au régime d'incendies : des feux récurrents favoriseraient son développement aux dépens du pin cembro (Gobet *et al.*, 2003 ; Ali *et al.*, 2005b), mais cette hypothèse ne peut être validée en l'absence de données sur les régimes passés d'incendie au lac du Loup. Un autre facteur pouvant expliquer l'absence du mélèze aux abords du lac du Thyl est l'exposition, celle-ci pouvant agir sur la distribution du mélèze qui se retrouve aujourd'hui préférentiellement en versant nord (Muller *et al.*, 2000).

En écologie, les paysages sont typiquement composés de trois types d'éléments fondamentaux : matrice, taches et corridors. Les corridors sont des interruptions linéaires de la matrice paysagère répondant à cinq types de fonctions écologiques principales, celles d'habitat, de transport, de filtre, de source et de puits (Forman et Godron, 1986). Dans la mesure où ils répondent à ces cinq fonctions écologiques, les couloirs d'avalanches sont à considérer comme des corridors à part entière, d'origine géomorphologique (Butler, 2001). Parmi ces cinq fonctions écologiques inhérentes aux corridors, celle d'habitat implique que les avalanches peuvent maintenir une végétation "en équilibre dynamique" distincte de la végétation coniférienne de la matrice (Erschbamer, 1989 ; Butler, 2001). Johnson (1987) a mis en évidence que la fréquence des avalanches, en relation principalement avec la pente (McClung, 2003), est corrélée avec le taux de survie des arbres. Ainsi dans une zone où la fréquence des avalanches est élevée, le taux de mortalité est élevé pour les arbres ; les espèces résilientes sont donc favorisées. L'absence d'enregistrements paléoécologiques faisant état de forêts caractérisées par le mélèze dans les Alpes occidentales serait donc à mettre en relation avec un déficit de sites à fort régime d'avalanches, soulignant une distorsion dans le regard porté sur les environnements passés.

### *Histoire de la végétation*

Bien que les deux sites présentent des similitudes compositionnelles au début de l'Holocène (Figure 5), avec une phase d'installation forestière post-glaciaire classique (David et Barbero, 1995) dominée par les bouleaux, on constate très rapidement des divergences qui les conduisent dans des trajectoires écologiques très différentes et jamais comparables de 8850 à 7790 cal. BP (Figure 5). Près du lac du Thyl, entre 8200 et 6450 cal. BP, un écosystème mixte composé d'un couvert forestier diversifié à pins cembro, sapins, aulnes et bouleaux se met en place (Genries *et al.*, 2009). En revanche, une végétation plus diversifiée s'implante dans un premier temps au lac du Loup : zone L-1b (Figure 4) avec une dominance du mélèze principalement, avec le sapin et du pin mugon/crochet. La végétation du lac du Loup s'homogénéise à partir de 7700 cal. BP (Figure 4, L-2a), avec la dominance de mélèze et de pin cembro, l'influx du mélèze étant le double de celui du pin cembro de 7500 à 4000 cal. BP (Figure 4). Cet influx de mélèze augmente à partir de 4000 cal. BP jusqu'à représenter trente fois celui du pin cembro. La prépondérance du mélèze au sein de l'écosystème du lac du Loup suggère une forte influence des avalanches dans la structuration et la composition passée des forêts locales. Cela corrobore l'hypothèse selon laquelle, la structure et la composition des écosystèmes soumis aux avalanches résultent principalement d'un régime de perturbation qui surpasse l'influence directe d'autres facteurs comme ceux du climat (Kulakowski *et al.*, 2006 ; Rixen *et al.*, 2007). *A contrario*, les assemblages du lac du Thyl de 7500 à 2000 cal. BP sont composés principalement de pin cembro et de bouleau, ce qui implique une trajectoire historique divergente de la forêt du lac du Loup (Figure 5) avec par conséquent, une influence de facteurs autres que les avalanches dans la structuration de cet écosystème.

La fin de l'Holocène montre des divergences de composition probablement dues aux activités sylvo-agropastorales à partir de 3200 cal. BP au lac du Thyl et 2100 cal. BP au lac du Loup (Figure 4, L-3b). Il en résulte que les taxa forestiers diminuent fortement dans le second site et disparaissent du premier. Ce diachronisme de 1000 ans environ peut s'expliquer par le fait que les versants exposés au sud furent généralement déboisés avant les versants exposés au nord, l'exposition y aurait été plus favorable aux activités agropastorales (Oeggl, 1994).



## CONCLUSION

Nous avons mis en évidence un élément de la mosaïque écologique passée des écosystèmes forestiers subalpins de haute Maurienne. De 9000 à 2000 cal. BP un peuplement mixte à mélèze et pin cembro s'est maintenu durablement au lac du Loup. *A contrario*, au lac du Thyl, aucun reste de mélèze n'a été enregistré durant cette période. Les végétations des deux sites étaient proches au début de l'Holocène, puis divergèrent rapidement suite à des forçages écologiques de nature différente. En raison du plan d'échantillonnage, le forçage naturel le plus susceptible d'avoir maintenu l'écosystème forestier du lac du Loup dans un état d'équilibre dynamique est constitué par les avalanches. Le maintien au sein du paysage d'une espèce hautement résiliente, le mélèze, plaide pour cette hypothèse. L'absence d'enregistrements paléoécologiques faisant état de la mosaïque de communautés passée au sein du paysage des Alpes occidentales est due à un manque d'études de sites soumis à de forts régimes de perturbations naturelles. Ces régimes de perturbations naturelles doivent être suffisamment soutenus pour maintenir les écosystèmes forestiers à un état d'équilibre dynamique naturellement dominé par du mélèze.

## BIBLIOGRAPHIE

- Akima H. (1970). A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures. *J. Ass. Comput. Mach.*, 17 : 589-602.
- Akima H. (1991). A method of univariate interpolation that has the accuracy of a third-degree polynomial. *ACM Trans. Math. Softw.*, 17 : 341-366.
- Ali A.A., Carcaillet C., Talon B., Roiron P. et Terral J.-F. (2005a). *Pinus cembra* (arolla), a common tree in the inner French Alps since the early Holocene and above the present treeline: a synthesis based on charcoal data from soils and travertines. *J. Biogeogr.*, 32 : 1659-1669.
- Ali A.A., Roiron P., Guendon J.-L., Poirier P., et Terral J.-F. (2005b). Holocene vegetation responses to fire events in the inner French Alps (Queyras Massif): data from charcoal and geomorphological analysis of travertine sequences. *Holocene*, 15 : 149-155.
- Bhiry N., et Fillion L. (2001). Analyse des macrorestes végétaux. Dans : *Écologie des tourbières du Québec-Labrador / sous la dir. de S. Payette et L. Rochefort*. Québec : Les Presses de l'Université Laval. p. 259-272.
- Birks H.H. (2001). Plant macrofossils. In : *Tracking Environmental Change using Lake Sediments / sous la dir. de J.P. Smol, H.J.B. Birks et W.M. Last*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers. p. 49-74.
- Boratyńska K. et Bobowicz M.A. (2001). *Pinus uncinata* Ramond taxonomy based on needle characters. *Plant Syst. Evol.*, 227 : 183-194.
- Butler D.R. (2001). Geomorphic process-disturbance corridors: a variation on a principle of landscape ecology. *Prog. Phys. Geogr.*, 25 : 237-248.
- Cappers R.T.J., Bekker R.M. et Jans J.E.A. (2006). *Digital Seed Atlas of the Netherlands*. Eelde : Barkhuis Publishing. 502 p.
- Carcaillet C., Talon B., et Barbero M. (1998). *Pinus cembra* et incendies au cours de l'Holocène, 300 m au-dessus de la limite actuelle des arbres dans les Alpes du nord-ouest. *Ecologie*, 29 : 277-282.
- Carcaillet C. et Brun J.-J. (2000). Change of landscape structure during the last 7000 years in the north-western Alps: lessons from soil charcoal. *J. Veg. Sci.*, 11 : 705-714.
- Carneli A. L., Theurillat J.-P., Thimon M., Vadi G. et Talon B. (2004). Past uppermost tree limit in the Central European Alps (Switzerland) based on soil and soil charcoal. *Holocene*, 14 : 393-405.
- David F. (1995). Mise en place des forêts d'altitude en Vanoise et périphérie. *Travaux scientifiques du Parc national de la Vanoise*, 19 : 91-106.
- David F. et Barbero M. (1995). De l'histoire du genre *Betula* dans les Alpes Françaises du Nord. *Rev. Palaeobot. Palyno.*, 89 : 455-467.
- Didier L. (2001). Invasion patterns of European larch and Swiss stone pine in subalpine pastures in the French Alps. *For. Ecol. Manag.*, 145 : 67-77.
- Erschbamer B. (1989). Vegetation on avalanche paths in the Alps. *Plant Ecol.*, 80 : 139-146.
- Forman R. T. T. et Godron M. (1986). *Landscape Ecology*. New York : Wiley. 619 p.

- Fuller J. L. (1998). Ecological impact of the mid-holocene hemlock decline in southern Ontario, Canada. *Ecology*, 79 : 2337-2351.
- Genries A., Mercier L., Lavoie M., Muller S.D., Radakovitch O. et Carcaillet C. (2009). Role of fire frequency in local alteration of cembra pine population. *Ecology*, sous presse.
- Gobet E., Tinner W., Hochuli P. A., van Leeuwen J. F. N., et Ammann B. (2003). Middle to Late Holocene vegetation history of the Upper Engadine (Swiss Alps): the role of man and fire. *Veg. Hist. Archaeobot.*, 12 : 143-163.
- Grimm E. C. (1987). CONISS : a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Comput. Geosci.*, 13 : 13-35.
- Johnson E. A. (1987). The relative importance of snow avalanche disturbance and thinning on canopy plant populations. *Ecology*, 68 : 43-53.
- Jowsey P. C. (1965). An improved peat sampler. *New Phytol.*, 65 : 245-248.
- Kulakowski D., Rixen C. et Bebi P. (2006). Changes in forest structure and in the relative importance of climatic stress as a result of suppression of avalanche disturbances. *For. Ecol. Manag.*, 223 : 66-74.
- McClung D. M. (2003). Magnitude and frequency of avalanches in relation to terrain and forest cover. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, 35 : 82-90.
- Mercier L. (2005). Rôle fonctionnel à long terme des feux sur la diversité biologique et la dynamique des communautés forestières alpines. DEA BEE : Université Montpellier 2 : Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier. 27p.
- Motta R. et Edouard J. L. (2005). Stand structure and dynamics in a mixed and multilayered forest in the Upper Susa Valley, Piedmont, Italy. *Can. J. For. Res.*, 35 : 21-36.
- Motta R. et Garbarino F. (2003). Stand history and its consequences for the present and future dynamic in two silver fir (*Abies alba* Mill.) stands in the high Pesio Valley (Piedmont, Italy). *Ann. For. Sci.*, 60 : 361-370.
- Motta R. et Lingua E. (2005). Human impact on size, age, and spatial structure in a mixed European larch and Swiss stone pine forest in the Western Italian Alps. *Can. J. For. Res.*, 35 : 1809-1820.
- Motta R., Morales M. et Nola P. (2006). Human land-use, forest dynamics and tree growth at the treeline in the Western Italian Alps. *Ann. For. Sci.*, 63 : 739-747.
- Muller S. D., David F. et Wicha S. 2000. Impact de l'exposition des versants et de l'anthropisation des versants sur la dynamique forestière dans les alpes du sud (France). *Geogr. Phys. Quat.*, 54 : 231-243.
- Muller S.D., Nakagawa T., de Beaulieu J.-L., Court-Picon M., Fauquette S. et Genries A. (2006). Paléostrutures de végétation à la limite supérieure des forêts dans les Alpes françaises internes. *C. R. Biologies*, 329 : 502-511.
- Nakagawa T., Edouard J. L. et de Beaulieu J.-L. (2000). A scanning electron microscopy (SEM) study of sediments from Lake Cristol, southern French Alps, with special reference to the identification of *Pinus cembra* and other Alpine *Pinus* species based on SEM pollen morphology. *Rev. Palaeobot. Palyno.*, 108 : 1-15.
- Oeggl K. (1994). The palynological record of human impact highland zone ecosystems. *Monografie di Natura Bresciana*. p. 107-122.
- Oldeman R. A. A. (1990). *Forests : elements of sylvology*. Berlin : Springer-Verlag. 624 p.
- Rixen C., Haag S., Kulakowski D. et Bebi. P. (2007). Natural avalanche disturbance shapes plant diversity and species composition in subalpine forest belt. *J. Veg. Sci.*, 18 : 735-742.
- Risch A. C., Schütz M., Krüsi B. O., Kienast F., Wildi O. et Bugmann H. (2004). Detecting successional changes in long-term empirical data from subalpine conifer forests. *Plant Ecol.*, 172 : 95-105.
- Solichon J.-M. (1993). Structuration et évolution des mélézins des Alpes-Maritimes à partir de méthodes diachroniques comparatives : régénération et dynamique spatiale. Thèse doctorat : Écologie : Université d'Aix-Marseille 3 (Marseille), 89 p.
- Stuiver M. et Reimer P. J. (1993). Extended 14C database and revised CALIB radiocarbon calibration. *Radiocarbon*, 35 : 215-230.
- Talon B., Carcaillet C. et Thinon M. (1998). Études pédoanthracologiques des variations de la limite supérieure des arbres au cours de l'Holocène dans les Alpes françaises. *Geogr. Phys. Quat.*, 52 : 1-14.



## ÉLÉVATION DE LA LIMITE SUPÉRIEURE DU SAPIN PECTINÉ (*ABIES ALBA*) DEPUIS 1950 EN MAURIENNE, SAVOIE

par Fabien Beilhe<sup>1,2</sup>, Christopher Carcaillet<sup>1,2,3</sup> et Sandrine Chauchard<sup>1,2</sup>

**Résumé.** Les changements globaux observés au cours des dernières décennies pourraient modifier la limite de répartition des espèces. Le sapin pectiné (*Abies alba*) régénère actuellement dans la partie supérieure de la vallée de la Maurienne à une altitude supérieure à 2 000 m. La limite supérieure connue du sapin durant les années 1950-1960 était vers 1 900 m. Plusieurs hypothèses peuvent être formulées quant à l'origine de la présence du sapin à ces altitudes. Le recrutement du sapin peut être lié (1) aux processus d'abandon des terres initié depuis la deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle ou (2) aux changements climatiques en cours. L'analyse de la dynamique forestière au sein de placettes forestières subalpines centrées chacune sur un sapin permet de préciser le caractère précoce, concomitant ou tardif du recrutement du sapin par rapport aux autres espèces. Les structures d'âges indiquent une augmentation exponentielle de la densité d'arbres au cours du XX<sup>e</sup> s. avec un recrutement dominé par le mélèze (*Larix decidua*) au cours du XVIII<sup>e</sup> et du XIX<sup>e</sup> siècle, puis par le pin cembro (*Pinus cembra*) au cours du XX<sup>e</sup> siècle. La majorité des sapins s'est installée sporadiquement depuis 1950 et leur recrutement est observé précocement par rapport à l'ensemble des autres espèces dans 29% des placettes, de manière concomitante dans 45% et tardivement dans 26%. Dans la majorité des cas le recrutement du sapin est postérieur à celui du mélèze et antérieur à celui du pin cembro alors qu'il est concomitant avec le recrutement de l'épicéa (*Picea abies*). Ce recrutement semble donc s'ajuster à un schéma classique de dynamique majoritairement liée aux processus de déprise agricole. Néanmoins, le résultat saillant de cette étude est l'accroissement de sa limite altitudinale de plus de 300 m depuis 1950. Cette tendance devrait se poursuivre durant le XXI<sup>e</sup> siècle en raison de la poursuite de l'abandon des pratiques sylvo-pastorales et du changement climatique en cours.

**Mots-clés :** Sapin pectiné (*Abies alba*) - Dynamique forestière - Massif de la Vanoise (Savoie) - Maurienne (Savoie).

Tree line uprising of the Silver Fir (*Abies alba* Mill.) since 1950 in Maurienne, Savoie

Key-words : Silve fir (*Abies alba*) - Forest dynamics - Vanoise Mountains (France) – Maurienne (France).

### INTRODUCTION

Les paysages de montagne façonnés par l'homme depuis des millénaires, ont subi une importante phase de déprise agricole depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle (Didier, 2001 ; Chauchard *et al.*, 2007). La diminution du pâturage et l'arrêt des cultures ont entraîné une expansion de la forêt en montagne mais également au niveau national et européen (Chauchard *et al.*, 2007). Les changements climatiques observés depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle ont également toute chance de tenir un rôle dans les modifications écologiques. Les Alpes ont connu deux phases majeures de réchauffement au cours du dernier siècle : entre 1880 et 1945, et depuis 1982. La dernière période présente les quatre années les plus chaudes depuis 500 ans : 1994, 2000, 2002 et 2003

<sup>1</sup> Centre de bio-archéologie et d'écologie (UMR 5059 CNRS), Université Montpellier 2, Institut de botanique, 163 rue Broussonet, 34090 Montpellier, France.

<sup>2</sup> Paléoenvironnements et Chronoécologie (PALECO EPHE), École pratique des hautes études, Institut de botanique, 163 rue Broussonet, 34090 Montpellier, France.

<sup>3</sup> Auteur pour la correspondance : christopher.carcaillet@univ-montp2.fr.



(Casty *et al.*, 2005). Mais aucun changement des précipitations, par ailleurs observé en Europe, n'a pu être mise en évidence dans les Alpes (Casty *et al.*, 2005). Le réchauffement et la déprise agricole pourrait entraîner une remontée de la limite supérieure des arbres ainsi que des changements dans la composition des forêts (Bekker, 2005 ; Lloyd *et al.*, 2003 ; Parmesan *et al.*, 2003).

Face à ces transformations, il est utile de connaître les modalités de reconquête naturelle de la végétation pour assurer une gestion durable des territoires forestiers. L'utilisation sociétale des territoires est variable dans le temps en fonction des sensibilités du moment et des modes : suivant l'époque et la nature de la demande sociale, la même surface, détenant des potentialités multiples, peut développer des fonctionnalités différentes (Lepart *et al.*, 2000). De nos jours, les forêts de montagne fournissent de nombreux services socio-économiques, récréatifs ou environnementaux (Price, 2003). Les plans d'aménagement doivent intégrer cette gestion multifonctionnelle des forêts de montagne. Cependant la dynamique du système écologique n'est que rarement prise en compte dans la conception de ces plans d'aménagement. Pour accompagner les travaux des gestionnaires, il est donc utile d'approfondir nos connaissances sur la dynamique écologique face aux changements d'utilisation des terres et aux changements climatiques.

Le sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) est une espèce naturelle, essentielle aux forêts de montagne d'Europe. Son appréciation par les forestiers et l'industrie du bois a largement varié au cours du temps (Senn et Suter, 2003). Le sapin est apprécié pour son bois, mais son intérêt réside surtout dans sa fonction de protection, des sols notamment (Schmidt-Vogt *et al.*, 1987). C'est une espèce capable d'accroître la résistance et la résilience des forêts (Brang, 2001), utile en gestion conservatoire car elle contribue à la diversité biologique en augmentant l'abondance des espèces naturellement rares qui lui sont associées (Senn et Suter, 2003).

Des régénérations de sapin s'observent au dessus de 2 000 m d'altitude dans les forêts subalpines. Des faits soulignent le caractère remarquable de cette présence à de telles altitudes : i) la limite supérieure communément admise pour le sapin en France est de l'ordre de 1 800 m (Rameau *et al.*, 1993) ; ii) en Vanoise méridionale, la présence du sapin est attestée jusqu'à une altitude maximale de 1 800 m sur les versants nord et de 1 950 m sur les versants sud (Bartoli, 1966 ; Gensac, 1972) ; et iii) les données paléoécologiques présentent une stabilité multiséculaire de sa limite supérieure (Carcaillet et Muller, 2005). Bien que le sapin fût plus abondant au milieu de l'Holocène, entre 5 000 et 7 000 ans avant nos jours (Muller *et al.*, 2007), sa présence n'a jamais été attestée au dessus de 2 000 m (Carcaillet et Brun, 2000 ; Carcaillet et Muller, 2005). L'analyse dendrochronologique (analyse des cernes annuels de croissance) de la dynamique des sapins et des communautés arborées qui les entourent apporte un éclairage sur la présence actuelle du sapin à des altitudes supérieures à 2 000 m. La déprise pastorale pourrait être à l'origine des régénérations au-dessus de 2 000 m. Dans ce cas, trois comportements du sapin sont susceptibles d'être observés : i) le recrutement du sapin peut être concomitant au reste de la communauté d'arbres, ii) le recrutement du sapin au sein de la communauté arborée peut être tardif et serait alors le produit d'un processus successoral de maturation des forêts post-déprises, et enfin, iii) le recrutement peut être précoce, attestant alors son indépendance au regard de la succession. Ce dernier scénario non trivial implique la mise en œuvre de traits adaptatifs comme la capacité à constituer une banque de semis (Bergeron, 2000 ; Morin, 1990). Le réchauffement climatique en cours (IPCC, 2007) pourrait également jouer un rôle en réduisant les distributions dans les zones méridionales et en repoussant en altitude les limites supérieures des arbres (Aussenac, 2002). Cette étude vise à illustrer et analyser la dynamique du sapin au-dessus de 2 000 m, puis à cadrer cette progression dans un contexte comparatif avec les espèces d'arbres compagnes afin d'apporter un éclairage sur les mécanismes de dynamique.



## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### *Site d'étude*

Le site d'étude se situe en Haute Maurienne (Alpes internes, Savoie), sur le versant nord du mont Cenis à une altitude comprise entre 2 000 et 2 300 m, dans l'étage subalpin supérieur. La vallée de la Maurienne subit un climat continental, froid et sec. C'est l'une des vallées les plus sèches des Alpes (Braun-Blanquet, 1961). Les précipitations (station météorologique de Lanslebourg-Mont Cenis, 2 000 m, 1971-1999) sont réparties assez régulièrement au cours de l'année ( $921 \pm 230$  mm) augmentant au printemps (mai, juin) et à l'automne (septembre, octobre). La durée de l'enneigement est de l'ordre de 5 mois de la mi-novembre jusqu'à la fin avril. La température moyenne annuelle est de  $3,5 \pm 2,2$  °C et les températures du mois le plus froid et du plus chaud sont respectivement de  $-4,6 \pm 2,9$  °C et  $13,3 \pm 6,4$  °C. La période végétative est courte de juin à septembre.

Les sols sont bruns plus ou moins lessivés à mull ou mull-moder et reposent sur une roche mère composée de schistes lustrés carbonatés (Bartoli, 1966). La forêt est essentiellement composée de mélèze d'Europe (*Larix decidua* Mill.), de pin cembro (*Pinus cembra* L.) et d'épicéa (*Picea abies* (L.) Karst). Il faut noter également la présence de quelques espèces de feuillus caducifoliés, surtout dans les couloirs d'avalanches : saule marsault (*Salix caprea* L.), aulne vert [*Alnus viridis* (Chaix) DC.], sorbier des oiseleurs (*Sorbus aucuparia* L.) et plus rarement bouleau verruqueux (*Betula pendula* Roth.). Le sous-bois est caractérisé par le rhododendron (*Rhododendron ferrugineum* L.), la myrtille (*Vaccinium myrtillus* L.), l'airelle des marais (*Vaccinium uliginosum* L.), l'airelle rouge (*Vaccinium vitis-idaea* L.), le genévrier nain (*Juniperus sibirica* Loddiges ex Burgsdorff), l'alisier nain [*Sorbus chamaemespilus* (L.) Crantz], ou encore le camérisier bleu (*Lonicera caerulea* L.).

### *Échantillonnage*

L'échantillonnage centré sur les stations subalpines supérieures à sapin a nécessité une prospection méthodique de la montagne sur une surface d'environ 100 ha sur les communes de Lanslevillard et Bessans. Une surface cumulée de près d'un hectare ( $9\,734$  m<sup>2</sup>) a été composée de 31 placettes de 314 m<sup>2</sup>, chacune constituée d'un cercle d'un rayon de 10 m centré sur un sapin. Pour chaque placette, l'altitude a été relevée par GPS, puis tous les individus ont été identifiés et échantillonnés, soit par carottage à une hauteur de 30 cm, soit par prélèvement d'une section à la base (individus ayant un diamètre inférieur à 5 cm). Enfin, la circonférence à 30 cm de l'ensemble des individus a également été mesurée et la hauteur des individus inférieurs à 180 cm a été mesurée. Les circonférences sont utilisées pour déduire les surfaces terrières (surfaces occupées par les troncs par projection au sol).

### *Détermination de l'âge des individus*

Les échantillons (carottes ou sections) ont été séchés à température ambiante puis poncés afin de rendre visibles les cernes de croissance. L'étude des cernes d'accroissement a été effectuée sous une loupe binoculaire et a permis une première estimation de l'âge des arbres. Cette première estimation doit être corrigée car certaines carottes n'interceptent pas le centre de l'arbre et sont donc incomplètes, et en raison du prélèvement à 30 cm du sol.

La longueur du rayon faisant défaut pour les carottes incomplètes a été estimée grâce à une méthode graphique : la position du cœur est localisée en ajustant la courbure du cerne le plus interne à des cercles concentriques (Arno et Sneek, 1977 ; Chauchard *et al.*, 2006). Le nombre de cernes manquants est ensuite quantifié en calculant le nombre moyen de cernes sur des rayons de longueurs correspondantes issus des sections de plantules. Le nombre obtenu est ensuite ajouté au nombre de cernes de la carotte pour obtenir l'âge estimé de l'arbre à hauteur de carottage. Ce procédé est utilisé pour les trois espèces principales (*Pinus cembra*, *Larix decidua* et *Picea abies*). Le sapin présentant peu d'échantillons, le nombre moyen de cernes

pour un rayon donné a été calculé à partir de la relation épaisseur cumulée des cernes *versus* le nombre de cernes.

La relation âge-hauteur a été analysée (Chauchard *et al.*, 2006 ; Kajimoto *et al.*, 2002, Mast *et al.*, 1998) afin d'estimer l'âge des arbres à 30 cm, hauteur d'échantillonnage. Cette relation a été modélisée à l'aide d'une régression linéaire (Tableau I). Par cette méthode, l'âge estimé pour atteindre 30 cm, la hauteur de carottage, est de  $17 \pm 7$  ans pour *Picea abies* (n=23),  $13 \pm 9$  ans pour *Larix decidua* (n=144) et  $10 \pm 5$  ans pour *Pinus cembra* (n=665). La hauteur de carottage n'a pas pu être corrigée chez *Abies alba* en raison du faible nombre d'individus. Malgré une variabilité forte, il est plus juste d'utiliser l'âge estimé par cette méthode que l'âge obtenu à la hauteur de carottage.

Espèces	Nombre d'échantillons (N)	Équation	Âge (années) à 30 cm ( $\pm\sigma$ )
<i>Pinus cembra</i>	665	$y = 0,19x + 4,7$	$10 \pm 5$
<i>Larix decidua</i>	144	$y = 0,15x + 8,22$	$13 \pm 9$
<i>Picea abies</i>	23	$y = 0,15x + 12,34$	$17 \pm 7$

Tableau I. Équations allométriques permettant d'étalonner le nombre nécessaire d'années pour atteindre la hauteur de 30 cm (hauteur de carottage), où  $x$  est l'âge de l'arbre et  $y$  sa hauteur (exprimée en logarithme népérien). N correspond au nombre de plantules employées pour établir le modèle.

### Analyses

Afin d'avoir une vision moyenne et de représenter la variabilité de composition et de structure entre les 31 placettes, les effectifs des individus en fonction des espèces sont représentés sous forme de boîte à moustache : la barre centrale correspondant au nombre moyen d'individus par placette pour une espèce donnée, le bas et le haut de la boîte correspondant respectivement au premier et au troisième quartile de la distribution des effectifs par espèce (50% des observations), le bas et le haut de la barre verticale correspondant respectivement au minimum et au maximum d'effectifs par espèces dans l'ensemble des placettes. Enfin, les points correspondent aux valeurs extrêmes.

Les âges estimés et corrigés des individus sont utilisés pour construire les structures d'âges. Les individus morts (n=83) ainsi que les carottes ayant un centre pourri (n=28) sont exclus de l'analyse. Nous avons choisi de représenter le nombre médian, le premier et le troisième quartile, ainsi que le minimum et maximum du nombre d'individus présentés par l'ensemble des placettes, et ce pour chacune des classes d'âge (classes de 10 ans). L'âge moyen de l'ensemble des individus, excepté le sapin, puis des principales espèces de chaque placette a été calculé, puis comparé à l'âge du sapin afin de situer le recrutement de ce dernier dans la dynamique générale de sa placette.

## RÉSULTATS

### Caractéristiques des 31 placettes

Les 31 placettes comportent au total 1 735 individus et présentent une densité moyenne (surface terrière) de  $36,5 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  pour un nombre total d'individus, vivants et morts, par placette variant de 17 à 112. Le pin cembro est l'espèce la plus abondante avec 928 individus cumulés (53%), et la plus largement distribuée puisqu'elle est la seule à être présente dans toutes les placettes, exception faite du sapin au centre de chacune d'elle (Figure 1a). Le mélèze



est la deuxième espèce la plus abondante avec 590 individus au total (34%). Il est également bien distribué dans 30 placettes sur 31. Bien que l'épicéa présente un nombre total d'individus faible (6%), il est présent dans les deux tiers des placettes. Les feuillus (saule marsault, aulne vert, sorbier des oiseleurs, bouleau verruqueux) sont moins abondants, représentant 5% du nombre total d'individus, et les moins bien répartis. Le sapin est peu abondant et représente seulement 2% des individus, si bien que la majorité des placettes ne comporte qu'un seul sapin. Un seul pin sylvestre (*Pinus silvestris* L.) a été observé, et n'a donc pas été représenté dans les figures 1 et 2.

Chez les plantules et les arbustes (Pl.,  $\varnothing < 5$  cm, Figure 1b), le pin cembro est dominant et ses effectifs sont très variables d'une placette à l'autre. Le mélèze suit, en comptant pour 18% des individus. A contrario, chez les arbres (Arb,  $\varnothing > 5$  cm, Figure 1b), le mélèze est l'espèce principale, avec 62% des individus. Alors que le pin cembro domine les plantules et les arbustes, les arbres ne comptent que pour 22% des individus. L'épicéa et le sapin sont légèrement mieux représentés chez les arbres que chez les plantules (Figure 1b). À l'inverse, les feuillus sont davantage représentés chez les plantules.

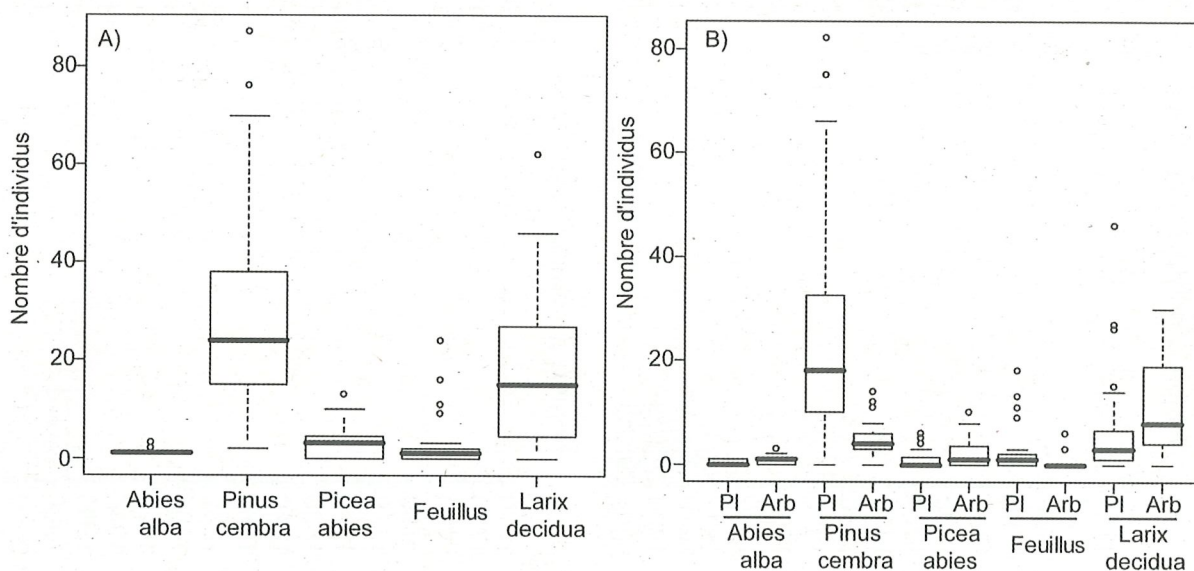


Figure 1. Composition des 31 placettes des effectifs totaux (A), et des effectifs des plantules et des arbustes (B) (Pl,  $\varnothing < 5$  cm) et des arbres (Arb,  $\varnothing > 5$  cm) observés pour chacune des espèces.

La figure se comprend ainsi : la barre centrale est la médiane, la boîte représente 50% des valeurs (du 1<sup>er</sup> quartile au 3<sup>ème</sup> quartile), les barres représentent les minima et maxima, et les points les valeurs extrêmes.

### Structures d'âge

Le sapin a régénéré de façon sporadique depuis 1849 avec une augmentation pendant les cinquante dernières années (Figure 2a). Considérant l'ensemble des espèces, quelques rares individus ont régénéré au cours du XVIII<sup>e</sup> et du XIX<sup>e</sup> siècle (Figure 2b). Une augmentation exponentielle du recrutement est observée au cours du XX<sup>e</sup> siècle, notamment depuis les années 1950. L'ensemble des espèces suit cette tendance. Le mélèze et le pin cembro se sont installés de manière précoce dans certaines placettes, mais leur recrutement ne s'est généralisé, respectivement, qu'à partir de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et des années 1950 (Figures 2c, 2e). L'augmentation du recrutement est cependant plus marquée chez le pin cembro que chez le mélèze. L'épicéa et les feuillus (*Alnus viridis*, *Sorbus aucuparia*, *Salix caprea*) se sont installés plus récemment dans les peuplements et ont vu leur recrutement augmenter, respectivement, à partir des années 1960 et 1980 (Figures 2d, 2f).

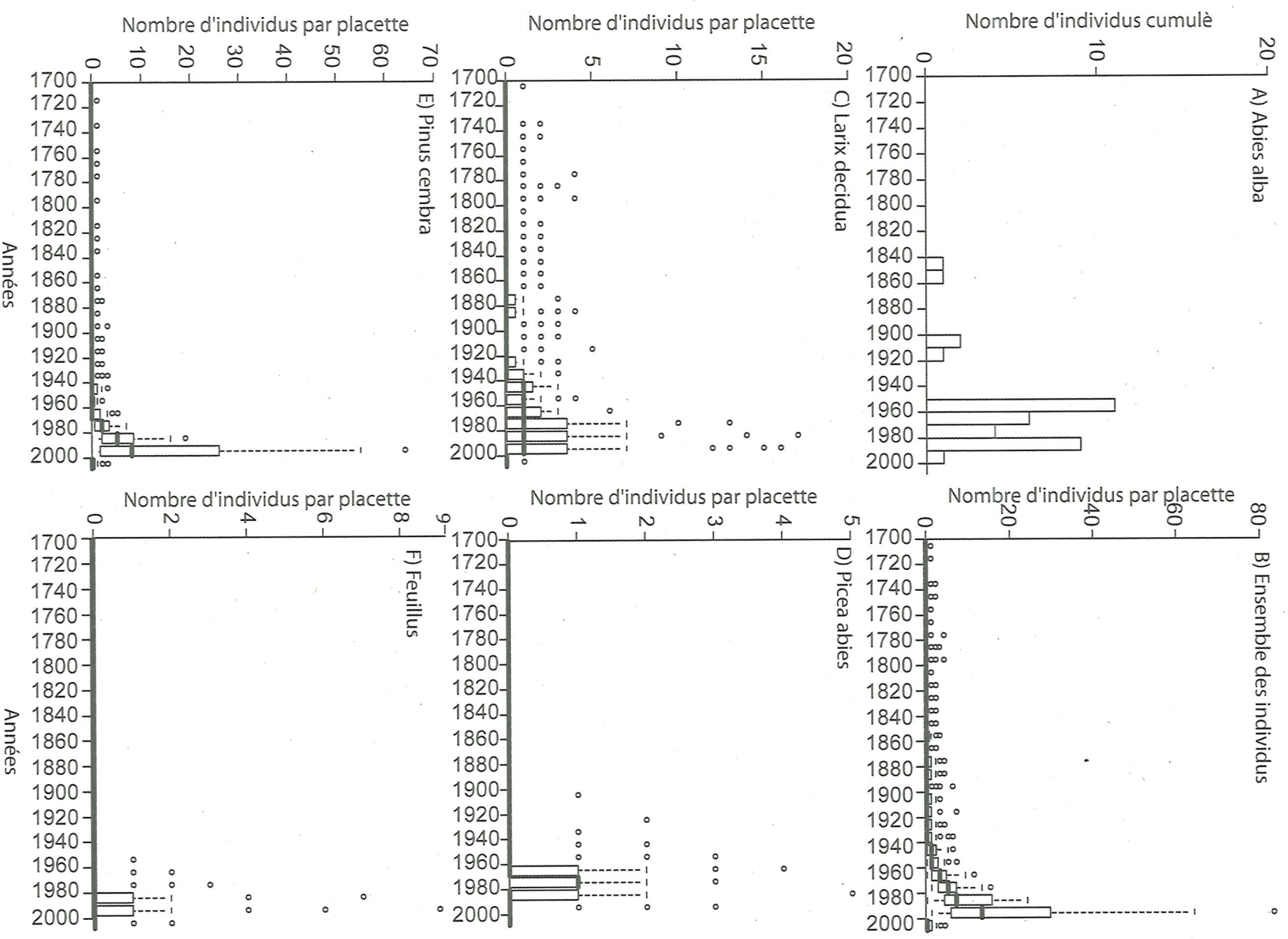


Figure 2. Structure d'âge des 31 placettes en fonction des décennies.  
 A) Effectif cumulé de sapins des 31 placettes B) l'ensemble des individus, C) du mélèze, D) de l'épicéa, E) du pin cembro et F) des feuillus.



### Dynamique du sapin

Lorsque nous examinons la répartition des sapins en fonction de l'altitude, nous remarquons que les plus vieux individus sont situés juste au-dessus de 2 000 m d'altitude (Figure 3). Le sapin observé le plus alticole se trouve à 2 226 m. La majorité des sapins a régénéré durant les 50 dernières années de façon assez homogène entre 2 000 et 2 226 m d'altitude.

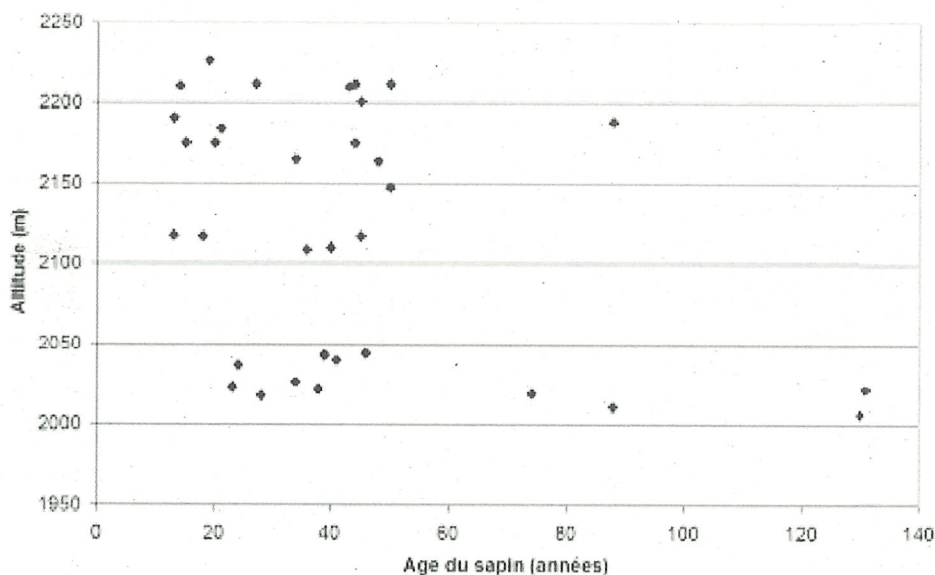


Figure 3. Âge des sapins (en années avant 2004) en fonction de leur altitude.

Afin de situer le recrutement du sapin dans la dynamique générale de sa placette, l'âge du sapin a été représenté en fonction de l'âge moyen des arbres de sa placette et de l'âge moyen des trois principales espèces par placette (pin cembro, mélèze et épicéa). Un intervalle d'incertitude de 20 ans a été déterminé de part et d'autre de l'âge estimé du sapin pour atténuer les risques d'appréciation dendrochronologique de l'âge et parce que tous les arbres associés à une phase donnée de recrutement régénèrent sur plusieurs années. L'âge moyen des placettes, sapin non compris, coïncide avec l'âge du sapin à  $\pm 20$  ans dans 14 placettes (45%, Figure 4a). Dans 9 placettes (29%) l'âge du sapin est plus grand que l'âge moyen du reste de la communauté et dans 8 placettes (26%) l'âge du sapin est inférieur à l'âge moyen de la communauté (Figure 4a). En général, l'âge du sapin correspond à l'âge moyen des épicéas quand ils sont présents dans les placettes (95% des cas, Figure 4b). Il est supérieur ou égal à celui des pins cembro pour, respectivement, 35% et 51% des placettes. Il est inférieur ou égal à l'âge moyen des mélèzes dans, respectivement, 40% et 47% des cas.

## DISCUSSION

Nos résultats montrent que la limite de distribution du sapin a subi de profonds changements depuis les années 1940-1950, se traduisant par des recrutements à des altitudes où sa présence n'était pas rapportée, voici encore 30 ou 40 ans, par des observateurs avisés (Bartoli, 1966 ; Gensac, 1974). Par rapport à ces données anciennes, la limite supérieure du sapin s'est élevée d'environ 300 à 400 m, ce qui est significatif et remarquable (Figure 3).

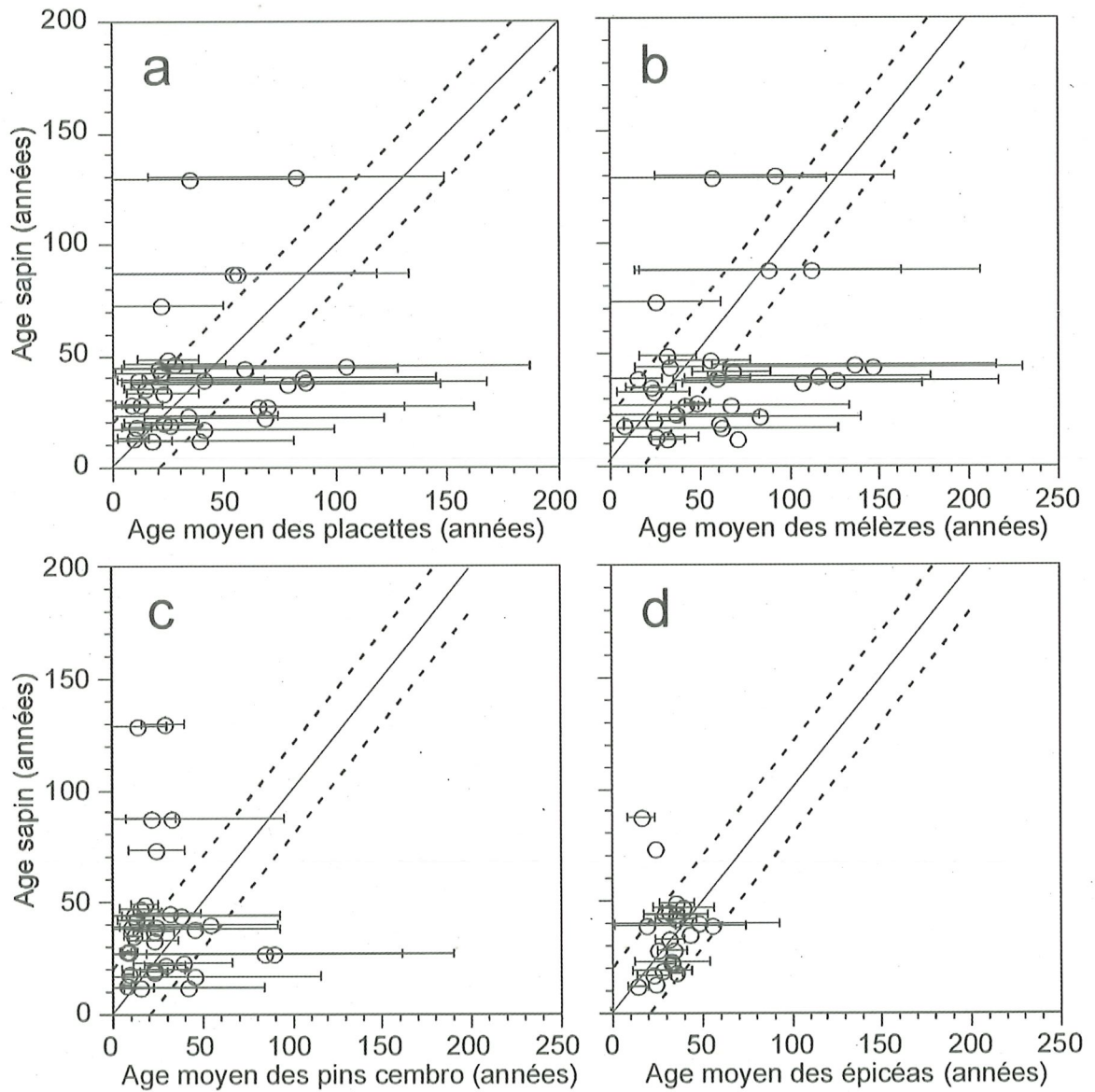


Figure 4. a) Âge du sapin en fonction de l'âge de sa placette (sapin exclu du calcul de la moyenne) ; relation entre l'âge du sapin *Abies alba* et l'âge moyen du peuplement de mélèze *Larix decidua* (b), de pin cembro *Pinus cembra* (c) et d'épicéa *Picea abies* (d) par placette.



### *Dynamique des peuplements*

La végétation présente sur le site d'étude a subi de profonds changements au cours des trois derniers siècles. Les arbres rencontrés dans la forêt qui ont été utilisés pour reconstituer l'histoire du site sont ceux qui ont survécu à la fois aux perturbations naturelles et à l'emprise humaine : c'est l'expression d'un bilan net démographique entre régénération et mortalité. L'absence d'arbres dans une classe donnée peut être liée à un échec dans l'installation à cette époque, à une forte mortalité des plantules ou encore à des interventions humaines (Johnson *et al.*, 1994). Les structures d'âge reflètent l'emprise humaine sur le site d'étude depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle jusqu'au début du XX<sup>e</sup> siècle (Figure 2b). Dans la plupart des forêts subalpines des Alpes, des modifications structurelles d'origines anthropiques ont été apportées à la forêt pour assurer la fonction de production de bois mais également pour augmenter les surfaces de pâturage pour le bétail (Motta et Lingua, 2005). Le mélèze était ainsi favorisé car il possède une canopée laissant passer la lumière permettant la croissance d'espèces fourragères, alors que d'autres espèces, comme le pin cembro ou le sapin, ont été progressivement éliminées par des pratiques consistant à déraciner les plantules et les jeunes arbres (Carrer et Urbinati, 2001). La présence dans nos placettes de mélèzes recrutés au XVIII<sup>e</sup> et au XIX<sup>e</sup> siècle (Figure 2c) et la relative absence du pin cembro (Figure 2e) témoigneraient de telles pratiques dans notre site d'étude. Ainsi, le manque de régénération du pin cembro (Figure 2e) ou du sapin avant 1900 (Figure 2a) peut s'expliquer par un arrachage systématique des plantules, mais également par la pression exercée par le pâturage (piétinement, broutage). Le début du XX<sup>e</sup> siècle marque le début d'une recolonisation progressive du site avec une accélération du recrutement à partir des années 1950 (Figure 2b). Alors que le mélèze dominait le recrutement au XVIII<sup>e</sup> et au XIX<sup>e</sup> siècle, le pin cembro a vu son recrutement dominer progressivement au cours du XX<sup>e</sup> siècle (Figure 2e). Il en résulte aujourd'hui une véritable dichotomie dans la structure de la végétation : le mélèze, héritage de la gestion pastorale passée, constitue la majorité des arbres de la canopée alors que le pin cembro domine parmi les plantules et les arbustes (Figure 1b).

Bien que le pin cembro domine le recrutement depuis les années 1950, le mélèze a vu également son recrutement augmenter depuis cette époque (Figure 2c). Le pic de régénération du mélèze peut être expliqué par son exigence en lumière (Motta et Lingua, 2005) et par sa capacité à coloniser des milieux ouverts par dissémination à longue distance de ces graines petites, légères et ailées. L'abandon des pâtures et des prairies de fauche amorcé vers 1860 et accentué au cours du XX<sup>e</sup> siècle a pu ainsi profiter à la régénération du mélèze (Didier, 2001).

Contrairement au mélèze, le pin cembro produit de grosses graines, sans ailes, qui restent soudées à l'échelle et dont la dissémination dépend d'un oiseau, le casse-noix moucheté (*Nucifraga caryocatactes* L.). Le statut de protection du casse-noix moucheté (annexe III de la Convention de Berne, Directive 79/409/CEE) associé à l'abandon des prairies de fauche et des pâtures pourrait expliquer le pic de régénération du pin cembro dans ces forêts. De plus, le pin cembro, plus résistant à l'ombrage que le mélèze, est souvent qualifié d'espèce post-pionnière (Krüsi et Moser, 2000). Le succès de régénération du pin cembro tient donc dans sa capacité à coloniser des milieux divers, sa tolérance à l'ombre et dans la dispersion à longue distance de ses graines par le casse-noix.

Le faible nombre d'épicéas observés dans nos placettes (Figure 1a) s'explique car il est peu alticole. Son recrutement est concomitant de l'augmentation exponentielle du recrutement des autres espèces observées dans les années 1950. Ce recrutement peut ainsi être expliqué par l'abandon des terres à cette époque. L'atténuation du nombre de régénérations dans les décennies 1990 et 2000 pourrait être due à sa faible capacité compétitrice face à d'autres espèces mieux adaptées à pousser à une telle altitude, voire à des difficultés liées à des inhibitions de développement ou de croissance associées à l'expansion du couvert des éricacées (Pellissier, 1993 ; Gallet, 1994 ; Ponge *et al.*, 1998).

La présence des feuillus sur nos placettes est majoritairement liée aux couloirs d'avalanches où la disponibilité en lumière et en nutriments est grande. La présence d'un pic de régénération chez les feuillus ces dernières années est donc à mettre en relation avec la fréquence des



avalanches plutôt qu'avec la déprise agropastorale. De plus, à l'exception de l'aulne vert, les espèces de feuillus rencontrées (bouleau verruqueux, saule marsault, sorbier des oiseleurs) n'abondent généralement qu'en dessous de 2 000 m d'altitude, ce qui pourrait expliquer leur faible abondance sur le site d'étude.

### *Dynamique du sapin*

Le sapin pectiné régénère actuellement jusqu'à une altitude exceptionnelle de 2 226 m (Figure 3), c'est-à-dire plus de 300 m au-dessus de sa limite habituellement rapportée (Chas, 1994 ; Rameau *et al.*, 1993). Le sapin est donc présent de 300 à 400 m au-dessus de ce qui a été observé il y a 40 ou 50 ans dans la même zone et à moins de 200 m de la limite supérieure des arbres actuellement située à 2 400 m (Bartoli, 1966 ; Gensac, 1972). Le recrutement de la majorité des sapins sur le site a eu lieu depuis 50 ans et coïncide avec l'augmentation exponentielle du nombre total d'individus. Cependant, la régénération des sapins s'est effectuée de manière sporadique, et aucune augmentation massive de son recrutement n'a été observée pendant les dernières décennies.

La place du sapin par rapport à la dynamique générale de son environnement immédiat est variée : son recrutement est dans la moyenne de la placette pour un tiers d'entre elle ; dans environ un tiers, son recrutement est plus ancien, et dans environ un tiers des placettes il est plus récent. Les placettes où le sapin est plus vieux que le reste des individus sont celles comportant les plus vieux sapins situés vers 2 000 m d'altitude. Le sapin a très certainement la capacité de se maintenir dans la strate herbacée pendant de longues périodes sous la forme d'une banque de semis, processus connu pour une espèce proche et aux traits analogues, le sapin baumier (*Abies balsamea*), poussant en forêt boréale canadienne (Morin et Laprise, 1997). Cette stratégie permet à la population de faire face aux perturbations affectant la canopée uniquement et, lorsque les conditions sont favorables, de se développer. Ces vieux sapins pourraient donc être des individus préétablis avant perturbation (ex. : avalanche) sous forme de banque de semis résistante à la coulée de neige en raison de la flexibilité des plantules. Les placettes où le sapin est plus jeune que le reste de la placette ont été échantillonnées dans des vieux mélézins. En effet, le sapin est une espèce tolérante à l'ombre, capable d'orienter ses aiguilles dans un plan horizontal pour capter le maximum de lumière (Pages *et al.*, 2003). Enfin dans le tiers des placettes, l'âge du sapin et l'âge moyen de la communauté sont concomitants, ce qui tend à montrer un processus de colonisation en moyenne synchrone entre le sapin et les autres espèces. Quand nous comparons l'âge du sapin avec l'âge moyen des trois principales espèces, la place du sapin dans la dynamique est plus claire. En effet dans une grande majorité des cas, le sapin est recruté en même temps ou après la majorité des mélèzes, en même temps que les épicéas quand ils sont présents, et en même temps ou avant la majorité des pins cembro. Le recrutement du sapin semble donc suivre un schéma classique de remplacement des espèces s'ajustant au modèle de succession de Clements (1916) : dans ces placettes le sapin se comporte comme une espèce de fin de succession qui est recruté après le mélèze et avant le pin cembro. Ce schéma commun à l'ensemble des placettes témoigne en faveur d'une succession de déprise agricole sans toutefois pouvoir écarter l'hypothèse du changement climatique. Il aurait été intéressant d'éprouver l'effet du climat sur les régénérations de sapin en comparant leur année d'installation avec les données météorologiques de la zone d'étude (Chauchard *et al.*, 2007). Le faible nombre d'individus n'a pas permis une telle analyse. Le sapin est une espèce qui tolère peu la sécheresse, notamment au stade plantule (Tan et Bruckert, 1992). De plus, des analyses basées sur la relation cernes-climat ont montré que les étés pluvieux sont le facteur principal stimulant la croissance radiale et contrôlant la distribution de cette espèce (Desplanque *et al.*, 1998 ; Macias *et al.*, 2006). Le changement climatique pourrait entraîner une montée en altitude du sapin au bénéfice d'un accroissement des températures (+0,6°C depuis 1861 ; IPCC, 2007), sachant que les précipitations sont d'autant plus importantes que l'on s'élève en altitude.



**Remerciements.** Nous remercions Loïc Bircker, Fanny Combet, Nicolas Fauvard, Fabien Roiron pour leur aide sur le terrain et au laboratoire.

## BIBLIOGRAPHIE

- Arno S.F. et Sneek K.M. (1977). A method for determining fire history in coniferous forests of the mountain west. *USDA Forest Service General*, p. 1-29.
- Aussenac G. (2002). Ecology and ecophysiology of circum-Mediterranean firs in the context of climate change. *Ann. for. sci.*, 59 : 823-832.
- Bartoli C. (1966). Étude écologique sur les associations végétales forestières de la Haute Maurienne. *Ann. Sci. For.*, 23: 432-761.
- Bekker M.F. (2005). Positive feedback between tree establishment and patterns of subalpine forest advancement, Glacier National Park, Montana, U.S.A. *Art. Antarct. Alp. Res.*, 37 : 97-107.
- Bergeron Y. (2000). Species and stand dynamics in the mixed woods of Quebec's southern boreal forest. *Ecology*, 81 : 1500-1516.
- Brang P. (2001). Resistance and elasticity: promising concept for the management of protection forests in the European Alps. *For. Ecol. Manag.*, 145 : 107-119.
- Braun-Blanquet J. (1961). Die inneralpine Trockenvegetation. Stuttgart : G. Fisher. 273 p. (Geobotanica selecta ; 1).
- Carcaillet C. et Brun J.J. (2000). Changes in landscape structure in the northwestern Alps over the last 7000 years: lessons from soil charcoal. *J. Veg. Sci.*, 11: 705-714.
- Carcaillet C. et Muller S.D. (2005). Holocene tree-limit and distribution of *Abies alba* in the inner French Alps: anthropogenic or climatic changes ? *Boreas*, 34: 468-476.
- Carrer M. et Urbinati C. (2001). Spatial analysis of structural and tree-rings related parameters in a timberline forest in the Italian Alps. *J. Veg. Sci.*, 12: 643-652.
- Casty C., Wanner H., Luterbacher J., Esper J. et Böhm R. (2005). Temperature and precipitation variability in the European Alps since 1500. *Int. J. Clim.* 25: 1855-1880.
- Chas, E. 1994. Atlas de la flore des Hautes-Alpes. Conservatoire botanique national alpin de Gap-Charance. Gap.
- Chauchard S. (2007). Dynamique d'une forêt de montagne méditerranéenne dans un monde changeant. Thèse de Doctorat : Biologie des populations et écologie : Montpellier 2. 146 p.
- Chauchard S., Pille G. et Carcaillet C. (2006). Large herbivores control the invasive potential of nonnative Austrian black pine in a mixed deciduous Mediterranean forest. *Can. J. For. Res.*, 36 : 1047-1053
- Chauchard S., Carcaillet C. et Guibal F. (2007). Patterns of land-use abandonment control tree-recruitment and forest dynamics in Mediterranean mountains. *Ecosystems*, 10 : 936-948.
- Clements F.E. (1916). *Plant succession : an analysis of the development of vegetation*. Washington DC : Carnegie Institute. 512 p. (Publication ; 242).
- Desplanque C., Rolland C. et Michalet R. (1998). Comparative dendroecology of the silver fir (*Abies alba*) and the Norway spruce (*Picea abies*) in an Alpine valley of France. *Can. J. For. Res.*, 28 : 737.
- Didier L. (2001). Invasion patterns of European larch and Swiss stone pine in subalpine pastures in the French Alps. *For. Ecol. Manag.*, 145 : 67-77.
- Gallet C. (1994). Allelopathic potential in bilberry-spruce forests: influence of compounds on spruce seedlings. *J. Chem. Ecol.*, 20 : 1009-1024.
- Gensac P. (1972). Notice explicative de la carte écologique Moûtiers Parc national de la Vanoise 1/100000. *Trav. sci. Parc natl. Vanoise*, 2 : 49-73.
- Gensac P. (1974). Catalogue écologique des plantes vasculaires du Parc national de la Vanoise et des régions limitrophes. *Trav. sci. Parc natl. Vanoise*, 4 : 1-232.
- IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change] (2007). Climate change 2007: The physical science basis / Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge : Cambridge University Press. 996 p.
- Johnson E.A., Miyaniishi K. et Kleb H. (1994). The hazards of interpretation of static age structures as shown by stand reconstruction in *Pinus contorta*-*Picea engelmannii* forest. *J. Ecol.*, 82 : 923-931.

- Kajimoto T., Seki T., Ikeda S., Daimaru H., Okamoto T. et Onodera H. (2002). Effects of snowfall fluctuation on tree growth and establishment of subalpine *Abies mariesii* near upper forest-limit of Mt. Yumori, Northern Japan. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, 34 : 191-200.
- Krüsi B.O. et Moser B. (2000). Impacts of snow and ungulates on the successional development of a mountain pine forest in the Swiss National Park. In : *Succession research in the Swiss National Park / sous la dir. de M. Schütz, B.O. Krüsi et P.J. Edwards*. Birmensdorf : Scientific council of the Swiss national Park. p. 131-164.
- Lepart J., Marty P. et Rousset O. (2000). Les conceptions normatives du paysage : le cas des Grands Causses. *Nature Sci. Soc.*, 8 : 16-25.
- Lloyd A.H. et Fastie C.L. (2003). Recent changes in treeline forest distribution and structure in interior Alaska. *Ecoscience*, 10 : 176-185.
- Macías M., Andreu L., Bosch O., Camarero J.J. et Gutiérrez E. (2006). Increasing aridity is enhancing silver fir (*Abies alba* Mill.) water stress in its south-western distribution limit. *Climatic Change*, 79 : 289-313.
- Mast J.N., Veblen T.T. et Linhart Y.B. (1998). Disturbance and climatic influences on age structure of ponderosa pine at the pine/grassland ecotone, Colorado Front Range. *J. Biogeogr.*, 25 : 743-755.
- Morin H. (1990). Dendro-ecological analysis of a boreal fir population resulting from a blowdown in Quebec. *Can. J. For. Res.*, 20 : 1753-1758.
- Morin H. et Laprise D. (1997). Seedling bank dynamics in boreal balsam fir forest. *Can. J. For. Res.*, 27 : 1442-1451.
- Motta R. et Lingua E. (2005). Human impact on size, age, and spatial structure in a mixed European larch and Swiss stone pine forest in the Western Italian Alps. *Can. J. For. Res.*, 35 : 1809-1820.
- Muller S.D., Nakagawa T., de Beaulieu J.-L., Court-Picon M., Carcaillet C., Miramont C., Roiron P., Boutterin C., Ali A.A. et Bruneton H. (2007). Postglacial migration of silver fir (*Abies alba* Mill.) in the south-western Alps. *J. Biogeogr.*, 34 : 876-899.
- Pages J.P., Pache G., Joud D., Magnan N. et Michalet R. (2003). Direct and indirect effects of shade on four forest tree seedlings in the French Alps. *Ecology*, vol. 84, n°10 : 2741-2750
- Pal J.S., Giorgi F. et Xunqiang B. (2004). Consistency of recent European summer precipitation trends and extremes with future regional climate projections. *Geophys. Res. Lett.*, 31 : L13202.
- Parmesan C. et Yohe G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate impacts across natural systems. *Nature*, 421 : 37-42.
- Pellissier F. (1993). Allelopathic inhibition of spruce germination. *Acta Oecol.*, 14 : 211-218.
- Ponge J.-F., André J., Zackrisson O., Bernier N., Nilsson M.-C. et Gallet C. (1998). The forest regeneration puzzle, biological mechanisms in humus layer and forest vegetation dynamics. *BioScience*, 48 : 523-530.
- Price M.F. (2003). Why mountain forests are important ? *Forest. Chron.*, 79 : 219-222.
- Rameau J.-C., Mansion D., Dumé, G. [et al.] (1993). Flore forestière française : guide écologique illustré. 2, Montagnes. Paris : Institut pour le développement forestier : Ministère de l'agriculture et de la pêche : Direction de l'espace rural et de la forêt : École nationale du génie rural des eaux et des forêts. 1 vol. (2421 p.).
- Schmidt-Vogt H., Wütherich G. et Deichner P. (1987). Untersuchungen zur Sturmstabilität von Fichten und Tannen in Fichten-Tannen-Mischbeständen auf verschiedenen Standorten Süddeutschlands. *Allg. Forst-u. J.-Ztg.*, 158 : 42-50.
- Senn J. et Suter W. (2003). Ungulate browsing on silver fir (*Abies alba*) in the Swiss Alps: beliefs in search of supporting data. *For. Ecol. Manag.* 181 : 151-164.
- Tan B.S. et Bruckert S. (1992). Effect of physical environmental factors on the initial stages of the natural regeneration of fir (*Abies alba* Mill.) at some sites in the Jura. *Ann. For. Sci.*, 49 : 337-350.



## PRÉSENCE DE PINS PROSTRÉS DANS LE MASSIF DU MONT CENIS (*PINUS MUGO* TURRA) : DISCUSSION SUR LA PÉRENNITÉ DE LA POPULATION

par Christopher Carcaillet<sup>1,2</sup>, Adam A. Ali<sup>1,2</sup>, Nicolas Fauvart<sup>1</sup>,  
Paul Roiron<sup>1</sup> et Jean-Frédéric Terral<sup>1</sup>

**Résumé.** Des pins prostrés ont été découverts en juillet 2004 dans la vallée de la Maurienne, sur le versant nord du mont Cenis où ils constituent manifestement une population naturelle et spontanée de *Pinus mugo* subsp. *mughus*. Fragile au regard des effectifs recensés, celle-ci est actuellement isolée, et pourrait résulter de populations qui, il y a plus de 9 500 ans, ont dû couvrir de plus vastes territoires des vallées duranciennes à la vallée de la Maurienne, via la vallée de Suse en Italie. Sur une aire de distribution actuellement fragmentée, le devenir de la population de pins mugho du mont Cenis semble compromis au regard des nécroses importantes observées sur les parties sommitales des houppiers, à l'exception des individus situés hors du domaine skiable du Val Cenis. Une procédure conservatoire semble nécessaire pour préserver cette population naturelle, la seule connue à ce jour dans les Alpes françaises du Nord.

**Mots-clés :** Biogéographie - *Pinus mugo* Turra - Maurienne (Savoie)

**Presence of Mugo Pine in the Mont Cenis (*Pinus mugo* Turra) : discussion on the viability of the population**

**Key-words :** Biogeography - *Pinus mugo* Turra - Maurienne (France).

### INTRODUCTION

Dans les Alpes occidentales, le « pin prostré », considéré comme une sous-espèce *mughus* (Scop.) O. Schwarz du « pin de montagne » *Pinus mugo* Turra (pin mugho), espèce collective prise au sens large (Christensen, 1987 ; Farjon 1998 ; Monteleone *et al.*, 2006), est connu de quelques stations de part et d'autre de la frontière franco-italienne vers 2 000-2 500 m d'altitude (Montacchini, 1968 ; Chas, 1994). Ces populations occidentales de pin mugho constituent avec les stations des Abruzzes (Boratynska *et al.*, 2005) des stations périphériques disjointes d'une aire de distribution très fragmentée et complexe (Hamernik et Musil, 2007). Cette sous-espèce de *Pinus mugo* présente une distribution plus étendue dans les Alpes orientales (Est de la Suisse et de l'Italie, Autriche, Slovénie) et plus à l'Est dans les Carpates, où les peuplements se structurent sous la forme de landes très denses et très étendues (Ozenda, 1985 ; Richardson, 1998 ; Lauber et Wagner, 2001).

En juin et octobre 2004, au cours d'une campagne de prospection de sites paléocéologiques, des pins de forme prostrée et typique de *Pinus mugo* subsp. *mughus* ont été découverts sur le versant nord du massif du mont Cenis (vallée de la Maurienne), zone plutôt dévolue au taxon érigé, le pin à crochet (*P. uncinata* ou *P. m.* subsp. *uncinata*). Ces découvertes nous ont conduits à nous interroger sur la singularité de la présence de cette population au regard de sa

<sup>1</sup> Centre de bio-archéologie et d'écologie (UMR5059 CNRS), Université Montpellier 2, Institut de botanique, 163 rue Broussonet, F-34090 Montpellier, France.

<sup>2</sup> Paléoenvironnement et Chronoécologie, École pratique des hautes études (PALECO EPHE), Institut de botanique, 163 rue Broussonet, F-34090 Montpellier France.

distribution connue, du fait qu'il n'en est fait nulle part mention dans les ouvrages de botanique consacrés à la région Vanoise *sensu lato* (Bartoli, 1966 ; Gensac, 1974 ; Parc national de la Vanoise, 1993). Cette découverte est quasi synchrone de la mise au jour de travertins (accumulations carbonatées riches en empreintes végétales fossiles), dans la haute vallée de Suse (Italie, sud de la Maurienne). Ces travertins présentent de nombreuses empreintes de cônes dont l'analyse morphologique a conduit à la détermination de *Pinus sylvestris* et *P. mugo mughus* daté de 11 500 à 9 500 ans avant nos jours (Ali *et al.*, 2006).

Cette note vise à décrire la population de pin mugho découverte sur les pentes du mont Cenis, apporter des informations importantes quant à son probable indigénat et considérer son statut en terme de vulnérabilité et de conservation.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Description du site

La zone d'étude se situe en Haute Maurienne, au sud du massif de la Vanoise (Alpes internes, Savoie). La vallée de la Maurienne subit un climat continental, froid et sec. C'est l'une des vallées les plus sèches de l'arc alpin. Les précipitations (Tableau I) sont régulièrement réparties au cours de l'année avec un maximum à la fin du printemps (mai, juin) et au début de l'automne (septembre, octobre). La durée de l'enneigement est de l'ordre de 5 mois de la mi-novembre jusqu'à la fin avril, et la période de végétation est relativement courte, de juin à septembre.

Station	Année	Été (JJA)	Hiver (DJF)
<b>Lanslebourg-Mont Cenis (alt. : 2 000 m, T : 1971-1999 ; P : 1971-1999)</b>			
Températures	3,5 ±2,3	12,7 ±5,1	-4,2 ±1,8
Précipitations	925 ±233	247 ±96	158 ±86
<b>Bessans (alt. : 1 715 m ; T : 1984-1999 ; P : 1951-1999)</b>			
Températures	3,5 ±0,6	12,5 ±0,7	-5,6 ±1,2
Précipitations	884 ±167	201 ±61	239 ±110

Tableau I. Paramètres climatiques de la zone d'étude  
températures (T) mensuelles et précipitations (P) annuelles et saisonnières (moyennes ± écart-types).

Les sols sont bruns faiblement lessivés à humus de type mull ou mull-moder (Bartoli, 1966) ; ils reposent sur des dépôts glaciaires tardi-würmiens couvrant une roche-mère composée de calcschistes et de marbres du Crétacé (Fudral *et al.*, 1994). L'âge moyen des espèces composant le couvert forestier est en général de moins de 60 ans, bien que des parcelles de forêts matures (>300 ans) aient été observées, en particulier sur la commune de Lanslevillard, à l'est du torrent du Chatel (Beilhe *et al.*, 2009). Les forêts subalpines environnantes sont composées pour l'essentiel de mélèze (*Larix decidua* Mill.), pin cembro (*Pinus cembra* L.) et épicéa (L.) Karst. On observe également la présence de feuillus caducifoliés, notamment dans les couloirs d'avalanches de neige : saule marsault (*Salix caprea* L.), aulne vert (*Alnus viridis* (Chaix) DC.), sorbier des oiseleurs (*Sorbus aucuparia* L.) et, plus rarement, bouleau verruqueux (*Betula pendula* Roth.). Le sous-bois comprend rhododendron (*Rhododendron ferrugineum* L.), myrtille (*Vaccinium myrtillus* L.), airelle des marais (*Vaccinium uliginosum* L.), airelle rouge



(*V. vitis-idaea* L.), genévrier nain (*Juniperus sibirica* Loddiges ex Burgsdorff), alisier nain [*Sorbus chamaemespilus* (L.) Crantz], ou encore camérisier bleu (*Lonicera caerulea* L.).

### Archives documentaires

Les documents concernant les travaux et aménagements forestiers réalisés sont conservés aux Archives du service de Restauration des terrains en montagne, à l'Office national des forêts à Chambéry. Toutes les archives forestières domaniales et communales de la division de Haute Maurienne (Modane) ont été examinées en novembre 2005. Une attention particulière a été portée aux documents concernant les communes de Lanslebourg et de Lanslevillard. L'objectif était de vérifier les registres de plantation et de s'assurer qu'aucun pin mugho n'avait été semé ou planté, sous les appellations possibles suivantes : pin mugo, p. de(s) montagne(s), p. à crochet, p. couché, *Pinus pumilio*, *P. mugo*, *P. montana*, *P. uncinata*, *P. mughus*.

### Prospection du massif et recensement des individus

La zone prospectée se trouve sur les versants nord et ouest du mont Cenis à des altitudes comprises entre 1 900 et 2 500 m, dans l'étage subalpin et à la base des pelouses alpines. Les communes concernées par cette prospection sont Lanslebourg-Mont-Cenis et Lanslevillard et, pour partie la commune de Bessans, depuis le lac de Soliet (rive gauche du torrent du Ribon) à l'est (commune de Bessans) jusqu'au col du mont Cenis et la combe de Cléry à l'ouest (nord du Signal du Petit Mont Cenis). La prospection systématique dans l'objectif d'un recensement le plus exhaustif possible a été réalisée de façon méthodique par une équipe de 6 personnes durant une semaine en juin 2005.

## RÉSULTATS

La prospection a révélé un effectif de 23 pins présentant les caractéristiques de *Pinus mugo* subsp. *mughus* : individus prostrés munis, pour les plus développés, de cônes parfaitement symétriques (Tableau II). Des incertitudes de déterminations peuvent exister pour certains d'entre eux dont la petite taille et l'absence de cônes pourraient laisser entrevoir une confusion avec des pins à crochet juvéniles (*Pinus mugo* subsp. *uncinata*). Toutefois, il est remarquable de noter que dans la zone parcourue, aucun pin à crochet n'a été observé, bien que des forêts existent en aval dans la même vallée, en particulier sur les communes de Termignon à Aussois, soit entre 10 et 30 km à vol direct de la zone visitée.

Les pins prostrés découverts se distribuent de 2 180 à 2 400 m d'altitude (Tableau II). La plupart des individus sont localisés dans des pelouses et prairies pâturées, riches en éricacées comme *Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Sprengel, *Vaccinium uliginosum*, *V. myrtillus*, *V. vitis-idaea*, *Rhododendron ferrugineum*, mais aussi *Juniperus sibirica* et *Cotoneaster integerrimus* Medik. À proximité d'un pied bien développé de pin mugho, sur la commune de Lanslevillard, il a été observé *Arctostaphylos alpinus* (L.) Sprengel le raisin d'ours des Alpes, une espèce assez rare pour être mentionnée ici. Quelques pieds de pin mugho sont situés à la limite supérieure des forêts subalpines, vers 2 250-2 300 m d'altitude, composées pour l'essentiel de pins cembro, de mélèzes et quelques fois d'épicéas.

Les individus (ind.) se distribuent dans deux secteurs différents, d'une part du côté de l'alpage des Crozats au sud du Signal du Grand Mont Cenis, commune de Lanslevillard (5 ind.), et d'autre part dans l'alpage de la Femaz à l'ouest de l'Ouillon des Arcellins au col du mont Cenis, commune de Lanslebourg (18 ind.). On n'observe aucune structuration altitudinale dans la répartition des individus, tant en hauteur qu'en circonférence. Les individus couvrant la plus grande surface ne sont ni les plus, ni les moins alticoles (Figure 1).

N°	Altitude (m)	Latitude	Longitude	Contexte de végétation
1	2250	45°17,400'	6°56,983'	Boisement à <i>Larix decidua</i> et <i>Pinus cembra</i>
2	2265	45°17,183'	6°56,995'	Pelouse pâturée
3	2300	45°17,118'	6°57,214'	Pelouse avec forte régénération de <i>Pinus cembra</i>
4	2382	45°17,092'	6°57,416'	Pelouse pâturée
5	2395	45°15,941'	6°57,452'	Pelouse pâturée
6	2280	45°15,870'	6°54,611'	Pelouse pâturée riche en <i>Arctostaphylos uva-ursi</i>
7	2311	45°15,863'	6°54,695'	Pelouse à <i>Dryas octopetala</i>
8	2300	45°15,855'	6°54,630'	Pelouse pâturée
9	2295	45°15,855'	6°54,622'	Pelouse pâturée
10	2295	45°15,823'	6°54,622'	Pelouse écorchée proche d'un télésiège
11	2391	45°15,774'	6°54,797'	Pelouse à <i>Dryas octopetala</i>
12	2367	45°15,643'	6°54,791'	Pelouse riche en <i>Festuca paniculata</i>
13	2373	45°15,480'	6°54,868'	Pelouse à <i>Arctostaphylos uva-ursi</i>
14	2230	45°15,561'	6°54,361'	Pelouse pâturée
15*	2203	45°15,717'	6°54,626'	Pelouse pâturée
20	2261	45°15,816'	6°54,485'	Pelouse à <i>Festuca paniculata</i> , le long d'une piste de ski
21	2250	45°15,788'	6°54,443'	Pelouse à <i>Festuca paniculata</i> , le long d'une piste de ski
22	2239	45°15,795'	6°54,415'	Pelouse pâturée
23	2240	45°15,796'	6°54,402'	Pelouse pâturée
24	2239	45°15,796'	6°54,304'	Pelouse pâturée
25	2202	45°15,739'	6°54,365'	Pelouse à <i>Festuca paniculata</i>
26	2212	45°15,859'	6°54,292'	Pelouse à <i>Juniperus sibirica</i> , plantules de <i>Larix decidua</i> et <i>Picea abies</i>
27	2184	45°15,895'	6°54,264'	Pelouse à <i>Arctostaphylos uva-ursi</i> et <i>Juniperus sibirica</i>

\* En 2005 : Individu sénescant.

Tableau II. Coordonnées géographiques et contexte de végétation des *Pinus mugo* subsp. *mughus* découverts sur le versant nord et ouest du massif du mont Cenis.



Quatre des cinq individus du secteur des Crozats (n° 1 à 4) présentent un feuillage large (circonférence du houppier max. : 31 m, Figure 2), abondant, sans nécrose apparente et portent des cônes (Figure 3). Le dernier (n°5) est petit et au feuillage partiellement nécrosé (Figure 3). Les individus de l'alpage de la Femaz ont un houppier de plus petites dimensions (circonférence <7 m ; hauteur max. 1,5 m). Le feuillage de la plupart des individus est partiellement nécrosé dans sa partie sommitale (Figure 3, ind. 6 à 27).

L'analyse des documents des services forestiers de Restauration des terrains en montagne (RTM) aux archives départementales de l'Office national des forêts (ONF Chambéry) montre qu'aucune plantation d'arbres n'a été réalisée sur les communes de Lanslebourg et de Lanslevillard (Tableau III). De toutes les archives consultées, de Sollières-Sardières à Bessans, aucune ne rapporte de plantation de pin mugho, que ce soit en forêts communales ou dans les séries de plantations RTM domaniales. Les seules plantations recensées ont été réalisées en 1975 en fond de vallée, à Bessans, à proximité de la route départementale (parcelles F et G), puis de 1982 à 1987 en pin cembro et épicéa dans la forêt communale de mélèze en versant nord, dans un objectif de « diversification d'essence ». Des plantations dans des séries RTM sont signalées à Termignon et Sollières-Sardières, mais les essences utilisées ne sont pas mentionnées.

N° d'archive	Intitulé des archives
28	ONF – Forêt communale de Bessans (1992), Révision d'aménagement forestier (1991-2015), Rapport de M. Collas, Direction régionale de Rhône-Alpes, Service départemental de la Savoie, Division de Modane, 52 p. + annexes
123	ONF – Forêt communale de Lanslebourg, Révision d'aménagement forestier (1979-2000), Direction régionale de Rhône-Alpes, Service départemental de la Savoie, Division de Haute-Maurienne
124	ONF – Forêt communale de Lanslevillard, Révision d'aménagement forestier, Direction régionale de Rhône-Alpes, Service départemental de la Savoie, Division de Haute-Maurienne
206	ONF – Forêt domaniale RTM de Sollières-Sardières, Révision d'aménagement forestier (1999-2018), Direction régionale de Rhône-Alpes, Service départemental de la Savoie, Division de Haute-Maurienne, 47 p.
207	ONF – Forêt domaniale RTM de Termignon, Révision d'aménagement forestier, Direction régionale de Rhône-Alpes, Service départemental de la Savoie, Division de Haute-Maurienne

Tableau III. Archives documentaires visitées au service de l'Office national des forêts à Chambéry concernant la Haute Maurienne, pour les communes de Termignon à Bessans. ONF : Office national des forêts ; RTM : Restauration des terrains en montagne.

## DISCUSSION

L'absence de plantation de pin et de toute autre espèce d'arbres sur les communes de Lanslebourg et Lanslevillard suggère que la population de *Pinus mugo* découverte est naturelle et spontanée. Les seules plantations enregistrées ne concernent pas directement la zone visitée comprenant les pins mugho du mont Cenis. Les essences utilisées par les forestiers sont le mélèze, l'épicéa et le pin sylvestre.

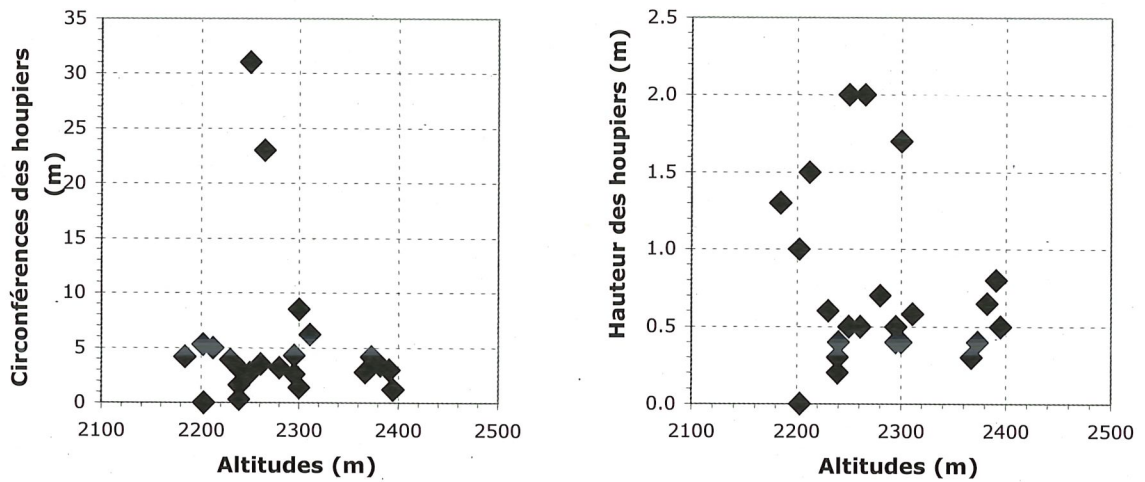


Figure 1. Structure dendrométrique des pins du massif du mont Cenis en fonction de l'altitude.

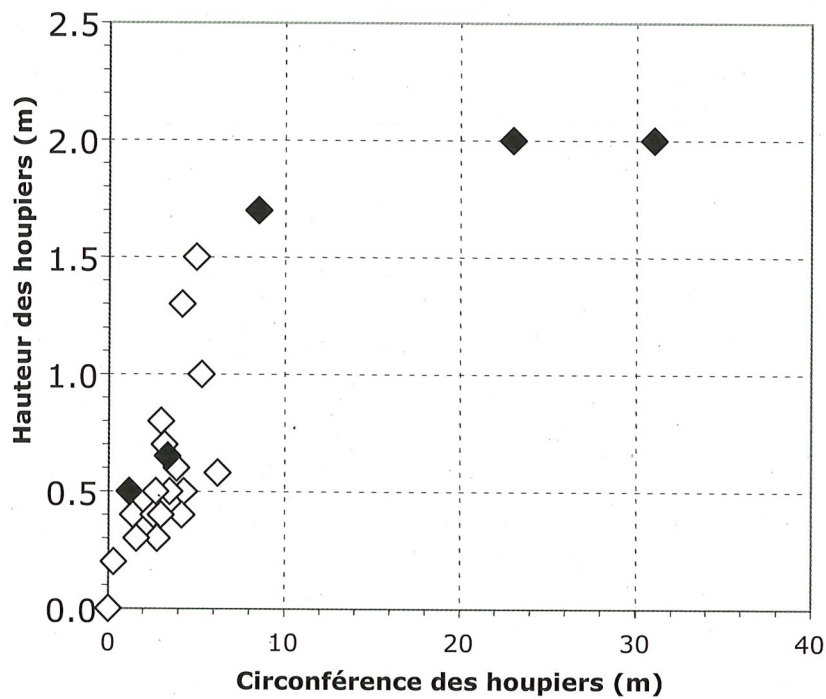


Figure 2. Dendrométrie des pins du massif du mont Cenis. Les losanges vides correspondent aux individus de l'alpage de la Femaz (Lanslebourg) et les pleins à ceux des Crozzats (Lanslevillard).





Figure 3. Photographies et altitudes de quelques spécimens de pin mugho du massif du mont Cenis (juin 2005).



La situation biogéographique du pin mugho au mont Cenis est remarquable. Cette espèce est représentée en Europe centrale par des peuplements vastes et denses en Autriche, Suisse, Italie du nord-est, Slovénie, Tchéquie, Roumanie, Pologne, Slovaquie et Bulgarie. Dans les Alpes occidentales, la population du mont Cenis est la première station découverte dans les Alpes françaises du Nord. Les seules populations connues jusqu'alors en France se situent au sud dans les Alpes duranciennes (massif du Queyras, vallée Étroite), et en Italie dans la vallée de Suse, et beaucoup plus au sud dans les Alpes maritimes dans les vallées de la Tinée, de la Vésubie et de la Roya (Bono *et al.*, 1967 ; Montacchini, 1968 ; Montacchini et Caramiello, 1968 ; Chas, 1994 ; Figure 4). Au nord, les populations les plus occidentales se trouvent en Suisse, dans la vallée d'Entremont à l'extrême sud-ouest du canton du Valais. Si, en termes de distance, les pins du mont Cenis semblent isolés, un corridor biogéographique permet de connecter les peuplements de pin mugho depuis le massif du Queyras jusqu'au mont Cenis *via* les cols du mont Genève, des Thures et de la vallée Étroite jusqu'à la vallée de Suse. Tous ces cols, à moins de 2 200 m d'altitude, semblent parfaitement accessibles à *Pinus mugo mughus* au regard de la distribution altitudinale des populations connues. Ces populations, le long de la frontière franco-italienne, sont le plus souvent isolées, mais semblent réparties selon un axe virtuel qui illustrerait une distribution passée plus importante et mieux connectée voire homogène dans les Alpes occidentales, au moins depuis la vallée de la Maurienne jusqu'aux vallées duranciennes *via* la vallée de Suse (Figure 4 : stations des Alpes internes). Les populations méridionales des Alpes maritimes et septentrionales du Valais semblent totalement déconnectées des populations situées de la Maurienne à la Durance au regard des altitudes des massifs et des cols qui séparent les Alpes duranciennes des Alpes maritimes et ligures. Une connexion est possible à condition de considérer des corridors de basse altitude, ce qui est impossible pour le pin mugho dans un contexte interglaciaire au regard de la compétition avec les arbres des étages collinéens et montagnards. Une connexion par les basses altitudes peut être envisagée durant la dernière glaciation, soit par la plaine du Pô (Italie), soit par les collines de la façade méditerranéenne (France).

Des données paléo-biogéographiques font émerger une extension ancienne plus étendue du type prostré de *Pinus mugo* dans les vallées intra-alpines mentionnées. En effet, une empreinte fossile de cône de pin de type mugho aurait été découverte dans des travertins de la vallée de Suse, datés à la transition Tardiglaciaire-Holocène (Ali *et al.*, 2006). Cependant, ces informations sont à prendre avec précaution au regard de la méthode d'identification fondée sur la physionomie des empreintes. Une exploration plus systématique des archives travertineuses est à mettre en œuvre. Croisées avec une analyse quantitative de la structure morphologique d'empreintes d'écaillés de cônes, nos investigations permettraient de mieux cerner l'étendue passée de cette espèce et d'explorer les déterminismes écologiques à l'origine de sa fragmentation. Parmi les causes de la fragmentation de sa distribution, l'intensification des usages sylvo-pastoraux dans les territoires subalpins paraît probable lorsque l'on constate la vigueur des peuplements de pin mugho dans les régions caractérisées par une déprise pastorale importante (Dullinger *et al.*, 2003). Mais des facteurs biotiques telle la compétition entre espèces, notamment lors de l'expansion holocène de *Pinus cembra* espèce subalpine dominante et abondante originellement (Ali *et al.*, 2005). Les études polliniques sont *a priori* inopérantes pour restituer l'histoire de *Pinus mugo*, dont le pollen se confond avec les autres pins diploxyloons de la région (*Pinus silvestris*, *P. uncinata*, *P. nigra*, *P. halepensis*, *P. pinaster*, *P. pinea*), mais pas avec *Pinus cembra*, un pin haploxyloons. L'analyse des macrorestes, et en particulier des cônes fossiles, semble capable de décrypter l'histoire postglaciaire de *Pinus mugo*, c'est-à-dire *P. m. mughus* par rapport à *P. m. uncinata*.



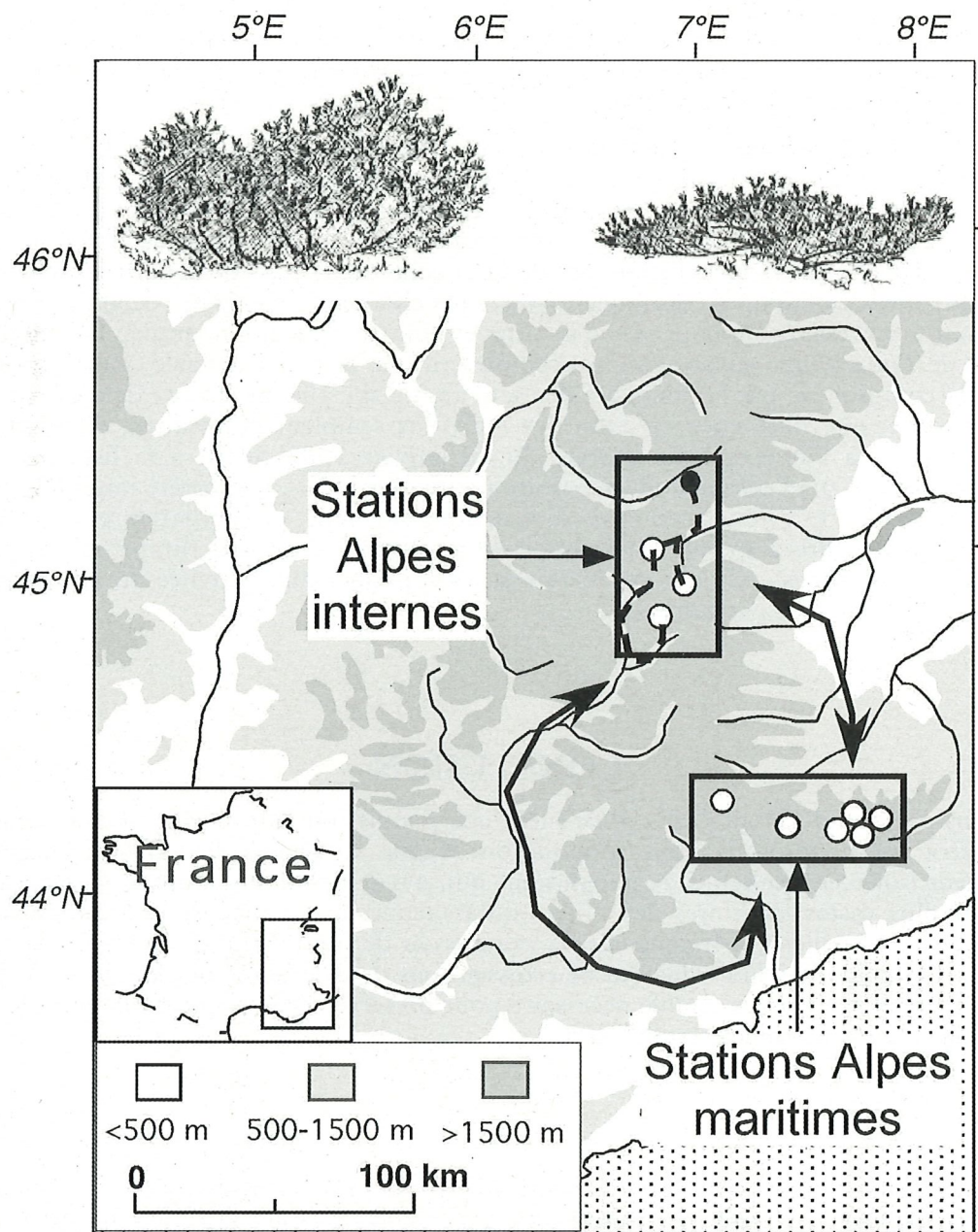


Figure 4. Carte de distribution de *Pinus mugo* subsp. *Mughus* dans les Alpes occidentales.

Le point noir correspond à la population du mont Cenis. Les autres sont les populations connues précédemment. En pointillé, corridor virtuel des populations éteintes de pin mugho dans les Alpes internes. Les flèches noires épaisses identifient les connections glaciaires probables entre les populations des Alpes maritimes et celles des Alpes internes.

La population du mont Cenis n'est pas uniforme, ni même concentrée en un seul site, alors même que ses effectifs sont faibles ( $N = 23$ ). Il est intéressant de remarquer qu'il n'existe pas de distribution altitudinale structurée. Nous aurions pu nous attendre à des individus plus petits et moins développés en plus haute altitude, par exemple. En revanche, selon la localisation des individus, leur physionomie n'est pas la même. De toutes évidences, les individus situés sur Lanslevillard (alpage des Crozats) présentent une bien meilleure conformation que ceux de Lanslebourg (alpage de la Femaz), qui sont presque tous nécrosés (Figure 3) et de plus petite vigueur, tant en hauteur qu'en circonférence de houppier (Figure 1).

Les individus de Lanslebourg se trouvent tous dans un espace récréatif dédié à la pratique du ski alpin. Il n'est pas impossible de penser que cette activité puisse être liée à l'état pathologique observé des pins du mont Cenis, expliquant en partie le caractère nécrosé des aiguilles. Le passage répété des skieurs, voire des appareils de damage du domaine skiable, contribue à densifier et réduire l'épaisseur de la couche de neige, exposant artificiellement les aiguilles aux aléas climatiques, notamment aux vents chargés de particules de glace. En effet, le col du mont Cenis est réputé pour ses vents forts et pour sa rigueur climatique. La situation des individus de *Pinus mugo* subsp. *mughus* semble critique et leur existence pourrait ainsi être rapidement compromise par la poursuite des activités de ski. Une procédure de conservation de la population et une mise en protection des individus semblent nécessaires, d'autant que ce taxon est inscrit à l'annexe 1 de l'arrêté du 20 janvier 1982 relatif à la liste des espèces végétales protégées sur l'ensemble du territoire national français. Cet arrêté implique, pour les espèces de l'annexe 1, « l'interdiction de destruction, de coupe, de mutilation et d'arrachage » excepté « dans le cadre d'opérations d'exploitation courante des fonds ruraux sur les parcelles habituellement cultivées », ce qui ne devrait pas s'appliquer aux activités de ski, puisque les parcelles en cause ne sont pas cultivées.

## CONCLUSION

Les pins prostrés du mont Cenis constituent une population naturelle et spontanée de *Pinus mugo* Turra subsp. *mughus*. Cette population, fragile au regard des effectifs recensés, est actuellement isolée et résulterait de populations qui, avant 9 500 ans avant nos jours, auraient couvert de plus vastes territoires des vallées duranciennes à la vallée de la Maurienne, via la vallée de Suse. Actuellement fragmentée, la population de pin mugho du mont Cenis apparaît altérée, à l'exception des individus qui ne croissent pas dans le domaine skiable du Val Cenis. Une procédure conservatoire semble nécessaire pour préserver cette population, la seule connue à ce jour dans les Alpes françaises du Nord.

**Remerciements.** Cette étude a bénéficié du soutien de l'Institut national des sciences de l'univers au travers du programme CONSECOL (ACI ECCO, responsable : C. Carcaillet). Les auteurs remercient Marion Martinez et Sarah Ivorra pour leur aide lors de la prospection de la montagne, et Fanny Combet pour la recherche des archives forestières. Merci également à Virgile Noble pour l'accès à la base de données botanique du Conservatoire botanique de Porquerolles.



## BIBLIOGRAPHIE

- Ali A.A., Carcaillet Ch., Talon B., Roiron P., et Terral J.-F. (2005). *Pinus cembra* L. (arolla), a common tree in the inner French Alps since the early Holocene and above the present treeline: a synthesis based on charcoal data from soils and travertines. *J. biogeogr.*, 32 :1659-1669.
- Ali A.A., Martinez M., Fauvart N., Roiron P., Fioraso G., Guendon J.L., Terral J.-F. et Carcaillet Ch. (2006). Incendies et peuplements à *Pinus mugo* Turra dans les Alpes occidentales (Val de Suse, Italie) durant la transition Tardiglaciaire-Holocène : une zone refuge évidente. *C. R. Biologies*, 329 : 494-501.
- Bartoli Ch. (1966). Etude écologique sur les associations végétales forestières de la Haute Maurienne. *Ann. sci. for.*, 23 : 432-761.
- Beilhe F., Carcaillet Ch. et Chauchard S. (2009). Elévation de la limite supérieure du sapin pectiné (*Albies alba*) depuis 1950 en Maurienne, Savoie. *Trav. sci. Parc natl. Vanoise*, XXIV : 45-56.
- Bono G., Barbero M. et Poirion L. (1967). Groupements de "*Pinus mugo*" Turra ("*Pinus mughus*" Scop.) dans les Alpes maritimes et ligures. *Allionia*, 13 : 55-80.
- Boratynska K., Marcysiak K. et Boratynski A. (2005). *Pinus mugo* (Pinaceae) in the Abruzzi Mountains : high morphological variation in isolated populations. *Bot. j. Linn. Soc.*, 147: 309-316.
- Chas E. (1994). *Atlas de la flore des Hautes-Alpes*. Gap : Conservatoire botanique national de Gap-Charance ; Conservatoire des espaces naturels de Provence et des Alpes du Sud ; Gap : Parc national des Écrins. 816 p.
- Christensen K.I. (1987). Taxonomic revision of the *Pinus mugo* complex and *P. rhaetica* (*P. mugo* - *sylvestris*) (Pinaceae). *Nord. J. Bot.*, 7: 383-408.
- Dullinger S., Dirnbock T., Grabherr G. (2003). Pattern of shrub invasion into high mountain grasslands of the northern calcareous Alps, Austria. *Arct. antarct. alp. res.*, 35 : 434-441.
- Farjon A. (1998). *World Checklist and Bibliography of Conifers*. Richmond, U.K.: Royal Botanic Gardens at Kew. VI-298 p.
- Fudral S., Deville E, Pognante U., Gay M., Fregolent G., Lorenzoni S., Roberd D., Nicoud G., Blake C., Jayko A., Jaillard E, Bertrand J.M., Forno M.G. et Massazza G. (1994). Carte géologique France (1/50 000), feuille Lanslebourg-Mont d'Amblin (776). Orléans : BRGM.
- Gensac Ph. (1974). Catalogue écologique des plantes vasculaires du Parc national de la Vanoise et des régions limitrophes. *Trav. sci. Parc natl. Vanoise*, 4 : 1-232.
- Hamerník J. et Musil I. (2007). The *Pinus mugo* complex – its structuring and general overview of the used nomenclature. *J. For. Sci.*, 53 : 253-266.
- Lauber K. et Wagner, G. (2001). *Flora Helvetica = Flore illustrée de Suisse*. Deuxième édition. Berne (Suisse) : P. Haupt. 1 615 p.
- Montacchini F. (1968). Il "*Pinus mugo*" Turra ed il "*Pinus uncinata*" Miller in Piemonte – La vegetazione. *Allionia*, 14 : 123-151.
- Montacchini F., Caramiello R. (1968). Il *Pinus mugo* Turra ed il *Pinus uncinata* Miller in Piemonte. Note critiche e distribuzione. *Giornale botanico italiano*, 102: 529-535.
- Monteleone I., Ferrazzini D. and Belletti P. (2006). Effectiveness of neutral RAPD markers to detect genetic divergence between the subspecies *uncinata* and *mugo* of *Pinus mugo* Turra. *Silva Fenn.* 40 : 391-406.
- Ozenda P. (1985). La végétation de la chaîne alpine dans l'espace montagnard européen. Paris : Masson. 330 p.
- Parc national de la Vanoise (1993). *Fleurs de Vanoise* / sous la direction de M. Delmas. Aix-en-Provence : Edisud. 318 p.
- Richardson, D.M. (1998). *Ecology and Biogeography of Pinus*. Cambridge, Grande-Bretagne : Cambridge University Press. XVII-527 p.





## ANALYSE ET RÉFLEXIONS PRÉLIMINAIRES SUR L'ÉVOLUTION CLIMATIQUE EN VANOISE

par Michaël DELORME<sup>1</sup>, Philippe LEBRETON<sup>2</sup>, Louis REYNAUD<sup>2</sup> et Dominique ALLAINÉ<sup>2</sup>

**Résumé.** Le "Groupe Climat" du Parc national de la Vanoise, créé en 2006 à l'initiative de son Conseil scientifique, apporte les premières informations relatives à l'évolution climatique du massif montagneux considéré. Les conclusions actuelles se fondent sur l'analyse statistique de 2 160 moyennes mensuelles de la température, collectées par Météo-France (Savoie) de 1947 (ou 1971) à 2007 dans quatre stations météorologiques de Tarentaise et de Maurienne, étagées de 865 m (étage montagnard inférieur, Bourg-Saint-Maurice) à 2 000 m (étage subalpin supérieur, Lanslebourg Mont-Cenis), en passant par Avrieux (1 100 m) et Pralognan-la-Vanoise (1 430 m). Le massif ainsi représenté montre depuis 20 ans des signes indéniables d'échauffement s'inscrivant dans une logique générale couvrant (au moins) le nord de la région Rhône-Alpes, avec la Dombes comme station planitiaire de référence. Calculée sur la période étudiée puis extrapolée sur un siècle, la valeur moyenne de l'échauffement des quatre stations est égale à 3,5 +/- 1,8°C (1,7 à 5,2°C), en bon accord avec la fourchette de prévision du G.I.E.C. (Groupe intergouvernemental sur l'évolution du Climat, co-Prix Nobel 2007), qui couvre de + 1,8 à + 4,0°C (*in* GURREY, 2007). Une variation de température de 3°C équivaut à un déplacement altitudinal de plus de 500 mètres et à un déplacement latitudinal de plus de 500 kilomètres. L'échauffement constaté connaît diverses déclinaisons dans l'espace (étagement bioclimatique) comme dans le temps (inter-annuel ou saisonnier), résumées comme suit :

- loin d'être constant de la plaine aux alpages, l'échauffement (et la sécurité statistique de ses valeurs) décroît avec l'altitude. Entre les deux périodes 1967-1987 et 1988-2007, l'écart passe de + 1,3°C à Bourg Saint-Maurice (valeur proche de celle de la Dombes) à + 0,6°C au Mont-Cenis. Du coup, le gradient thermique annuel local, jadis égal à 0,48°C / 100 m, est passé à 0,53°C dans l'intervalle de temps considéré ;
- dans les mêmes conditions, cette valeur annuelle n'est en outre qu'une moyenne entre une valeur semestrielle d'été supérieure et une valeur d'hiver inférieure. À Bourg-Saint-Maurice encore, les valeurs respectives sont + 1,8 et + 0,8°C, contre + 1,1 et + 0,3°C au Mont-Cenis. En d'autres termes, le réchauffement climatique porte davantage sur la saison chaude que sur la saison froide, comme il s'exprime davantage aux basses cotes qu'aux cotes élevées.

L'évolution saisonnière observée à Bourg-Saint-Maurice est tout à fait similaire à celle observée en Dombes (Ain) ; elle s'atténue au fur et à mesure que l'on progresse en altitude. Si l'échauffement du semestre estival reste bien palpable (mars, mai, août), celui du semestre hivernal diminue (novembre, décembre) et tend même à s'annuler dans l'étage subalpin. À Pralognan, situé pourtant quelque 550 mètres plus bas que le Mont-Cenis, l'hiver semble même un peu plus froid que jadis. Été et hiver sont donc en Vanoise deux saisons répondant très différemment au phénomène global d'échauffement climatique. Des approches locales se révèlent donc nécessaires pour toute prospective réaliste, cette conclusion prenant évidemment une valeur contrastée selon les enjeux touristiques considérés : les stations de sports de neige de faibles cotes ont ainsi devant elles des perspectives plus défavorables que celles implantées à de plus hauts niveaux. Par ailleurs, à titre prospectif, parmi les nombreux effets prévisibles ou possibles de l'échauffement climatique, des exemples commentés d'ordre local sont fournis sur la régression des glaciers, l'évolution spatio-temporelle des étages de végétation et le cycle saisonnier de la reproduction de la Marmotte alpine.

**Mots-clés :** Massif de la Vanoise (France) - Alpes internes nord-occidentales - Échauffement pluriannuel et saisonnier - Gradient thermique altitudinal - Impacts prévisibles.

**Analysis and preliminary thoughts on the climate change in Vanoise (French Alps)**

**Key-words :** Vanoise Mountains (France) - Climate warming.

<sup>1</sup> Pôle Patrimoine du Parc national de la Vanoise.

<sup>2</sup> Conseil scientifique du Parc national de la Vanoise, 135 rue du docteur Julliand, B.P. 705, F-73007 Chambéry cedex.



## 1. INTRODUCTION

La connaissance du climat régional n'est pas une préoccupation récente du Parc national de la Vanoise, de ses personnels et de ses chercheurs, comme en témoignent diverses études parues dans la revue des Travaux scientifiques publiés par l'établissement depuis 1970 [bibliographie complète *in fine*, de Péguy (1973) à Lebreton *et al.* (2000), en passant par Gensac (1978) ou Reynaud *et al.* (1983)] ; mais la question n'est vraiment montée en puissance que sous la forme du "réchauffement climatique", dans la décennie 1990. Chaque entité biogéographique se particularisant à propos des interactions climat / milieu ambiant, climat / biodiversité, climat / activités humaines, un parc national ne pouvait rester étranger à des préoccupations que partagent désormais les usagers et les acteurs de tout espace, protégé ou non. On doit en effet connaître, pour mieux l'affronter, une évolution dont la réalité ne fait aujourd'hui plus de doute et doit être prise en compte à tous les niveaux de responsabilité, des individus aux gouvernements, en passant par les corps constitués.

Le principe de la mise en place d'un "Groupe Climat" au sein du Parc national de la Vanoise a été adopté lors de la séance du 9 octobre 2006 de son Conseil scientifique, puis validé par le Conseil d'administration sur proposition de la Direction du parc. La liste des membres de ce groupe figure p. 104. Un premier dépouillement des données provenant de Météo-France a été effectué en 2007 ; le projet a été discuté et approfondi lors de la réunion du 14 novembre 2007 du Conseil scientifique du Parc. Un aperçu préliminaire et public des résultats est paru pendant l'été 2008 dans le numéro 9 de *Vanoise*, "Journal d'information de l'espace Parc". Tout en soulignant que de telles études doivent s'inscrire dans une perspective pluridécennale, il apparaît possible et utile d'en présenter ici quelques résultats qui, s'ils confirment d'ores et déjà la réalité locale du phénomène global, laissent apparaître quelques nuances susceptibles d'éclairer les pratiques et la gestion de l'espace concerné, considéré comme écosystème naturel et humain.

Plus que le terme banalisé de "réchauffement climatique", on emploiera ici de préférence, soit celui parfaitement neutre "d'évolution climatique", soit celui désormais justifié par divers phénomènes observés à toutes les échelles mondiales, de "dérèglement climatique", qui englobe également l'évolution des précipitations en interaction avec les facteurs thermiques, et les phénomènes météoriques afférents (tempêtes, ouragans, inondations, etc.). Bien que les scientifiques les plus compétents en la matière, réunis au sein du G.I.E.C. (Groupe intergouvernemental sur l'évolution du Climat, co-Prix Nobel 2007), aient prudemment affirmé ("probabilité supérieure à 90 %") en janvier 2007 à Paris que la responsabilité de l'Homme était engagée, via l'augmentation anthropique des gaz "à effet de serre" (Gurrey, 2007), on n'abordera pas ici cet aspect causal des phénomènes observés. En outre, on n'envisagera ici que brièvement le paramètre précipitations (pluies et / ou neige), à caractère trop aléatoire pour être traité statistiquement, du moins en l'état actuel des données : d'une année sur l'autre, un mois d'août peut être plus sec que février, l'inverse douze mois plus tard ; en revanche, on n'a jamais vu, même pour les hivers les plus doux et les étés les plus froids, relativement parlant, un mois d'août plus froid qu'un mois de février ! C'est d'ailleurs dans ces aspects statistiques que réside la difficulté majeure des études climatiques, qui se proposent de dégager des tendances significatives à partir de variations météorologiques apparemment très dispersées d'une année sur l'autre. En tout état de cause, l'évolution des précipitations pluviales ou nivales en Vanoise paraît de second ordre par rapport à celle des températures, bien que toutes deux contribuent à l'établissement des bilans hydriques, via les paramètres pluvio-thermiques.



## 2. MÉTHODOLOGIE

### 2.1. Origine et traitement des données

Les données thermiques ici traitées proviennent de relevés standardisés fournis par Météo-France (Savoie) ; il s'agit de moyennes mensuelles, calculées à partir des moyennes journalières, demi-sommes des valeurs maximales (diurnes) et minimales (nocturnes), fournies au dixième de degré centigrade (°C). Une décimale supplémentaire a été conservée après calculs, afin d'éviter toute éventuelle perte d'information liée au hasard de l'arrondissement des chiffres à la plus proche valeur ; présente en archives, cette décimale supplémentaire ne figure pas pour autant dans tous les tableaux ou figures présentés. Les quelques données mensuelles manquantes (12 sur 2 160) ont été estimées par double interpolation, "verticale" (entre années encadrant la donnée manquante du même mois) et "horizontale" (entre mois encadrant la donnée manquante de la même année). La période considérée ne couvre que la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle et le début du XXI<sup>e</sup>, mais elle échappe aux critiques d'hétérogénéité voire de manque de rigueur encourues par des données antérieures, obtenues par des organismes distincts (Office national météorologique : O.N.M. ; Électricité de France : EDF ; Universités, etc.), même si elles ont été utilisées dans divers travaux (cités par exemple *in* Lebreton *et al.*, 2000).

Ces données mensuelles sont classiquement regroupées en moyennes annuelles, afin d'en suivre l'évolution à l'échelle décennale. L'année dite légale est certes commode d'emploi mais, si elle englobe toute la "belle saison", de mars à août (qui connaît l'essentiel des phénomènes biologiques, animaux et végétaux), elle présente l'inconvénient de couper en deux la "mauvaise saison", de septembre à février (qui intéresse surtout le "tourisme blanc"). On distinguera donc deux semestres désignés comme "Été" et "Hiver", dont la somme constitue une "Année écologique", couvrant du mois de mars de l'année légale de rang N au mois de février de l'année N + 1. Ceci dit, les différences observées entre années "légales" et "écologiques" restent de second ordre, comme on le verra plus loin, mais avec plus de précision (écarts-types moindres) dans le second cas.

Les calculs de moyennes et d'écarts-types et les tests t de Student ont été effectués à l'aide du logiciel Statitcf ; les régressions linéaires ou paraboliques ont été calculées et tracées à l'aide du logiciel Excel. On estime qu'un échantillon de 25 à 30 données constitue un minimum satisfaisant. Les conventions usuelles de sécurité statistique ont été utilisées, avec les seuils suivants : risque p inférieur à 0,001 = 1 p. mille, hautement significatif \*\*\* ; compris entre 0,001 et 0,01 = 1 %, fortement significatif \*\* ; entre 0,01 et 0,05 = 5 %, significatif \* ; entre 5 et 10 %, peu significatif (\*) ; supérieur à 0,10 = 10 %, non significatif NS. De la sorte, les écarts ponctuels aux tendances générales (par exemple un mois d'août particulièrement maussade en 2007), résultant des aléas propres à tout phénomène naturel, ne peuvent être opposés à des résultats statistiquement assurés dans l'espace et le temps considérés.

### 2.2. Stations météorologiques considérées

Nos choix ont été guidés par trois considérations pratiques, conciliant disponibilité et représentativité : géographique (2 stations en Maurienne, 2 en Tarentaise), altitudinale (de 865 à 2 000 m), chronologique (au maximum 61 années de relevés, au minimum 37). Il s'agit des stations de Bourg-Saint-Maurice, Avrieux, Pralognan-la-Vanoise et Lanslebourg Mont-Cenis, étagées du sous-étage collinéen supérieur au subalpin supérieur (tableau I). Aucune station météorologique "alpine" (au sens de l'étagement) n'étant actuellement disponible, on peut regretter que les 5 postes installés à l'automne 1973 par le professeur Pierre Gensac (alors membre du Comité scientifique du Parc national) n'aient fonctionné que jusqu'en 1976 (Gensac, 1978), interrompant ainsi une série de relevés qui serait aujourd'hui très précieuse. Ces stations s'étagaient en effet de 1 935 mètres (l'Orgère, Villarodin-Bourget) à 2 480 mètres (Grande-Sassière, Tignes), en passant par 2 020 mètres (le Bochor, Pralognan), 2 250 mètres (Planc-Sec, Aussois) et 2 340 mètres (Grand-Vallon, Val d'Isère). Afin de disposer d'une station de référence planitiaire, nous avons emprunté à la Fondation Pierre Vérots les données Météo-France (Ain) de la station de Marlieux en Dombes (altitude 280 m),

située peu au nord-est de Lyon (Richoux et Lebreton, 2008), portant ainsi le nombre de données mensuelles utilisées à 2 688.

Commune et station	Altitude en mètres	température moyenne annuelle	étage et sous-étages bioclimatiques	Latitude ° Nord	Longitude ° Est	Période de relevés
Bourg Saint-Maurice Croix Saint-Maurice	865 m	9,5 °C	collinéen supérieur	45° 36' 8	06° 45' 8	1947-2007
Avrieux Usine ONERA	1 102 m	7,9 °C	montagnard moyen	45° 13' 0	06° 42' 9	1967-2007
Pralognan la Vanoise Grand Couloir	1 420 m	5,5 °C	montagnard supérieur	45° 23' 0	06° 44' 2	1967-2007
Lanslebourg Mont-Cenis Barrage du Mont-Cenis	2 000 m	2,7 °C	subalpin supérieur	45° 13' 1	06° 56' 6	1971-2007
Marlieux en Dombes Le Clou	280 m	11,0°C	planitiaire	46° 02' 2	05° 02' 4	1964-2007

Tableau I. Caractéristiques géographiques des 5 stations Météo-France de Vanoise et de Dombes.

### 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### 3.1. Évolution décennale

3.1.1. Dans un premier temps, une recherche de régression linéaire conduite sur les valeurs annuelles "écologiques" pour les 4 stations de Vanoise permet de conclure à une augmentation généralement significative de la température, comme pour la station planitiaire de Dombes, dans la seconde moitié du siècle dernier (tableau II).

station	période couverte	Valeurs annuelles moyennes			
		équation de régression	pente décennale	coefficient de régression	risque statistique
Dombes 280 m	1964-2007	$y = 0,0641 N + 9,52$	+ 0,64°C	$r = 0,802$	$p < 0,001$ ***
Bourg Saint-Maurice 865 m	1947-2007	$y = 0,0510 N + 8,33$	+ 0,51°C	$r = 0,785$	$p < 0,001$ ***
Avrieux 1 102 m	1967-2007	$y = 0,0329 N + 7,18$	+ 0,33°C	$r = 0,651$	$p < 0,001$ ***
Pralognan 1 420 m	1967-2007	$y = 0,0168 N + 5,19$	+ 0,17°C	$r = 0,277$	$p = 0,07$ (*)
Mont-Cenis 2 000 m	1971-2007	$y = 0,0290 N + 2,22$	+ 0,29°C	$r = 0,333$	$p = 0,04$ *

Tableau II. Évolution thermique décennale en Vanoise (et en Dombes) moyennes annuelles (régression linéaire). Données Météo-France.



La figure 1 fournit les courbes représentatives pour la période 1971-2007 commune aux cinq stations, à partir desquelles sont calculées les moyennes alpestres utilisées ci-dessous. Les régressions paraboliques ou exponentielles ne donnent pas de résultats bien différents à cette échelle. Plus précisément, l'échauffement annuel diminue de la plaine (Marlieux, 280 m) aux cimes (Mont-Cenis, 2 000 m) ; il en est de même de la sécurité statistique qui l'accompagne : en dessous de 1 200 mètres, si le phénomène confine à la certitude, il devient moins assuré et moins logique au-delà, puisque l'échauffement relevé au Mont-Cenis est proche de celui d'Avrieux, autour d'une valeur décennale égale à  $0,35 \pm 0,18^{\circ}\text{C}$  (moyenne des quatre stations alpestres). L'analyse saisonnière (semestres Été / Hiver) nuance ce constat annuel (tableau III page 75). La figure 2 compare les quatre stations de Vanoise et celle de Dombes pour la saison (semestrielle) dite d'été.

En ne considérant que la belle saison (de mars à août), le tableau se confirme en se simplifiant : la réalité du réchauffement s'affirme à toutes cotes, tout en diminuant du double au simple de la plaine aux cimes (de  $+ 0,8$  à  $+ 0,4^{\circ}\text{C}$ ) ; la moyenne décennale alpestre vaut  $0,55 \pm 0,17^{\circ}\text{C}$ . On devine qu'il va en être autrement des valeurs hivernales, puisqu'elles contribuent pour moitié aux moyennes de l'année (tableau IV page 76) ; la figure 3 illustre cette évolution des cinq stations de Vanoise et de Dombes pour la saison d'hiver, de septembre à février inclus.

En effet, non seulement l'échauffement hivernal est toujours inférieur à celui de l'été (à Bourg-Saint-Maurice,  $0,38^{\circ}\text{C}$  contre  $0,65^{\circ}\text{C}$  pour l'année), mais il prend même une valeur négative à Pralognan la Vanoise, qui reste néanmoins faible ( $- 0,1^{\circ}\text{C}$ ) ; la moyenne décennale alpestre vaut ici  $0,14 \pm 0,22^{\circ}\text{C}$ . Toutefois, d'Avrieux au Mont-Cenis, les variations observées sont dépourvues de sécurité statistique, et seule la logique générale permet de leur attribuer crédit. La situation particulière de Pralognan, où les hivers semblent ignorer le réchauffement climatique, pourrait-elle être due à la proximité du dôme des glaciers de la Vanoise ? Pour fondre, une masse glaciaire absorbe en effet de l'énergie, générant ainsi des masses d'air froid pouvant couler vers les vallées en y créant un micro-climat saisonnier (vents froids à caractère catabatique). En outre, les températures, notamment hivernales, sont plus irrégulières aux cotes élevées, avant (voir Mont-Cenis) comme après 1988 (voir Pralognan).

Toujours est-il qu'été et hiver sont, en Vanoise, deux semestres réagissant très différemment au phénomène global d'échauffement climatique ; cette conclusion prend évidemment une valeur contrastée selon les enjeux touristiques considérés. Le tableau V résume les pronostics d'évolution (pentes séculaires), sous l'évidente réserve de la poursuite du phénomène d'échauffement et de sa cause principale désormais hautement probable (augmentation des gaz à effets de serre).

Pentes thermiques exprimées en $^{\circ}\text{C} / \text{siècle}$ (à partir de 1971) (risque statistique NS à ***)			
	années	étés	hivers
Dombes (280 m)	+ 7,4 $^{\circ}\text{C}$ ***	9,2 ***	5,7 ***
Bourg St-Maurice (865 m)	5,9 ***	7,8 ***	3,9 ***
Avrieux (1 102 m)	3,5 ***	5,7 ***	1,3 NS
Pralognan (1 420 m)	1,7 (*)	4,7 ***	- 1,4 NS
Mont-Cenis (2 000 m)	2,9 *	3,9 **	1,9 NS
-----			
Vanoise (4 stations)			
Moyenne (écart-type)	+ 3,5 (1,8) $^{\circ}\text{C}$	+ 5,5 (1,7) $^{\circ}\text{C}$	+ 1,4 (2,2) $^{\circ}\text{C}$
Fourchette probable	+ 1,7 / + 5,2 $^{\circ}\text{C}$	+ 3,8 / + 7,2 $^{\circ}\text{C}$	- 0,7 / + 3,6 $^{\circ}\text{C}$

Tableau V. Pentes thermiques séculaires en Vanoise (et en Dombes).

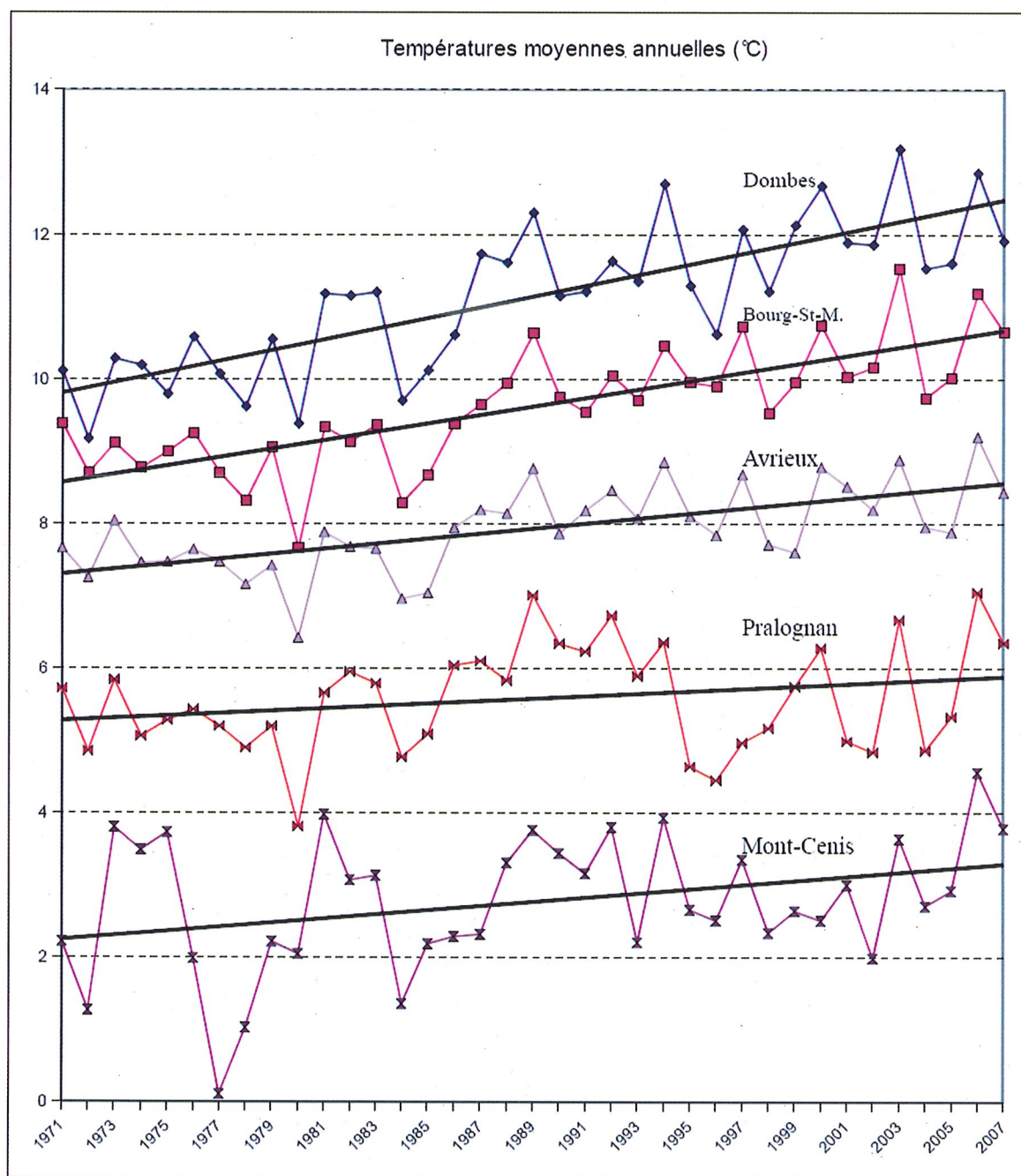


Figure 1. Évolution décennale des températures annuelles moyennes, de la Dombes (courbe du haut) au Mont-Cenis (courbe du bas). Données Météo-France.



Valeurs estivales moyennes					
station	période couverte	équation de régression	pente décennale	coefficient de régression	risque statistique
Marlieux 280 m	1964-2007	$y = 0,0775 N + 12,93$	+ 0,78°C	$r = 0,814$	$p < 0,001$ ***
Bourg Saint-Maurice 865 m	1947-2007	$y = 0,0646 N + 11,91$	+ 0,65°C	$r = 0,746$	$p < 0,001$ ***
Avrieux 1 102 m	1967-2007	$y = 0,0509 N + 10,66$	+ 0,51°C	$r = 0,705$	$p < 0,001$ ***
Pralognan 1 420 m	1967-2007	$y = 0,0421 N + 8,06$	+ 0,42°C	$r = 0,521$	$p < 0,001$ ***
Mont-Cenis 2 000 m	1971-2007	$y = 0,0392 N + 4,91$	+ 0,39°C	$r = 0,402$	$p = 0,002$ **

Tableau III. Évolution thermique décennale en Vanoise (et en Dombes) moyennes estivales (régression linéaire). Données Météo-France.

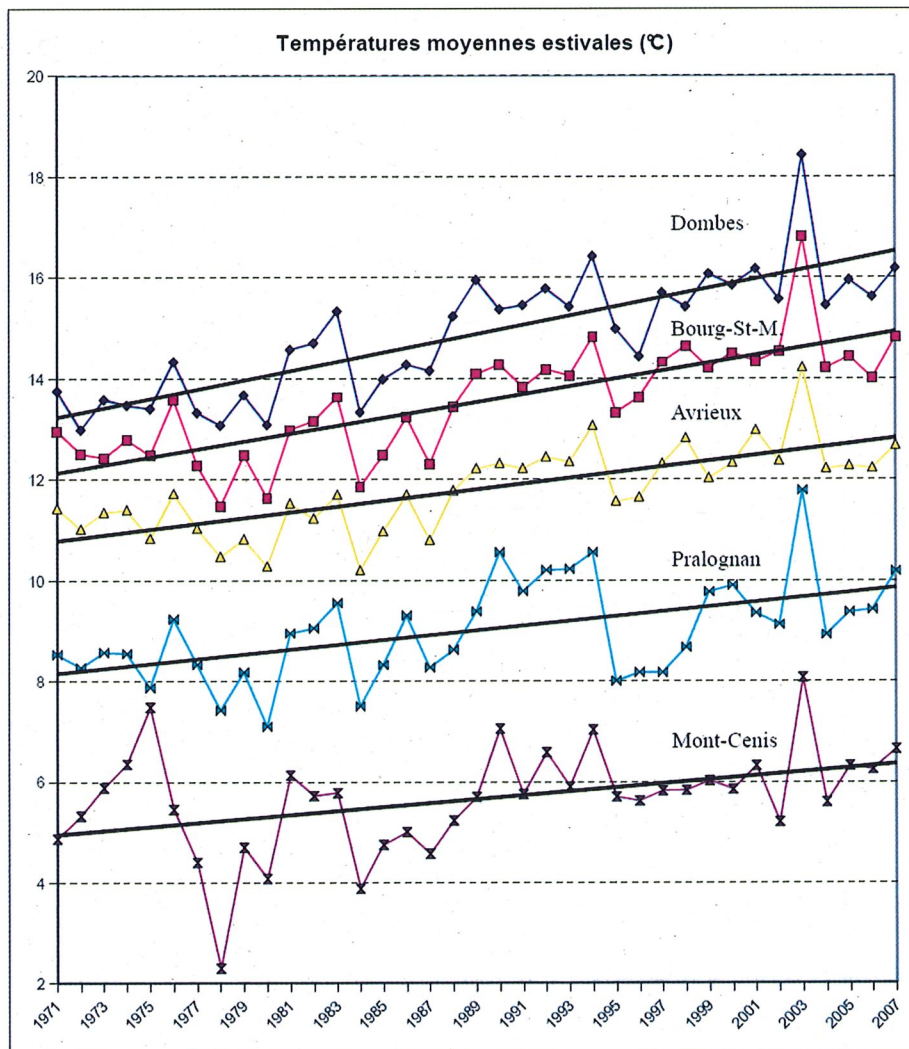


Figure 2. Évolution décennale des températures estivales moyennes, de la Dombes (courbe du haut) au Mont-Cenis (courbe du bas). Données Météo-France.

Valeurs hivernales moyennes					
station	période couverte	équation de régression	pente décennale	coefficient de régression	risque statistique
Marlieux 280 m	1964-2007	$y = 0,0507 N + 6,11$	+ 0,51°C	$r = 0,625$	$p < 0,001$ ***
Bourg Saint-Maurice 865 m	1947-2007	$y = 0,0375 N + 4,75$	+ 0,38°C	$r = 0,549$	$p < 0,001$ ***
Avrieux 1 102 m	1967-2007	$y = 0,0146 N + 3,71$	+ 0,15°C	$r = 0,236$	$p > 0,10$ NS
Pralognan 1 420 m	1967-2007	$y = - 0,0086 N + 2,32$	- 0,09°C	$r = 0,107$	$p > 0,10$ NS
Mont-Cenis 2 000 m	1971-2007	$y = 0,0185 N - 0,47$	+ 0,19°C	$r = 0,155$	$p > 0,10$ NS

Tableau IV. Évolution thermique décennale en Vanoise (et en Dombes) moyennes hivernales (régression linéaire). Données Météo-France.

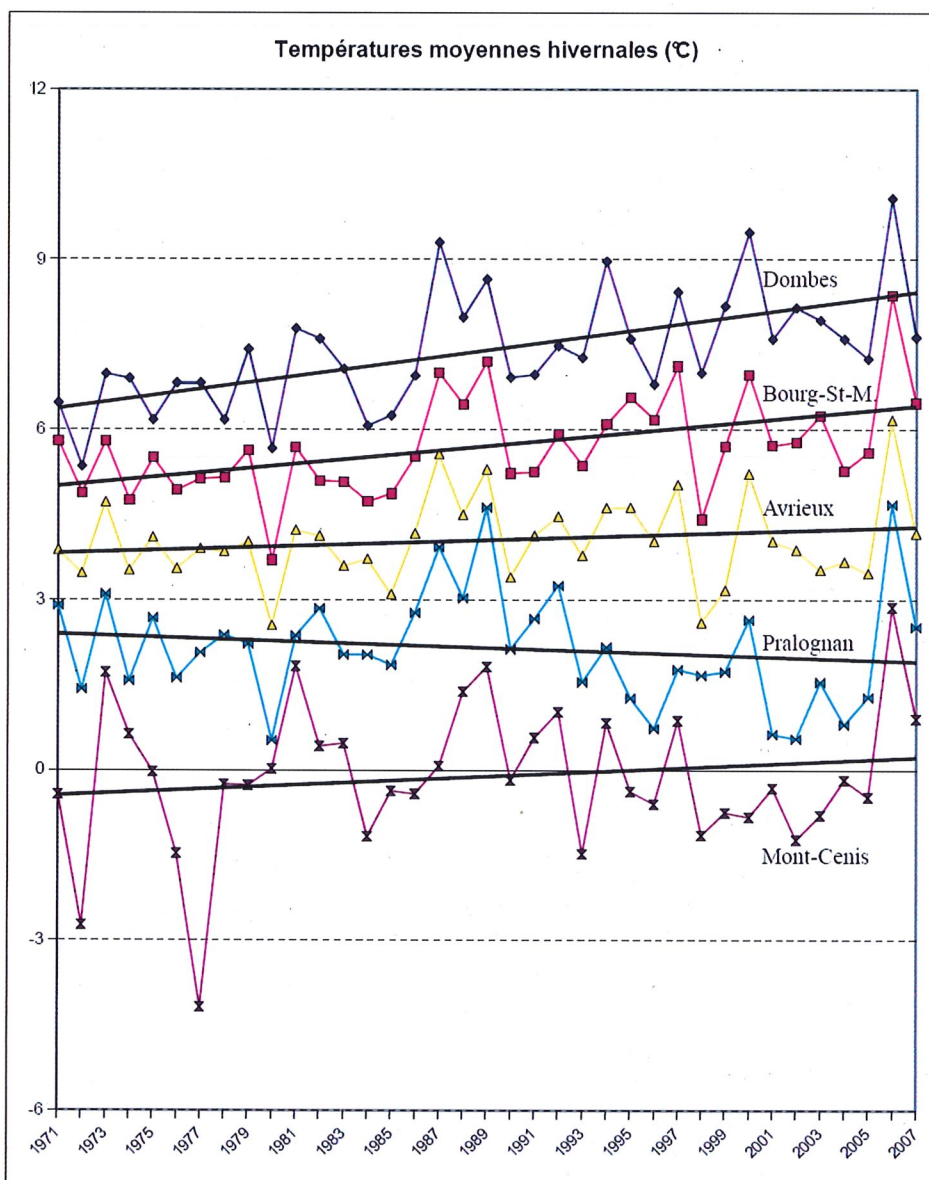


Figure 3. Évolution décennale des températures hivernales moyennes, de la Dombes (courbe du haut) au Mont-Cenis (courbe du bas). Données Météo-France.



3.1.2. Dans un second temps, un examen plus attentif de courbes évolutives comme celles de Bourg Saint-Maurice (plus particulièrement annuelles et estivales ; cf. figures 1 et 2) montre que les décennies considérées se partagent en deux périodes, avec un tournant peu après le milieu de la décennie 1980. D'une manière générale, on peut parler de "plateau" pour les relevés antérieurs à 1987 (+/- 1 an), de "progression" au-delà (sauf en hiver à Pralognan, encore que la sécurité statistique de ce cas particulier ne soit pas hautement assurée) ; ce tournant coïncide avec trois hivers consécutifs relativement chauds. La comparaison des deux périodes successives 1967-1987 et 1988-2007 précise le phénomène (tableau VI p. 99), confirmant également le peu de différence statistique existant entre les valeurs annuelles "légalés" et "écologiques" ; on notera néanmoins que les écarts-type obtenus sont toujours plus faibles pour ces dernières (par exemple 0,16 vs 0,38 et 0,16 vs 0,40 à Avrieux), confirmant leur meilleure homogénéité.

Complémentairement, la répartition des années en périodes successives de 6 ans (4 à 7 dans certaines stations) laisse très nettement apparaître cette césure (tableau VII p. 100), notamment à Bourg Saint-Maurice, où les moyennes estivales sont inférieures à 13°C avant 1988, et supérieures à 14°C au-delà ; bien que moins net, le phénomène est également visible aux plus hautes cotes (Pralognan et Mont-Cenis), où les moyennes sur 6 ans sont supérieures, au plus égales, après 1988 à ce qu'elles étaient auparavant. Une chronologie similaire a été observée à partir des bilans annuels de masses glaciaires favorables et défavorables (Vallon *et al.*, 1995).

### 3.2. Évolution saisonnière

La réalité de l'échauffement annuel ayant été établie à l'échelle inter-annuelle, on doit s'interroger sur sa répartition intra-annuelle (= saisonnière), notamment au niveau mensuel : l'échauffement porte-t-il également sur tous les mois de l'année, ou seulement sur certains, et lesquels ? Pour cela, les moyennes mensuelles (et leurs écarts-types) ont été calculées mois par mois pour les deux périodes consécutives qui viennent d'être mises en évidence (tableau VIII p.101-102).

Un premier constat s'impose, d'une nette différence de réactivité entre saisons chaudes et froides (ce que laissent déjà entrevoir les données du tableau VI) : partout, de la plaine aux cimes, l'échauffement estival est supérieur à celui de la mauvaise saison, d'autant qu'au-delà de 1 200 mètres les différences hivernales deviennent moins palpables, en tout cas non significatives (figures 4a-d). Plus finement et curieusement, trois mois non consécutifs se révèlent plus "échauffés" que les autres dans les cinq stations étudiées : mars, mai et août, la moyenne thermique de ce dernier égalant désormais celle de juillet dans tous les cas. Autre particularité : partout, la variabilité de l'échauffement, estimée par son écart-type (cf. tableau VII), est supérieure en mauvaise saison (0,65 +/- 0,13°C) à ce qu'elle est en belle saison (0,46 +/- 0,07°C) (différence 0,20°C ;  $t = 3,07$  ;  $p = 0,008$  \*\*). En d'autres termes, non seulement le réchauffement climatique porte davantage sur la plaine que sur la montagne, plus sur l'été que sur l'hiver, mais de manière plus aléatoire - donc moins prévisible - dans le second cas. Les tableaux IXa et IXb résument ces résultats en délimitant deux zones "chronospatiales" : une zone d'échauffement estival fort et assuré, surtout aux basses cotes ; inversement, aux plus hauts niveaux étudiés, une zone hivernale où les variations thermiques sont négatives à faibles ; bien qu'incertaines individuellement parlant, leur cohérence générale plaide néanmoins en faveur d'une subtile réalité.

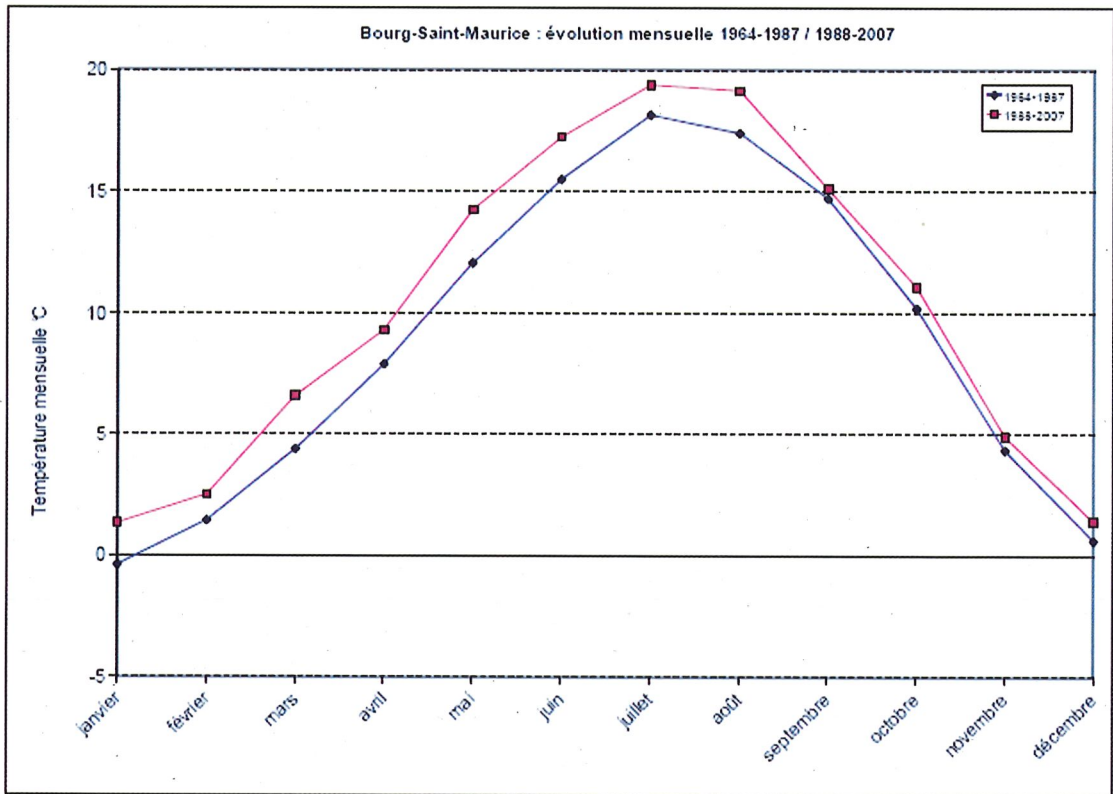


Figure 4a. Évolution mensuelle des températures en Vanoise entre les deux périodes 1964-1987 et 1988-2007 : Bourg Saint-Maurice

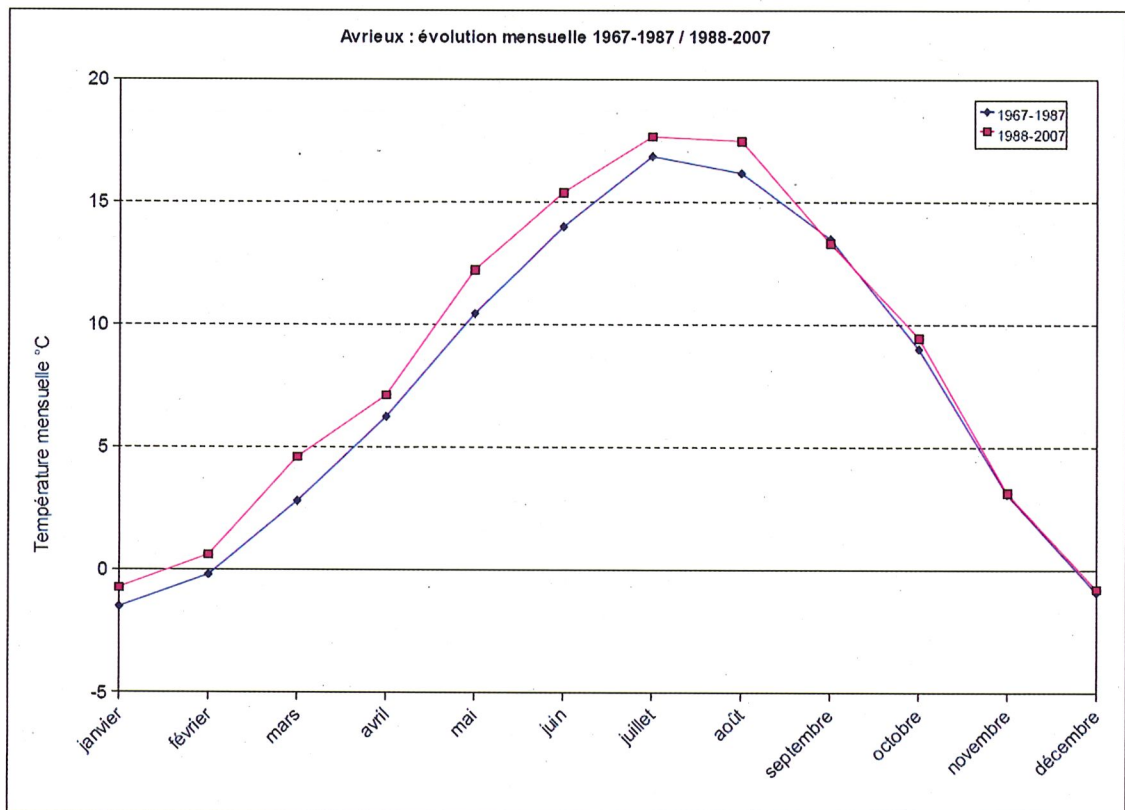


Figure 4b. Évolution mensuelle des températures en Vanoise entre les deux périodes 1967-1987 et 1988-2007 : Avrieux



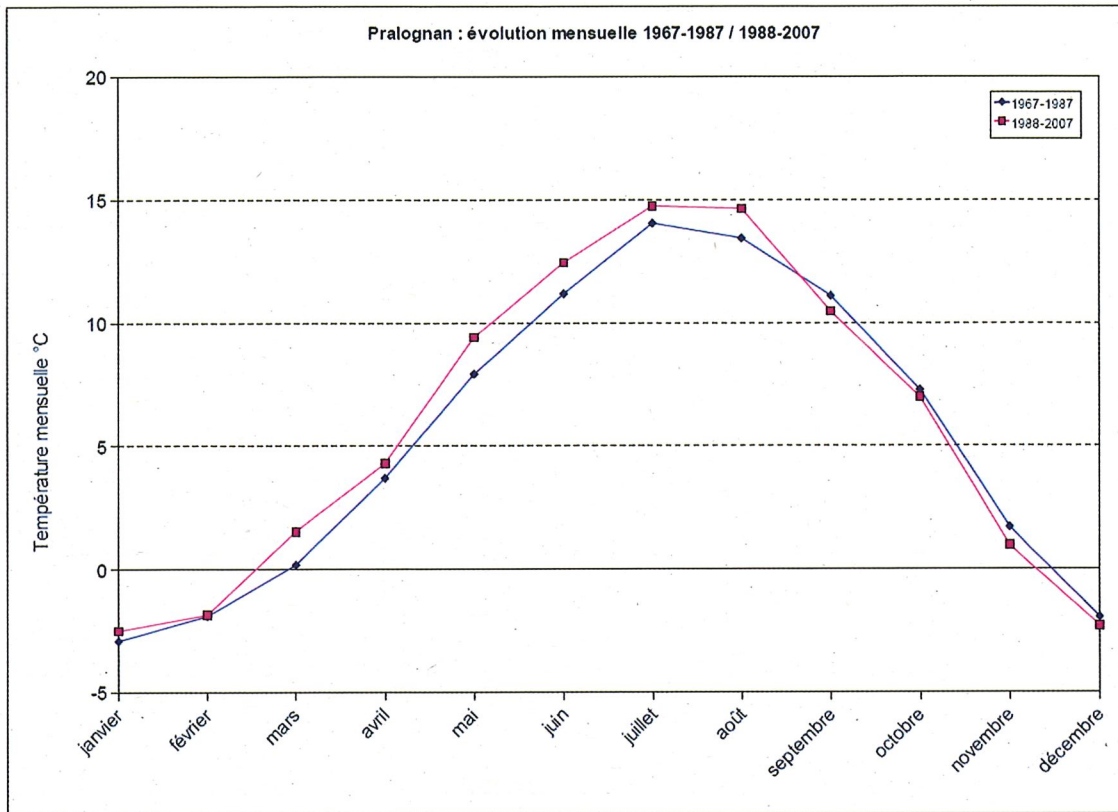


Figure 4c. Évolution mensuelle des températures en Vanoise entre les deux périodes 1967-1987 et 1988-2007 : Pralognan

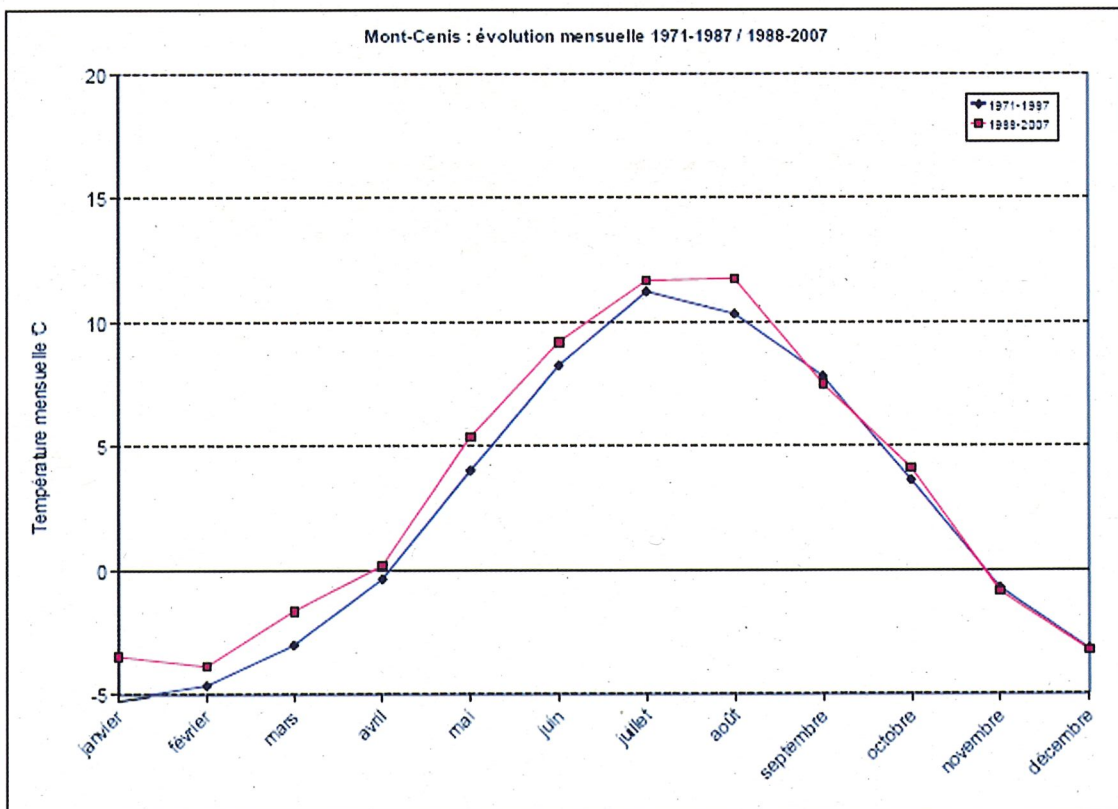


Figure 4d. Évolution mensuelle des températures en Vanoise entre les deux périodes 1971-1987 et 1988-2007 : Mont-Cenis

PARC NATIONAL DE LA VANOISE

Année	Dombes	Bourg-St-Maurice	Avrieux	Pralognan	Mont-Cenis
	280 m 1,6°C	865 m 1,3°C	1 102 m 0,8°C	1 420 m 0,4°C	2 000 m 0,6°C
Janvier	1,8	1,7	0,8	0,4	1,7
Février	1,2	1,1	0,8	0,1	0,8
Mars	2,2	2,2	1,8	1,3	1,4
Avril	1,6	1,4	0,9	0,6	0,5
Mai	2,4	2,2	1,8	1,5	1,4
Juin	2,0	1,7	1,4	1,3	0,9
Juillet	1,6	1,2	0,8	0,7	0,3
Août	2,4	1,8	1,3	1,2	1,4
Septembre	1,0	0,4	-0,2	-0,6	-0,3
Octobre	1,6	0,9	0,5	-0,3	0,5
Novembre	0,8	0,6	0,1	-0,7	-0,1
Décembre	1,0	0,8	0,1	-0,4	-0,1

Tableau IXa. Répartition mensuelle et altitudinale de l'échauffement en Vanoise (et en Dombes) entre les deux périodes 1971-1987 et 1988-2007 : écarts thermiques.

Année	Dombes	Bourg-St-Maurice	Avrieux	Pralognan	Mont-Cenis
	280 m 1,6°C ***	865 m 1,3°C ***	1 102 m 0,8°C ***	1 420 m 0,4°C *	2 000 m 0,6°C *
Janvier	**	**	(*)	NS	*
Février	*	(*)	NS	NS	NS
Mars	***	***	**	*	*
Avril	***	**	*	NS	NS
Mai	***	***	***	**	*
Juin	***	***	***	**	*
Juillet	***	**	*	*	NS
Août	***	***	**	**	*
Septembre	*	NS	NS	NS	NS
Octobre	**	(*)	NS	NS	NS
Novembre	(*)	NS	NS	(*)	NS
Décembre	*	NS	NS	NS	NS

Tableau IXb. Répartition mensuelle et altitudinale de l'échauffement en Vanoise (et en Dombes) entre les deux périodes 1971-1987 et 1988-2007 : sécurité statistique.

Un autre enseignement peut être tiré de ces données, concernant l'amplitude thermique annuelle (différence entre les maximums estivaux et les minimums hivernaux, dont on sait qu'elle permet de distinguer les climats dits océaniques (à faible amplitude) des climats dits continentaux (à plus forte amplitude) ; pour améliorer la sécurité statistique, nous avons apprécié cette amplitude par la différence observée entre les températures moyennes des deux semestres chaud (de mars à août) et froid (de septembre à février) pour les 5 stations (cf. tableau VI, p. 100). Pour la période antérieure à



1988, cette différence (plus faible au-delà de 1 200 m) vaut en moyenne  $6,6 \pm 0,8^\circ\text{C}$ , contre  $7,6 \pm 0,9^\circ\text{C}$  après cette date ; l'écart entre les deux périodes est égal à  $+ 1,0 \pm 0,2^\circ\text{C}$ , sans relation avec l'altitude (tableau X).

	avant 1988	après 1987	variation	risque statistique
Dombes	7,06	7,89	+ 0,84 (0,22)	p = 0,006 **
Bourg Saint-Maurice	7,30	8,27	+ 0,97 (0,18)	p = 0,002 **
Avrieux	7,25	8,25	+ 1,00 (0,19)	p = 0,002 **
Pralognan	6,18	7,51	+ 1,33 (0,27)	p = 0,003 **
Mont-Cenis	5,37	6,14	+ 0,77 (0,47)	p = 0,088 (*)
	----- 6,63 (0,84)° C	----- 7,61 (0,88)° C	----- + 0,98 (0,22)° C	

Tableau X. Différentiels thermiques "Étés" vs "Hivers" en Vanoise (et en Dombes) dans les deux périodes 1971-1987 et 1988-2007, calculé sur les 7 périodes consécutives de 6 ans.

La différence entre les deux périodes est fortement significative jusqu'à Pralognan inclus, moins nettement au Mont-Cenis ; pour l'ensemble de l'échantillon, la moyenne de  $1^\circ\text{C}$  reste significative [ $t = 1,80$  ;  $p = 0,054$  (\*)]. De ceci on peut conclure à une tendance du climat à la continentalisation ; pourtant, ce seul critère doit être relativisé puisqu'il ne s'accompagne apparemment pas d'une augmentation des précipitations estivales (autre trait continental, *vide infra*) et qu'il se voit contrebalancé par un net échauffement en belle saison (ce qui évoque plutôt une méditerranéisation). La situation de carrefour de notre région entre les trois grands climats européens explique peut-être ces incohérences formelles, qui tendent plutôt à accréditer le concept de dérèglement climatique envisagé en exergue.

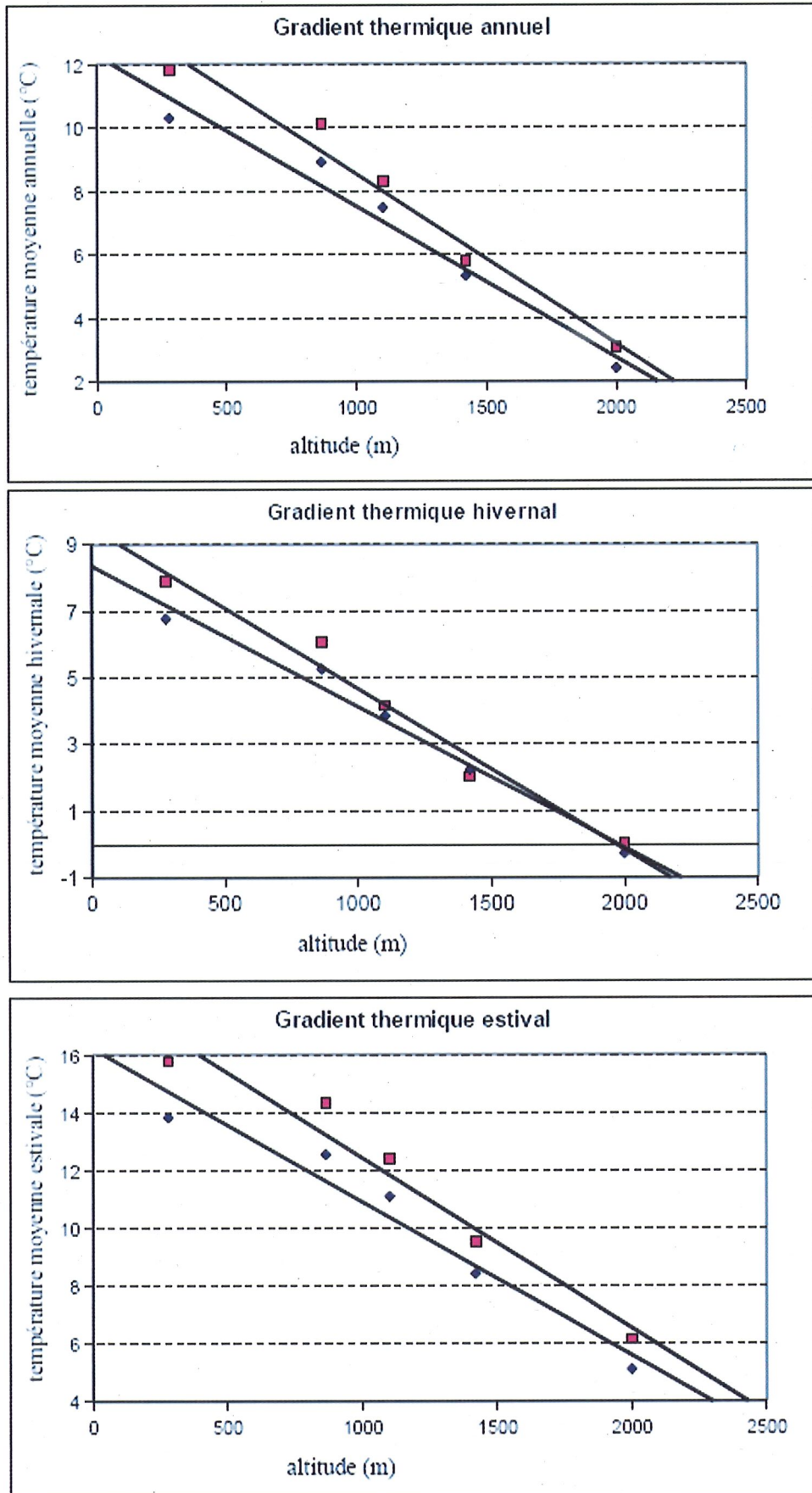
### 3.3. Gradients thermiques altitudinaux

Ce que l'on appelle les gradients thermiques (en montagne) découle d'une règle universelle voulant - en application de la diminution régulière de la pression atmosphérique en altitude, accompagnée de détente adiabatique consommatrice d'énergie - que la température décroisse elle aussi linéairement du niveau de la mer à la troposphère. La valeur universelle admise, de peu supérieure à un demi-degré Celsius, a été parfaitement vérifiée en Vanoise à la fin du siècle dernier (Lebreton *et al.*, 2000, p.1-37) à partir des relevés de 13 stations Météo-France obtenus entre 1967 et 1995 :

- Maurienne (7 stations de 620 à 2 000 m) :  $t^\circ\text{C} = 13,8 - 0,55$  (+/- 0,054) x hectomètre ( $r = 0,977$  ;  $p \ll 0,001$ ),
- Tarentaise (6 stations de 480 à 1 840 m) :  $t^\circ\text{C} = 13,5 - 0,52$  (+/- 0,069) x hectomètre ( $r = 0,966$  ;  $p \ll 0,001$ ),
- Vanoise (13 stations de 480 à 2 000 m) :  $t^\circ\text{C} = 13,6 - 0,54$  (+/- 0,039) x hectomètre ( $r = 0,977$  ;  $p \ll 0,001$ ),

soit une valeur annuelle moyenne alors égale à  $13,6 \pm 0,1^\circ\text{C}$  au niveau de la mer, diminuant de  $0,54^\circ\text{C}$  par hectomètre vers le haut, plus faiblement en hiver ( $0,44^\circ\text{C}$ ) qu'en été ( $0,56^\circ\text{C}$ ) ; l'isotherme annuelle  $0^\circ\text{C}$  se situait alors vers 2 530 mètres ["centre de gravité" de l'étagement du Lagopède alpin (Martinot et Lebreton, 2006)].

Ici, en calculant le même gradient annuel avant 1988 pour les 1 + 4 stations ici disponibles (de 280 m, en Dombes, à 2 000 m, au Mont-Cenis), nous trouvons une valeur un peu inférieure à celle qui vient d'être rappelée :  $t^\circ\text{C} = 12,3 - 0,48$  x hectomètre ( $r = 0,982$  ;  $p < 0,001$  \*\*\*), qui passe à  $t^\circ\text{C} = 13,9 - 0,53$  x hectomètre pour la seconde période ( $r = 0,986$  ;  $p < 0,001$  \*\*\*) (fig.5a-c), soit une augmentation du gradient thermique de l'ordre de 10 %. On développera ci-dessous (voir 4.2.)



Figures 5abc. Comparaison des gradients thermiques altitudinaux, de la Dombes au Mont-Cenis, entre les deux périodes 1971-1987 et 1988-2007. Données Météo-France.



la relation existant entre altitude et température, mais on peut d'ores et déjà signaler que, dans l'intervalle de temps ci-dessus considéré, l'isotherme annuelle 0°C calculée à partir des cinq stations a donc progressé de près de 100 mètres, passant de 2 470 à 2 560 mètres.

Si l'on prend séparément en compte les saisons estivales et hivernales, le gradient estival passe de + 0,48 à 0,53°C / hectomètre entre les deux périodes décennales séparées par l'année 1988, le gradient hivernal - normalement inférieur - passe de + 0,42 à 0,48°C / hectomètre ; en mauvaise saison, les courbes des deux périodes convergent aux hautes cotes, ce qui confirme que l'échauffement concerne alors plus la plaine que les cimes ; le phénomène est moins marqué en belle saison, où l'échauffement reste sensible à tous les niveaux. La régression parabolique améliore l'alignement des points (la Dombes s'écartant quelque peu de la Vanoise), sans changer pour autant la validité statistique des résultats, hautement significatifs ; la remarque vaut également pour les courbes saisonnières.

Entre les deux périodes 1971-1987 et 1988-2007, l'échauffement décennal décroît régulièrement de la plaine aux cimes (tableau XI et figure 6 page 84), plus marqué (et statistiquement mieux assuré) en été qu'en hiver, saison où il devient proche de zéro vers 2 000 mètres : on retrouve le constat d'un échauffement plus faible en hiver qu'en été, aux cotes supérieures plutôt qu'aux basses cotes, avec quasi extinction du phénomène en mauvaise saison à la limite supérieure des boisements. Le parallélisme des courbes montre néanmoins que cette évolution obéit à la même règle générale à tous les niveaux et en toutes saisons, même si elle reste mieux assurée - statistiquement parlant - en plaine et en été. Ce constat peut rassurer (à court terme) les stations de sports d'hiver de type alpin, situées en altitude, mais elle annonce très probablement un avenir plus sombre pour celles, de type familial, localisées dans l'étage montagnard. Inversement, si l'échauffement peut présenter certains avantages aux basses cotes pour la productivité végétale (cultures, boisements), avec notamment un démarrage plus précoce de la végétation en fin d'hiver, il inquiètera par contre les alpagistes, et les naturalistes soucieux des cheptels d'ongulés (chamois, bouquetins) ou des populations de lagopèdes, repoussées vers les sommets par "insularisation" croissante de leurs territoires.

#### 4. PROBLÈMES PARTICULIERS

Sans aucun doute incomplète, faute d'imagination ou de réalisme, la liste est déjà longue des phénomènes et des activités mis en cause par les effets, directs ou indirects, immédiats ou différés, de l'échauffement ou des dérèglements climatiques. Complexe pour les relations univoques, la problématique l'est davantage encore pour les situations multifactorielles, surtout lorsqu'on ignore tout (ou presque) de la complexité des écosystèmes, même (apparemment) les plus simples. Ainsi, l'échauffement n'agit pas de manière univoque sur le milieu mais en relation avec la quantité d'eau disponible pour la vie, elle même dépendante de la pluviométrie et des phénomènes d'évapotranspiration. C'est la raison pour laquelle les biogéographes et les phyto-écologues ont depuis longtemps défini des indices pluvio-thermiques de type  $P / t$  qui, faisant le bilan entre ce qui parvient au milieu (les précipitations) et ce qui s'en échappe (puisque l'évapotranspiration augmente avec l'échauffement), estiment ainsi la quantité d'eau réellement disponible pour l'écosystème. Or - comme dit en exergue - la variable hydrique est d'avenir incertain en Vanoise, dans un sens comme dans l'autre. Une première approche semble néanmoins montrer une certaine stabilité des bilans hydriques en Vanoise, les données et courbes actuellement disponibles indiquant une (apparente et légère) progression des précipitations estivales, que compense sensiblement l'échauffement (assuré et marqué) dans le bilan hydrique (tableau XII page 86 et figures 7abc page 85).

Station et cotes	Échauffement (°C)		
	moyennes annuelles	moyennes estivales	moyennes hivernales
<b>Marlieux (Dombes)</b> 280 m	1,54	1,95	1,12
<b>Bourg Saint-Maurice</b> 865 m	1,30	1,79	0,81
<b>Avrieux</b> 1 102 m	0,82	1,32	0,31
<b>Pralognan</b> 1 420 m	0,46	1,12	- 0,21
<b>Mont-Cenis</b> 2 000 m	0,67	1,05	0,29
<b>Droites de régression</b>			
pente (°C / hectomètre)	- 0,060	- 0,058	0,061
risque statistique r	0,851	0,926	0,754
risque statistique p	0,03	≤ 0,01 **	0,08 (*)

Tableau XI. Évolution altitudinale des gradients thermiques (années, étés, hivers) en Vanoise (et en Dombes) entre les deux périodes 1971-1987 et 1988-2007.

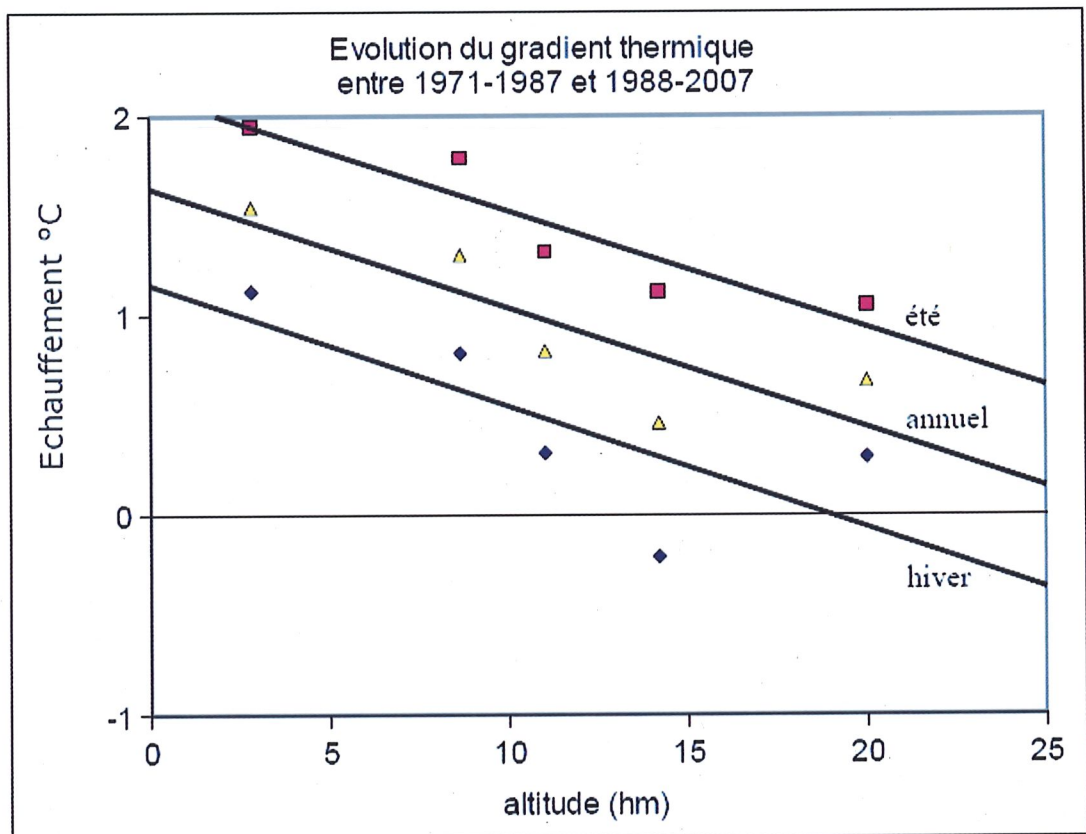
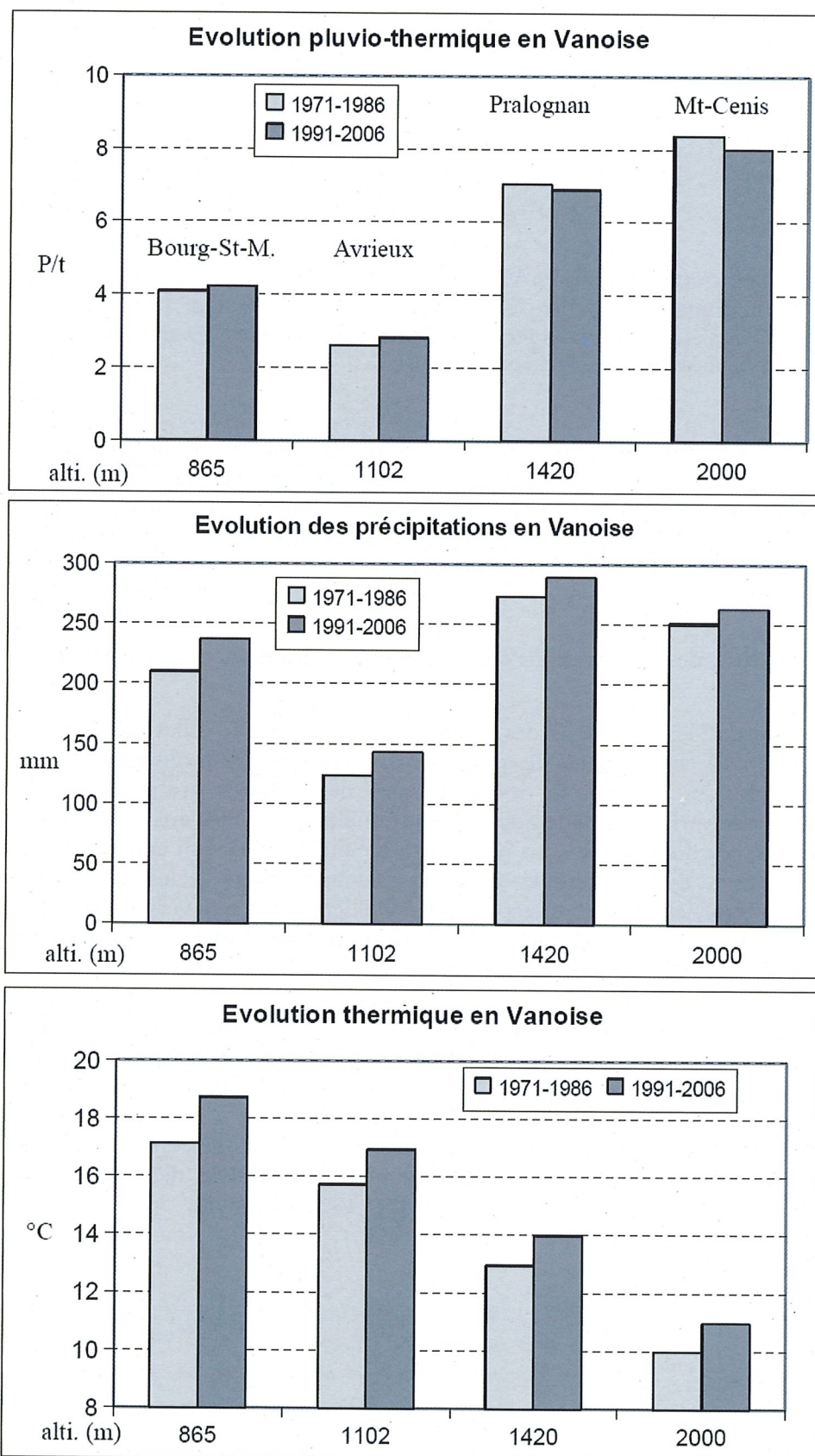


Figure 6. Évolution des gradients thermiques altitudinaux, de la Dombes au Mont-Cenis, entre les deux périodes 1971-1987 et 1988-2007. Données Météo-France.





Figures 7abc. Évolution thermique, pluviale et pluviométrique-thermique en Vanoise, entre les deux périodes 1971-1986 et 1991-2006. Données annuelles Météo-France

Bourg St-Maurice 865 m		Avrieux 1 102 m		Pralognan 1 420 m		Mont-Cenis 2 000 m	
1971-1986	1991-2006	1971-1986	1991-2006	1971-1986	1991-2006	1971-1986	1991-2006
P 209,5 mm	P 236,8	P 123,8	P 143,0	P 273,0	P 289,0	P 250,5	P 263,1
t 17,13 °C	t 18,72	t 15,73	t 16,94	t 12,94	t 13,99	t 9,96	t 10,96
P / t 4,08	P / t 4,22	P / t 2,62	P / t 2,81	P / t 7,03	P / t 6,88	P / t 8,38	P / t 8,00

Tableau XII. Évolution décennale en Vanoise des températures, précipitations et indices pluviométriques d'été entre les deux périodes 1971-1986 et 1991-2007.

Précipitations : mm cumulés de juin à août inclus ; températures : moyenne des trois mois, en °C.  
Calculée à partir des données de Météo-France (Savoie).

À titre d'illustration préliminaire, trois exemples d'interactions seront ici considérés, intéressant les trois sous-ensembles de tout écosystème : minéral (les glaciers), végétal (la végétation forestière) et animal (la marmotte). D'autres cas pourront retenir l'attention du "Groupe Climat" du Conseil scientifique du Parc national, en liaison et / ou en collaboration avec d'autres organismes ou demandeurs compétents sur le plan fondamental ou appliqué.

#### 4.1. Que peut-on tirer des informations fournies par les variations des glaciers alpins ? (par Louis REYNAUD)

S'il est bien connu que les variations des glaciers sont causées par celles du climat, que peut-on en déduire pour décrire les changements de ce dernier dans les zones de montagne ?

À l'échelle des grandes glaciations, les carottages des calottes arctiques ou antarctiques ont récemment fourni des variations de température sur quelque 900 000 ans. Mais, pour l'interglaciaire depuis 15 000 ans, ces données ne sont pas suffisamment détaillées, ni comparables, pour juger des modifications sur les dernières décennies ou même les deux derniers siècles<sup>3</sup>.

Sachant que les plus anciens relevés météo réguliers ne démarrent que vers 1870 et ce seulement dans quelques grandes villes éloignées des montagnes, on se tourne alors vers les variations des glaciers : 1 - celles de longueur, et 2 - celles de bilan de masse.

**4.1.1.** Celles de longueur sont les plus anciennes données sur l'extension des glaciers, mais, pour la majorité, contemporaines des premiers relevés de température ou de précipitations bien qu'on puisse y ajouter l'information d'extension maximale de la période du Petit Âge de Glace (PAG), vers les années 1820, pour la plupart des glaciers des Alpes françaises.

C'est justement à cause des dégâts causés par les glaciers au cours de ce PAG qu'une série d'archives s'est constituée à partir des doléances des habitants de la vallée de Chamonix, montrant que l'avancée du PAG y a culminé entre les années 1600 et 1820 (figure 8).

<sup>3</sup> De plus, ce serait faire le pari, d'entrée, d'une répartition uniforme des modifications climatiques de détail sur l'ensemble de la planète. Seules les importantes variations de température au cours des grands âges glaciaires et interglaciaires se retrouvent aux deux bouts du globe.



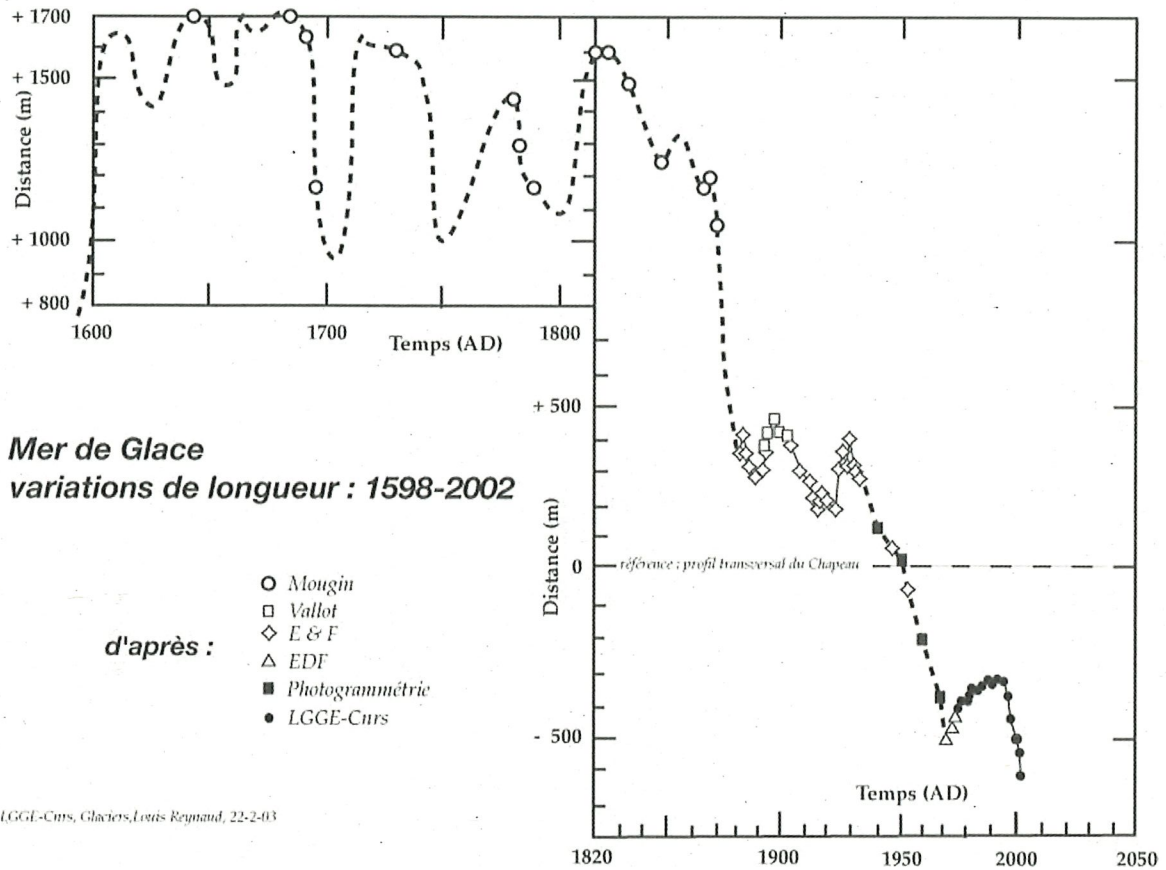


Figure 8. Variations de longueurs de la Mer de Glace de 1598 à 2002, d'après les recherches historiques de P. Mougins et les mesures de terrain des différents organismes. Données LGGE-CNRS, documentation Louis Reynaud.

Quand commence et quand finit ce PAG ?

Nous y sommes probablement encore en se référant à la faible extension glaciaire du Moyen Âge, à ses nombreux cols d'altitude alors fréquentés non seulement par les hommes mais aussi comme passage de bétail, alors qu'aujourd'hui, bon nombre ne sont praticables que par des alpinistes bien équipés.

Tandis que d'autres cols, maintenant dégagés totalement ou partiellement de glace et de névés font apparaître des restes de chemins et murs de soutènement témoins d'usages antérieurs au PAG. D'autre part, les archéologues qui ont travaillé sur l'habitat alpin, comme dans le Parc national des Écrins, suggèrent qu'au cours des périodes plus chaudes ayant émaillé l'Holocène, comme celles du Moyen Âge, de l'époque romaine ou de l'optimum climatique, vers - 6000 ans, des habitations permanentes pouvaient se trouver jusqu'à 2 000-2 500 m d'altitude.

Depuis les années 1820, ces glaciers n'ont connu qu'une longue décroissance seulement interrompue par des réavancées mineures, comme celles des années 1850, 1890, 1920 et 1980, séparées par des périodes de diminution au moins aussi importantes que celle qui sévit actuellement depuis le milieu de la décennie 1980. On retrouve ces diverses reprises d'avancées sur la quasi-totalité des appareils glaciaires de grandes tailles comparables, comme les glaciers d'Argentière (Mont-Blanc), de Gébroulaz (Vanoise) et Blanc (Écrins) (figure 9), en tant que manifestation d'une variation climatique semblable, qui intéresse la totalité des Alpes françaises, en se superposant au climat local et modulant la longue diminution de longueur depuis le début du déclin du PAG.

En effet, chaque glacier réagit de façon particulière dans ses variations de longueur avec des temps de réaction caractéristiques principalement de sa morphologie, notamment de la taille et de l'exposition de son bassin d'accumulation. C'est ce qui fait que ces données de variations de forme, bien qu'indispensables pour décrire globalement les changements, seront toujours difficiles à interpréter pour quantifier les variations climatiques qui en sont à l'origine.

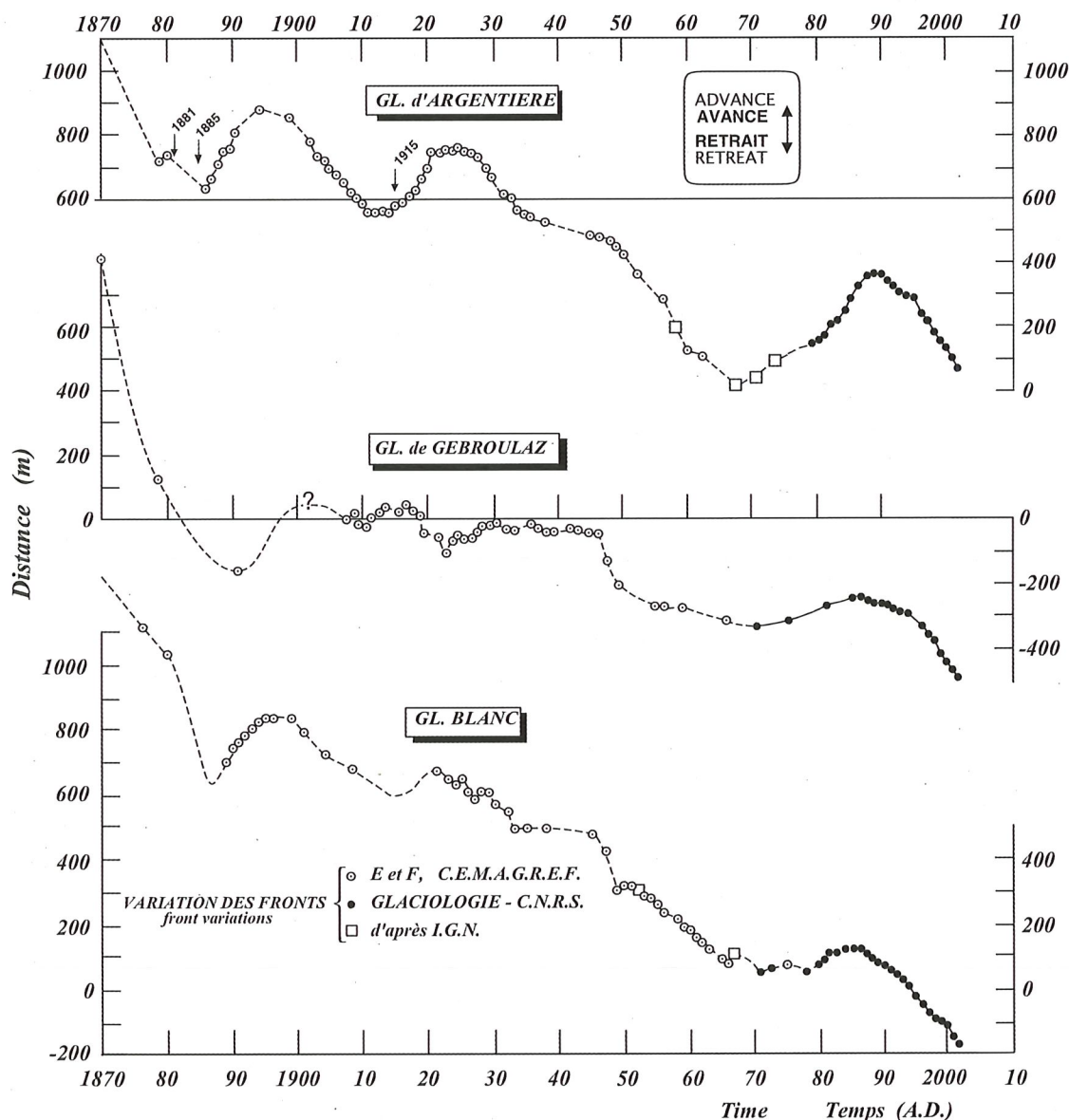


Figure 9. Comparaison de variations de longueur.  
 Période des mesures directes continues depuis les années 1870.  
 Données LGGE-CNRS, documentation Louis Reynaud

4.1.2. C'est pourquoi on a cherché à mesurer les variations annuelles de volume des glaciers, variations qu'on peut relier directement à celles des principaux paramètres météo de l'année en cours. Cette variation de masse se détermine en mesurant le bilan annuel, balance des gains et des pertes sur l'étendue totale du glacier. C'est donc d'une mesure plus astreignante techniquement dont il s'agit, avec carottage en zone d'accumulation et implantation de repères fichés dans la glace jusqu'à 12 m de profondeur en zone d'ablation, ce qui explique que les premières mesures de ce type n'aient débuté que tout récemment, dans les années 1950.

Pour en illustrer les résultats, comparons les mesures de bilan de masse entre le tout petit glacier de Sarennes (Grandes Rousses), de moins d'un demi km<sup>2</sup> de surface à celui du plus grand des Alpes, le Grand glacier d'Aletsch (Oberland bernois) dont le bassin versant couvre 80 km<sup>2</sup> et la longueur atteint 22 km<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> 80 km<sup>2</sup> de surface et 22 km de longueur c'est le double des ordres de grandeur de la Mer de Glace ; idem pour les épaisseurs maximales, respectivement de 950 m et 400 m.



Sur la partie supérieure de la figure 10, on remarque que les variations de masse spécifiques annuelles, c'est à dire une hauteur moyenne, cumulées depuis le début de la période de comparaison, 1923, sont différentes : le train de vie dispendieux de Sarennes, - 0,60 mètre d'eau par an en moyenne, va le mener à sa disparition d'ici à une vingtaine d'années, tandis qu'Aletsch ne perd respectivement que 0,20 m.eau/an.

Sur la partie inférieure du même graphique, sont représentées les variations annuelles de ces deux bilans de masse spécifiques par rapport à leurs moyennes respectives. C'est une façon de rendre comparables en détail les deux signaux au cours du temps, en les débarrassant de leur composante locale constante, pour faire émerger seulement la modulation du signal.

Il apparaît alors une remarquable similitude de variation, tant en phase qu'en amplitude pour ces deux glaciers distant de plus d'une centaine de kilomètres. Les variations inter annuelles sont fortes : c'est une caractéristique du climat que l'adage populaire « les années se suivent et ne se ressemblent pas » traduit assez bien. Seuls les moyennes et écarts types ont une réelle signification pratique.

Cependant, ces séries ne sont pas distribuées totalement au hasard : sur la partie haute de la figure des bilans, apparaissent des réavancées cycliques, témoignage de périodes climatiques caractérisées par des suites de températures et de précipitations bénéfiques ou défavorables aux glaciers.

C'est pourquoi, il n'est pas indifférent de choisir une quelconque période d'étude : il faut bien la situer dans l'ensemble des variations connues des paramètres météorologiques, car le début de la série, qui généralement sert de référence, s'écarte peut-être largement de l'état moyen sur de plus longues durées.

**En conclusion** de ce rapide parcours sur les principaux résultats obtenus à partir des variations des glaciers alpins, pour décrire les fluctuations climatiques subies dans le domaine de la haute montagne, il apparaît principalement :

- que le recul des glaciers n'est pas tout récent, qu'il a déjà débuté dans les années 1820, à la fin de l'apogée du PAG, et qu'il se poursuit encore près de deux siècles plus tard, modulé par des réavancées mineures suivies de reculs plus intenses, comme celui actuel.

Ces périodes de recul plus marquées, présentées hors de leur contexte, donnent lieu à des scoops médiatiques, évidemment dramatisées.

- la similitude des variations de longueur tout le long du massif alpin, par son caractère cyclique, témoigne d'une variation à grande échelle, celle d'une variation climatique se superposant à une tendance locale au réchauffement.

Fort heureusement, cette caractéristique de distribution justifie l'usage habituel que nous faisons en parlant d'un changement climatique moyen, bien que d'un massif glaciaire à l'autre, apparaissent des différences notables dans la chronologie des événements mineurs qui émaillent la grande décade des glaciers<sup>5</sup>.

C'est ce qui fait que les glaciers constituent un outil de choix pour suivre les changements climatiques dans leurs intensités et modulation spatiale, à partir des données recueillies sur les nombreux massifs montagneux répartis sur la planète.

---

<sup>5</sup> Ce même type de répartition « spatio-temporelle homogène » se retrouve dans les massifs glaciaires de type alpins, sur des distances de l'ordre de 500 km. Cependant, on ne trouve pas de synchronisme entre massifs plus éloignés, comme entre Scandinavie et Alpes (Six, D. et al., *CR. Acad. sci.*, 2001, 333 : 693-698).

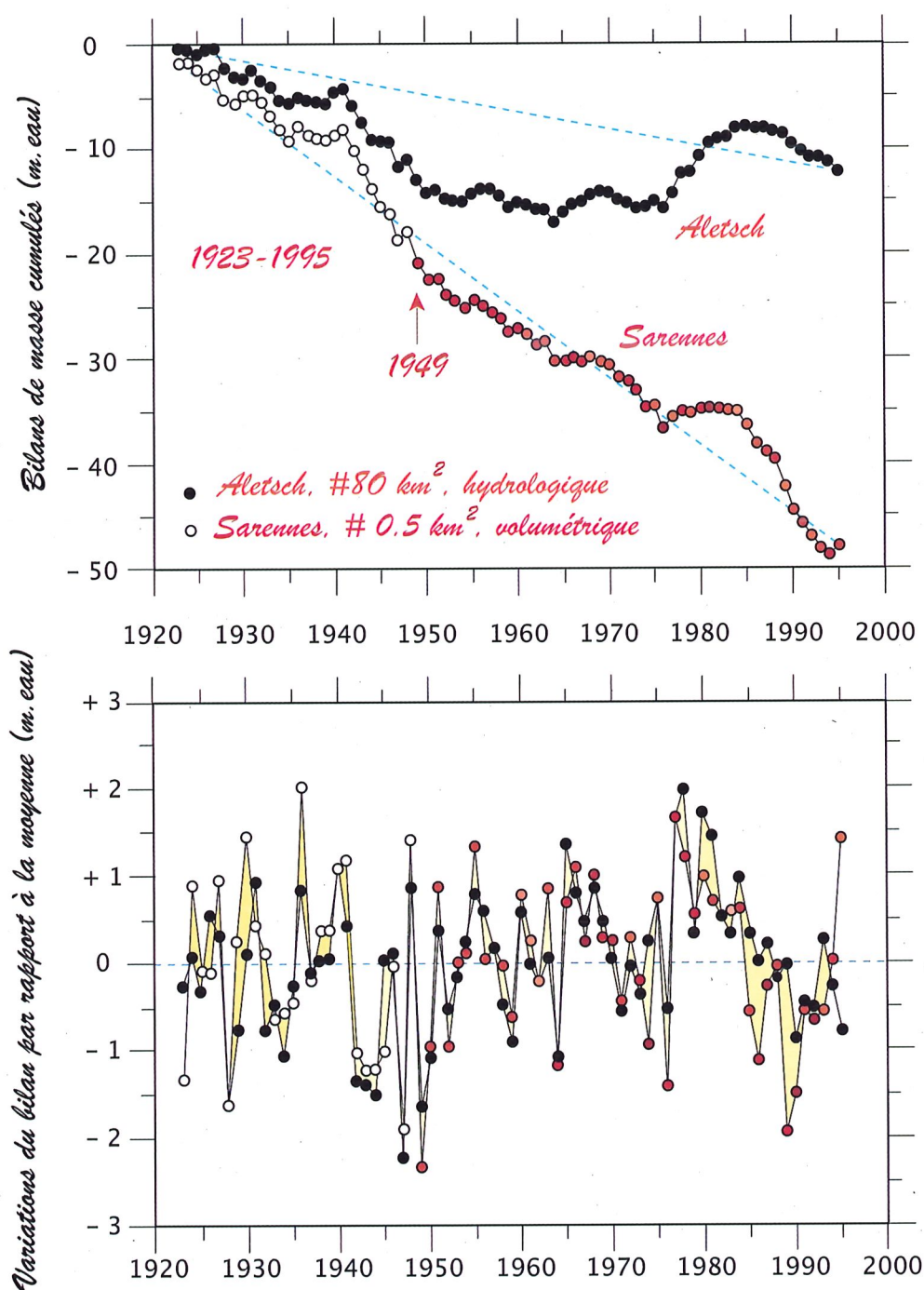


Figure 10. Comparaison des bilans de masse des glaciers d'Aletsch et Sarennes de 1923 à 1995<sup>6</sup>.  
D'après Ch. Vincent *et al.*, 2004. Données LGGE-CNRS, documentation Louis Reynaud.

<sup>6</sup> Aletsch est connu depuis 1923 car son émissaire terminal actionne une centrale électrique. La détermination de son bilan de masse utilise la méthode dite « hydrologique » pour faire le bilan des entrées-sorties sur l'ensemble du bassin versant. Sarennes est suivi directement par la méthode « glaciologique », mesures directes d'accumulation et ablation en cinq points de sa surface. Mais le suivi du Cemagref de Grenoble ne débute qu'en 1949. Aussi, c'est à l'aide des températures et précipitations (série de Lyon-Bron), qu'a été reconstituée sa série 1923-1948, pour les besoins de la comparaison.



## 4.2. La végétation forestière (par Philippe LEBRETON)

### L'étagement bioclimatique en montagne

L'analyse, la compréhension et la prédiction des effets possibles du dérèglement climatique sur la végétation en général, les forêts de montagne en particulier, passent par la confrontation de deux lois scientifiques, la première relevant de la physique, la seconde de la biologie :

- *dans le premier cas*, il s'agit du phénomène thermodynamique de détente adiabatique dont une forme prosaïque est l'échauffement généré par la compression brusque et répétée d'une pompe à vélo (inversement, la compression lente, plus proche des conditions dites de réversibilité, s'effectue à température constante ; elle est donc isotherme). Symétriquement, la diminution régulière, avec l'altitude, de la pression atmosphérique, conduit au refroidissement de celle-ci, avec une "pente" ou gradient thermique, dont la valeur, de l'ordre d'un demi-degré centigrade pour 100 mètres de dénivellation (soit 200 m / °C), est valable pour toutes les montagnes du globe terrestre.

- *dans le second cas*, alors qu'on aurait pu s'attendre à une évolution continue (= graduelle) de la composition de la végétation de la plaine aux cimes, une autre loi à caractère universel a été dégagée par les phytogéographes, qui ont mis en évidence la superposition de "tranches" ou étages de végétation, d'une épaisseur moyenne de 600 (700) mètres en Europe moyenne (Ozenda, 1994, 2002)<sup>7</sup>. Plus précisément, on peut reconnaître, de bas en haut (moyenne des ubacs et des adrets), de manière graduée : l'étage planitiaire, jusqu'à 300 mètres environ ; l'étage collinéen, de 300 à 900 mètres ; l'étage montagnard, de 900 à 1 500 mètres ; l'étage subalpin, de 1 500 à 2 100 mètres, qui signe (plus ou moins artificiellement) la limite supérieure des boisements forestiers ; l'étage alpin, de 2 100 à 2 700 mètres, et l'étage nival, au-delà de 2 700 mètres, sont asylvatiques, sauf individus épars (figure 11). En d'autres termes, "l'épaisseur thermique" d'un étage de végétation se situe dans la fourchette 3 à 4°C, compte-tenu d'un gradient local proche de 0,55°C / hectomètre.

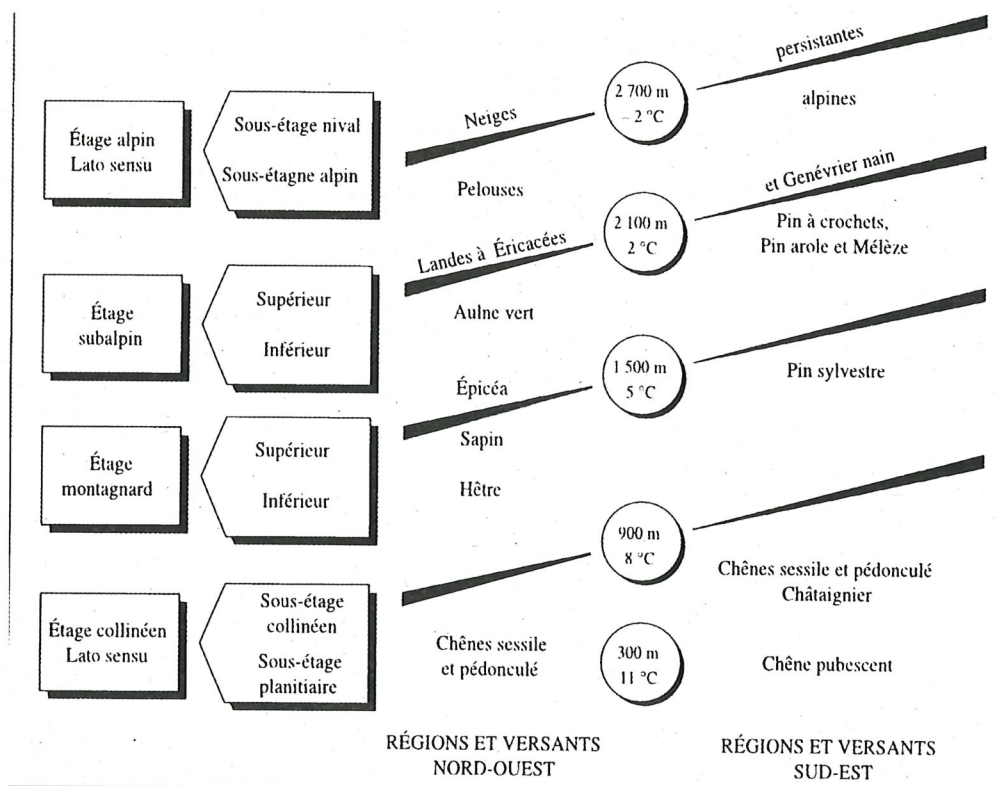


Figure 11. Étagement bioclimatique dans les Alpes du Nord

<sup>7</sup> Membre de l'Académie des Sciences, ancien professeur à l'Université de Grenoble, Paul Ozenda a été Secrétaire du Comité scientifique du Parc national de la Vanoise de sa création à 1986 ; à ce titre, il a assuré la parution des tomes I à XV des Travaux scientifiques, assisté par Mme Marie-Claude Neuburger.



À ces mécanismes de base l'orientation ajoute ses effets, un écart d'au moins 2°C (l'équivalent de 360 m de dénivellée) se manifestant selon les versants (ubacs *vs* adrets), ces derniers évidemment plus chauds, phénomène auquel réagissent plantes et animaux, selon leurs préférences autoécologiques.

#### Conséquences écologiques

De la même loi dérivent d'autres valeurs "éco-thermiques", comme une variation du nombre de jours de gel de l'ordre de 8 jours pour 100 mètres de dénivellation, plus précisément 14,5 jours / °C, ainsi qu'une variation de près d'une semaine de la durée de la saison de végétation par hectomètre, en d'autres termes 11,7 jours / °C (Lebreton *et al.* 2000, courbes p. 34 et p. 32). Par complémentarité, la saison froide (= température moyenne inférieure à + 5°C) serait amputée de 13 +/- 2 jours pour 1°C d'échauffement, comme c'est actuellement le cas vers 1 000 mètres (entre les cotes de Bourg Saint-Maurice et d'Avrieux) par rapport aux années 1967-1988 prises comme référence.

La température diminuant également de manière régulière lorsque l'on se déplace vers le nord, avec un gradient de 200 kilomètres / °C (à une cote donnée), il s'ensuit - géographiquement parlant - une relation altitude / latitude où, toutes choses égales par ailleurs, une ascension de 100 mètres est thermiquement équivalente à un déplacement de 100 kilomètres vers le nord. Les deux paramètres peuvent évidemment se combiner. Ainsi, en un point donné, on pourrait assister non seulement à un déplacement vers le haut des espèces locales mais à l'arrivée depuis le sud d'espèces homologues méridionales. Enfin, sur la base des constats faits en Vanoise depuis une quarantaine d'années, il devient également possible de chiffrer les effets possibles de l'échauffement en Vanoise, sur la base d'un gradient moyen hectométrique décennal égal à 0,32 +/- 0,14°C par décennie (*cf.* tableau IV). En extrapolant à l'année 2050 vue comme horizon forestier, la température annuelle actuelle s'élèverait encore de 1,4°C (fourchette 0,8-2,0°C), équivalant à un glissement vers le haut de quelque 250 mètres, près d'un demi-étage de végétation. En prenant en compte la seule belle saison, active pour la végétation, l'échauffement devient 2,1°C (fourchette 1,6-2,6°C) et l'élévation 380 mètres. À cela s'ajoute le fait que la limite supérieure des forêts a été historiquement abaissée par déboisement d'environ 300 mètres.

Toutefois, on l'a vu, cet échauffement n'est pas constant des piémonts aux cimes puisque, s'il dépasse nettement la moyenne générale en dessous de 1 200 mètres, il s'annule pratiquement à la base de l'étage alpin (non boisé), vers 2 000 mètres. Cette évolution altitudinale de l'échauffement entre les deux périodes implique donc une "dilatation" des étages bioclimatiques inférieurs par rapport à ceux des plus hauts niveaux (*cf.* figure 5). Du coup on pourrait assister à un "télescopage" de l'ascension végétale, plus marquée en bas (domaine des feuillus) qu'en haut (domaine des résineux). C'est donc plutôt en zone "optimale d'adhésion" (= ex-périphérique) qu'en "zone-cœur" (ex-zone centrale) que progresserait de la forêt, déjà peu représentée dans le parc national (avec moins de 1 % des surfaces en principe protégées).

#### Impacts sur la végétation

On doit s'interroger sur le devenir de boisements soumis en 2030 à un échauffement estival de quelque 2,4°C (fourchette 1,7 à 3,1°C) depuis 1987 (calculé sur la base observée de + 0,55 +/- 0,17°C par décennie pendant 44 ans), surtout s'il s'accompagne d'une multiplication des années de canicule, comme en 2003. Plus que l'hiver, on l'a dit, c'est en effet la saison chaude qui détermine et conditionne à la fois la vitalité et la vulnérabilité de la végétation, surtout ligneuse et élevée. Dans de telles conditions, quelques années peuvent suffire à provoquer le dépérissement des espèces les plus sensibles, soit la plupart des feuillus actuels et, chez les résineux, des épicéas et des sapins ; inversement, il faut tabler sur une cinquantaine d'années pour espérer une (amorce de) forêt digne de ce nom. Car reconstituer une forêt (en fait un écosystème forestier), c'est aussi refonder un sol (au sens pédologique et non seulement géologique du terme), avec son humus et son cortège vivant hypogé ; à cette tâche, les essences indigènes proches, de la base ou du sud, sont a priori mieux pré-adaptées que celles de provenance exotique, héritière d'une tout autre histoire biologique. Au niveau infra-spécifique, mieux vaut donc tabler sur l'existence et la disponibilité "d'écotypes" (= entités indigènes adaptées au milieu) d'une espèce donnée que sur l'importation d'essences allochtones (en



pratique, sapin de l'Aude ou des Alpes-Maritimes plutôt que Sapin pinsapo d'Andalousie ou du Rif, sans même parler de Cèdre de l'Atlas, de Mélèze des Sudètes ou de Douglas d'Amérique du Nord).

On peut en effet miser - à moindres frais et sans plus de risques - sur la diversité génétique des espèces locales, en laissant s'exprimer la spontanéité naturelle, les individus pluvio-thermiquement les mieux pré-adaptés ayant plus de chances de s'imposer et de générer à moyen et long terme des populations viables et pérennes. Car en ce domaine, "*ne pas gérer, c'est encore gérer*", même si certains pensent que "*faire et défaire, c'est encore travailler*". D'ailleurs, le Protocole "Forêt de montagne" de la "Convention alpine" (définitivement ratifié par la France le 31 janvier 2006) prévoit que "*les parties contractantes s'engagent notamment à assurer avant tout (souligné par nous) la régénération naturelle de la forêt, des peuplements ... composés d'essences adaptées à la station (et l'utilisation de plants forestiers de provenance autochtone*". À ceux qui verraient dans la "plantation" de forêts artificielles la solution des problèmes soulevés par le dérèglement climatique, on opposera de même que "*l'objectif (de ce) protocole est la conservation de la forêt de montagne en tant qu'écosystème proche de la nature*", et que "*pour remplir les fonctions mentionnées, une gestion respectueuse, proche de la nature et durable de la forêt de montagne est la condition sine qua non*" (souligné par nous, en ajoutant : surtout dans des espaces protégés !).

Dans ces conditions, les pins, essences frugales, robustes et dynamiques, ont certainement plus de chance de s'imposer que les autres résineux ; il s'agira avant tout des essences locales (le Pin sylvestre, aux adrets de l'étage montagnard ; le Pin à crochets, son vicariant de l'étage subalpin ; le Pin arole, aux ubacs du même étage), en attendant les méridionaux (aux cotes moyennes, le Pin de Salzmann, sous-espèce sub-méditerranéenne du Pin noir, endémique des Cévennes ; dans les piémonts, le Pin d'Alep, autochtone présent jusqu'en Drôme moyenne, dans les étages bio-climatiques per- et supra-méditerranéens). Dans les Préalpes, contrairement au banal Pin noir d'Autriche, utilisé depuis des lustres en reboisement, une essence alpestre indigène encore trop méconnue, le Génévrier thurifère, peut être mise en avant, compte-tenu de sa frugalité et de son dynamisme constatés aux étages supra- et monti-méditerranéens dans les Alpes du Sud (Garraud *et al.*, 2009).

À plus long terme, les pins, relevant davantage de para-climax que de climax de végétation, auront pour rôle de protéger et reconstituer les sols, préparant ainsi le terrain pour les essences de la forêt de demain, en équilibre avec les modifications de l'environnement. En tout état de cause, quels que puissent être les procédés ou les arbres retenus, une période de transition, marquée d'incertitude voire de chaos, va s'ouvrir pour un demi-siècle, entre dépérissement et régénération, avec "effet-diabolo" sur la biodiversité, qui passera inévitablement par des valeurs minimales entre peuplements climaciques d'hier et de demain, comme déjà démontré par des études prenant l'avifaune comme indicateur de l'écosystème forestier (pour les Préalpes de la Drôme, voir notamment Lebreton et Choisy, 2000).

#### 4.3. La Marmotte (par Dominique ALLAINE)

##### Présentation de l'espèce

La Marmotte alpine *Marmota marmota* est, dans nos régions, un mammifère de taille moyenne inféodé au milieu de montagne ; on peut l'y trouver de 800 à 3 000 mètres mais elle préfère les pelouses alpines situées vers 2 000-2 500 mètres (Allainé *et al.*, 1994). Cette espèce très territoriale vit en familles composées d'un couple de "dominants" qui assurent la reproduction de "subordonnés" sexuellement matures, âgés de 2 à 4 ans en général, "d'immatures" d'un an et de "marmottons" de l'année. La saison de reproduction est entamée dès la fin de l'hibernation, à la fin de mars ou au début d'avril ; l'accouplement a lieu dans la seconde moitié d'avril. Après un bon mois de gestation, la femelle dominante donne naissance à une portée d'un à 7 jeunes (en moyenne 4). La lactation se déroule dans le terrier de mise bas et dure environ 40 jours. Les marmottons sevrés émergent donc entre la mi-juin et la mi-juillet. Débute alors une « course contre la montre » pour



accumuler suffisamment de réserves de graisse avant l'entrée en hibernation, à la fin de septembre et au début d'octobre. Le cycle annuel de la Marmotte alpine est donc marqué par deux phases critiques : une période d'hibernation relativement longue (dans les conditions ambiantes jusqu'à présent connues), une saison de croissance relativement courte. On conçoit alors aisément que les conditions climatiques puissent potentiellement affecter significativement la survie et la reproduction des individus.

#### Méthodologie des études en Vanoise

La population de marmottes du vallon de la Sassièrè est suivie par capture / marquage / recapture depuis 1990, ce qui offre l'opportunité d'explorer l'effet des variables climatiques sur les paramètres démographiques et la phénologie (= évolution temporelle) de la reproduction. Nous avons commencé par analyser l'effet des variables environnementales estivales sur la survie des individus. Deux variables climatiques ont été utilisées à cet effet : la température moyenne et les précipitations cumulées pendant la période de croissance (mesurées sur place de mai à octobre : stations de Météo France de Val d'Isère, Mont Cenis et station de ski de Tignes). En outre, un indice de végétation disponible à la sortie d'hibernation a été défini, le NDVI, "Normalized Difference Vegetation Index", mesuré au 15 avril. Sur la période d'étude, située juste après le grand "tournant thermique" de la fin de la décennie 1980, la température moyenne estivale tend à augmenter tandis que les précipitations sont plutôt en diminution. Les deux variables peuvent être combinées sous forme d'un indice pluviothermique de forme  $P / t$  (renseignant sur l'humidité réellement disponible), qui reste en moyenne stable jusqu'en 1998, avec décroissance significative depuis lors (figure 12, régression parabolique ;  $p = 0,04$  ; significatif). Dans le même temps, l'indice végétal printanier NDVI augmente pendant toute la décennie 1990, mais régresse légèrement ensuite (figure 13, régression parabolique ;  $p \leq 0,01$  ; très significatif). La survie a été modélisée par l'utilisation de modèles de capture / recapture en suivant les étapes recommandées par Lebreton *et al.* 1992. Nous avons utilisé le logiciel M-surge (Choquet *et al.*, 2004) et sélectionné les modèles à l'aide du critère d'Akaike (Johnson et Omland, 2004). Outre les facteurs environnementaux précités, cinq autres ont été considérés comme potentiellement influents sur la survie annuelle : l'âge, le sexe, l'année, le statut social (dominant ou subordonné) et la présence de subordonnés mâles (vus comme aides potentiels) (Allainé *et al.*, 2000 ; Allainé et Theuriau, 2004).

#### Résultats des études

Concernant l'effet des facteurs environnementaux, l'analyse révèle qu'ils n'affectent pas la survie des immatures d'un an et des subordonnés. En revanche, la survie des marmottons semble favorisée par de faibles précipitations, ce qui peut s'expliquer par des difficultés de thermorégulation par temps pluvieux mais aussi par le fait que, les animaux sortant moins des terriers lorsqu'il pleut trop fort, ils seraient alors insuffisamment nourris. Toujours pour les marmottons, l'indice végétal peut être actif, mais de manière très différente en absence ou en présence d'aides : dans le premier cas, les aides semblent "amortir" toute variation de l'indice végétal (figure 14a, régression linéaire "plate") tandis qu'en leur absence, la survie des marmottons dépend positivement des disponibilités végétales (figure 14b, régression linéaire ;  $p \leq 0,001$  ; hautement significatif). La disponibilité en nourriture en tout début de saison est sans doute un déterminant important de la condition des mères allaitantes et, par voie de conséquence, de la condition des marmottons eux-mêmes. L'interaction avec la présence d'aides - qui réchaufferaient les marmottons en hiver - suggère une autre influence indirecte de la végétation, les marmottons en faible condition ayant alors un faible taux de survie. Enfin, la survie des adultes (= dominants) semble elle aussi dépendre des conditions climatiques (mais moins nettement que pour les marmottons), apparemment favorisée aux plus faibles températures et aux plus fortes précipitations. On peut en inférer que l'humidité biologiquement disponible est ici déterminante, plus forte par temps (relativement) pluvieux et frais, plus rare dans le cas contraire, avec risque d'un assèchement trop précoce de la végétation, d'où de moindres réserves énergétiques chez les animaux hibernants.



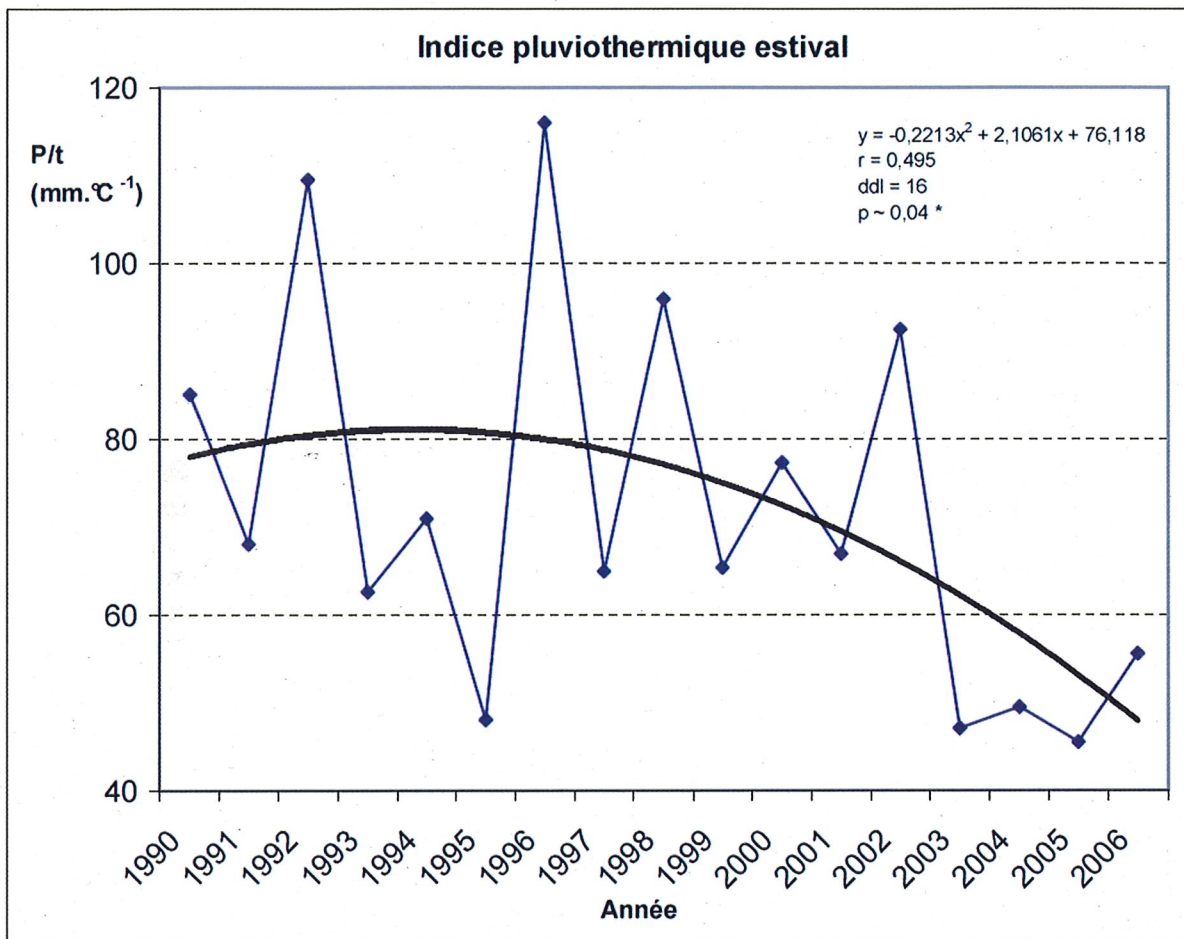


Figure 12. Indice pluviothermique estival

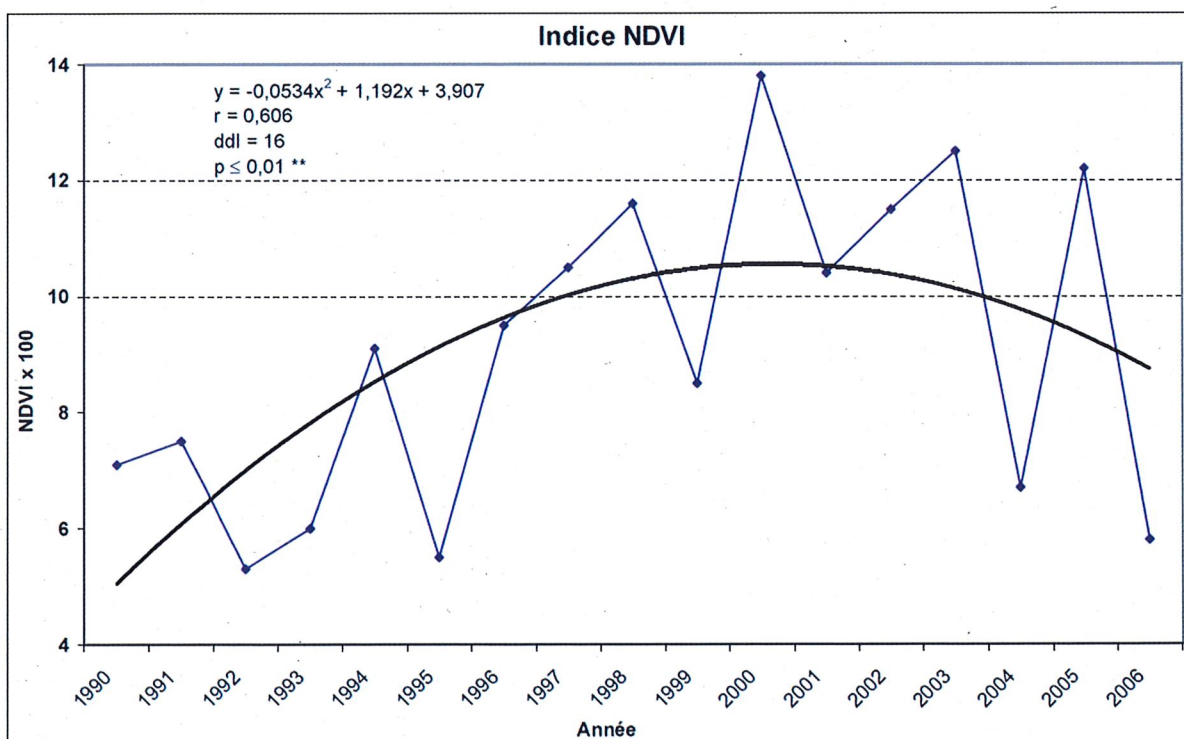
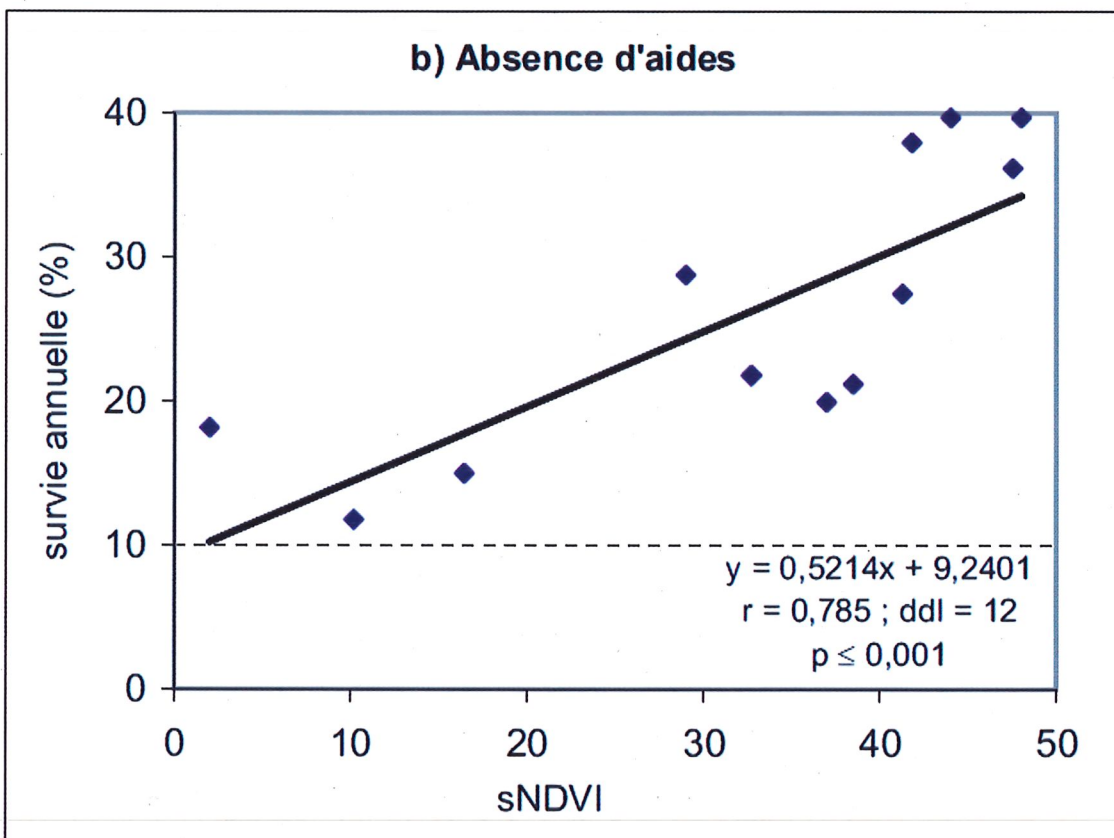
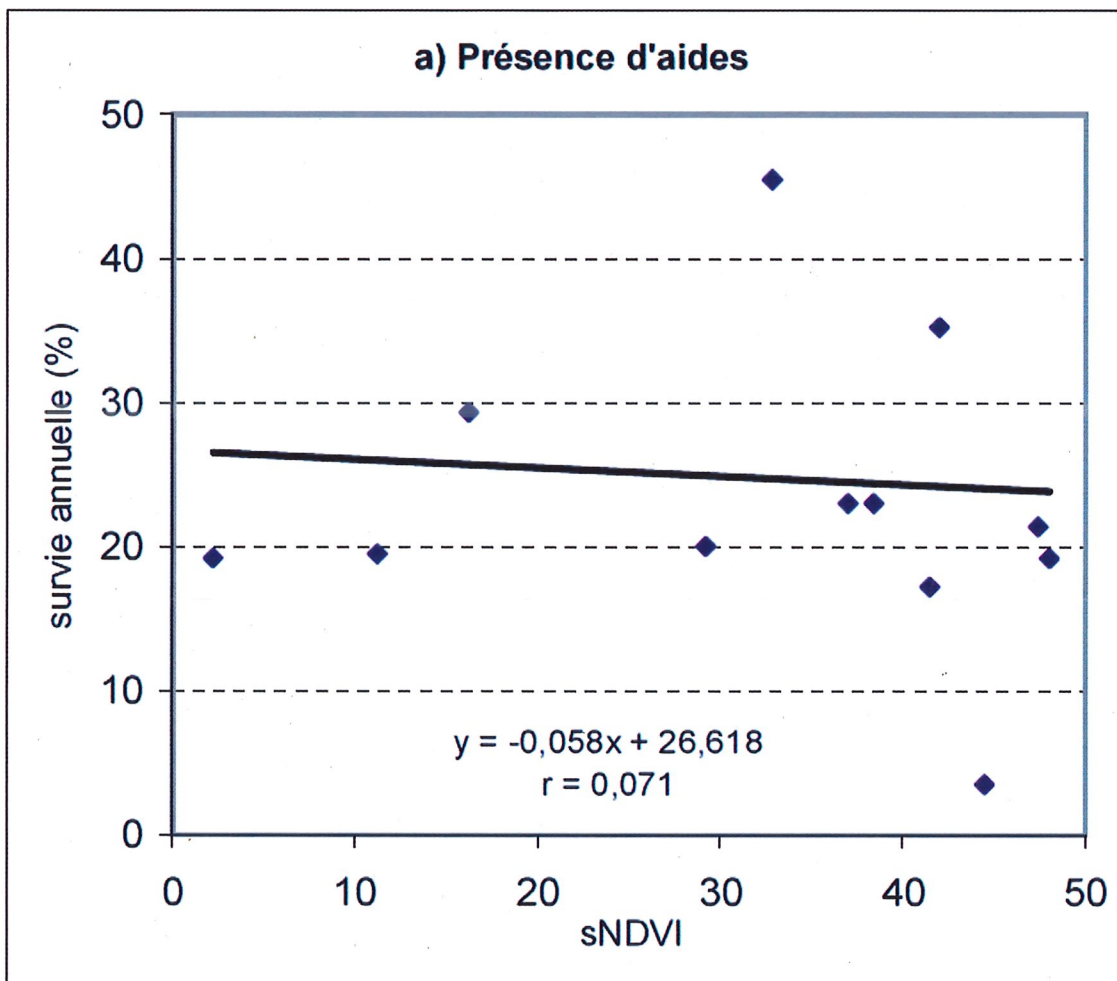


Figure 13. Indice végétal printanier NDVI



Figures 14 a et b. Indice végétal en présence (a) ou en absence d'aides (b)



Premières conclusions

De cette analyse préliminaire, il ressort que les variables climatiques ont un effet complexe sur le fonctionnement démographique des populations de marmottes, une même variable - par exemple les précipitations estivales - pouvant avoir des effets contraires sur les différentes classes d'âge. Les changements climatiques en cours - échauffement estival probablement moins marqué cependant à l'altitude de la Grande Sassièr (2 350 m), évolution des précipitations - auront des impacts certains mais difficile à appréhender, d'autant que les indices pluviothermiques semblent en Vanoise relativement compensés entre les deux facteurs (*vide supra* 4, figures 7abc et tableau XII). Pour mieux cerner le sujet, nos résultats suggèrent en effet qu'il semble préférable de combiner les variables plutôt que d'analyser leurs effets séparément ou de manière purement additive. La construction d'un modèle de sécheresse plus performant que les rapports P / t actuels paraît donc pertinente pour intégrer réchauffement et évolution locale des précipitations. Enfin, si nous nous sommes limités ici au climat estival (celui-ci étant plus affecté par le phénomène d'échauffement), de précédents travaux soulignent aussi l'importance du climat hivernal pour la survie des individus (Farand *et al.*, 2002). La phénologie de la reproduction n'a pas non plus été considérée, alors que la forte augmentation de l'indice NDVI (mesuré à la mi-avril) dans la décennie 1990 est à rapprocher des deux mois révélés les plus échauffés en Vanoise : mars et mai (*vide supra* 3.2., figures 4abcd et tableau VIII p. 101-102), avec une fonte de plus en plus précoce de la neige au printemps. Les marmottes - femelles dominantes en particulier - ont donc accès de plus en plus tôt à une végétation comestible ; il se pourrait alors, non seulement qu'elles évitent ainsi les disettes de fin d'hibernation mais qu'elles soient en meilleure condition pendant la période de reproduction. Du fait d'un accès plus précoce aux ressources, la proportion de femelles reproductrices pourrait donc augmenter dans la population.

## 5. CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Avec une prévision d'échauffement séculaire similaire à celle « officiellement » fournie par le GIEC pour la moyenne mondiale, de l'ordre de 3°C (soit 500 mètres de dénivellation), les résultats de la présente étude inscrivent bien la Vanoise dans le schéma général du "réchauffement climatique" à l'échelle des "changements globaux" ; ils valident en outre les données de Météo-France et les traitements statistiques conduits par le "Groupe Climat" du Parc national de la Vanoise. L'originalité vient plutôt des déclinaisons spatiales ou temporelles locales de cet échauffement, avec une forte anomalie : contrairement à une règle écologique très générale, qui veut que la plupart des effets physiques et biologiques homologuent déplacements altitudinaux et latitudinaux, l'échauffement constaté en Vanoise concerne davantage les piémonts que les plus hauts niveaux, alors que la tendance mondiale pèse aujourd'hui davantage sur les régions polaires que sur les zones intertropicales. De même, loin d'être uniforme sur l'année, l'échauffement intéresse surtout la "belle saison" (semestre couvrant de mars à septembre inclus), sans être pour autant négligeable à l'entrée de l'hiver. En d'autres termes, l'échauffement est d'autant plus marqué qu'il se manifeste dans le domaine spatio-temporel déjà le plus chaud : "en bas, en été". Cette diversité locale du phénomène d'échauffement climatique amène à envisager l'exploitation des quelques autres données météorologiques disponibles (même si elles portent sur des séries moins longues) et à souhaiter l'implantation - comme au début de la décennie 1970 - de stations en haute altitude, au delà de 2 100 mètres, dans l'étage alpin, en Vanoise ou dans d'autres espaces protégés à l'instar de celle installée dans le Parc naturel régional du Vercors.

À la lumière des premières données et de leur analyse, des commentaires d'ordre général peuvent être fournis sur leurs incidences gestionnaires, spatiales et temporelles. À (moyen et long) terme, tous les compartiments de l'écosystème seront concernés, et pas seulement "la température de l'air" fournie par les bulletins météorologiques et qui nous intéresse par anthropocentrisme d'espèce "à sang chaud". L'eau sous toutes ses formes, y compris le passage critique du solide (glace et neige) au



liquide (eaux, stagnantes et courantes), puis au gaz (vapeur d'eau, condensable en précipitations). Les sols, dont l'évolution autour de l'isotherme 0°C entraînera, en cas de dégel, des phénomènes de solifluxion, avec risques d'érosion, glissements de terrain, dérochements, éboulements, la glace permanente (appelée "permafrost" aux latitudes élevées) ne jouant plus son rôle de "ciment" pour le substrat minéral. À l'échelle temporelle, l'évolution saisonnière de l'échauffement (notamment un mois de mars très échauffé) est de la plus haute importance, car elle influence directement le calendrier des phénomènes naturels (développement végétal, comportement sexuel des mammifères, migration des oiseaux, biodiversité en général, etc.) comme celui des activités humaines (agriculture et tourisme, si importants dans le périmètre considéré). Un aperçu préliminaire des « *Effets biologiques d'un réchauffement climatique en montagne* » avait été fourni dans le tome XXI des Travaux scientifiques du Parc national (Lebreton *et al.*, 2000, p. 50-51, texte et schéma).

En considérant brièvement les sports de neige, il apparaît - sous réserve d'évolutions ultérieures - que les stations d'altitude ont devant elles un avenir moins sombre que celles de moindres cotes (stations dites "familiales"), puisque leur échauffement reste limité par rapport aux valeurs générales, et qu'elles n'affectent que peu, voire pas du tout (du moins pour l'instant) la saison hivernale. Cette remarque ne relève évidemment pas du seul paramètre thermique et d'autres considérations - relatives notamment à la saisonnalité des précipitations - doivent entrer en jeu pour une estimation plus complète et nuancée des potentialités nivales : à sommes annuelles identiques, des précipitations concentrées sur la saison chaude sont ainsi moins favorables à la constitution du manteau neigeux que celles d'hiver, d'autant que les premières favorisent la fonte glaciaire. Échauffés, le printemps et l'été n'annoncent pas forcément une plus "belle saison" pour le tourisme et l'agriculture et, surtout, le pastoralisme (risques de canicule affectant les herbages, même sur les alpages).

Ce constat quelque peu insolite mériterait sans doute d'être éprouvé plus largement, tellement seraient importantes ses répercussions sur les sports de neige. En d'autre terme, si les stations de cotes faibles et moyennes semblent d'ores et déjà condamnées à la récession, le devenir des stations d'altitude (d'après nos résultats locaux) est-il pour autant moins menacé ?

Le cas de Pralognan-la-Vanoise, pour indubitable qu'il soit, n'est-il pas particulier, dû aux conditions glaciologiques signalées ? Le cas du Mont-Cenis n'est-il pas biaisé par les difficultés de la météorologie en altitude, ou aux caprices de la Lombardie ?

Afin d'éprouver la « générabilité » de notre constat - non signalé par ailleurs, du moins à notre connaissance - nous suggérons que notre méthodologie soit transposée et appliquée dans les deux parcs nationaux homologues de la Vanoise, Écrins et Mercantour, couvrant ainsi en latitude la chaîne alpestre française.

De toute évidence, longtemps nié et brocardé par certains (même - marginalement il est vrai - dans le milieu scientifique), le dérèglement climatique s'accompagnera inéluctablement d'effets écologiques, mais aussi d'incidences économiques réclamant des réponses actives à tous les niveaux, individuel et collectif. Ainsi, est-il raisonnable d'accéder aux stations touristiques (en hiver comme en été) par des moyens de transports générant des gaz à effet de serre ? Est-il raisonnable de tenter de pallier les effets du réchauffement en amplifiant la pratique de la neige artificielle, consommatrice d'eau et d'énergie, deux ressources critiques pour les enjeux du siècle qui s'ouvre : pourrait-on alors parler de tourisme durable ? Les quelques exemples présentés ne l'ont été qu'à titre indicatif, d'autant qu'ils sont loin d'être les seuls et que la myopie de nos comportements sectoriels, voire corporatistes, nous réserve sans doute bien des surprises (il suffit de penser à notre ignorance et à notre indifférence totales pour de tels problèmes il y a 20 ans seulement !). Une remise en cause et une adaptation des pratiques s'imposent donc de toute évidence, qui relèvent d'un niveau éminemment "politique" auquel certains élus se sont heureusement mais récemment intéressés (ANEM, 2007). De manière complémentaire, la contribution des scientifiques consiste en la mise à disposition d'éléments de jugement et de décision pour aboutir à un "développement durable" digne de ces termes dans le nouveau contexte climatique et socio-économique, hautement évolutif.

Remerciements à Aurélie COHAS pour les analyses statistiques concernant l'étude de la Marmotte.



	1967-1987 -----	1988-2007 -----	Différences (test t de Student) -----
<b>Marlieux en Dombes (280 m)</b>			
Années (légales)	10,25 (0,50)	11,87 (0,54)	1,62 (0,16) t = 10,29 ; p < 0,001 ***
Années (écologiques)	10,30 (0,38)	11,84 (0,25)	1,54
Étés	13,83 (0,38)	15,78 (0,40)	1,95
Hivers	6,77 (0,40)	7,89 (0,16)	1,12
<b>Bourg St-Maurice (865 m)</b>			
Années (légales)	8,90 (0,44)	10,18 (0,47)	1,28 (0,14) t = 9,22 ; p < 0,001 ***
Années (écologiques)	8,91 (0,27)	10,21 (0,23)	1,30
Étés	12,55 (0,29)	14,34 (0,34)	1,79
Hivers	5,27 (0,26)	6,07 (0,20)	0,81
<b>Avrieux (1102 m)</b>			
Années (légales)	7,49 (0,38)	8,32 (0,40)	0,83 (0,12) t = 6,74 ; p < 0,001 ***
Années (écologiques)	7,48 (0,16)	8,30 (0,16)	0,82
Étés	11,10 (0,18)	12,42 (0,30)	1,32
Hivers	3,86 (0,19)	4,17 (0,09)	0,31
<b>Pralognan (1420 m)</b>			
Années (légales)	5,35 (0,50)	5,78 (0,80)	0,43 (0,21) t = 2,04 ; p = 0,023 *
Années (écologiques)	5,33 (0,21)	5,79 (0,61)	0,46
Étés	8,42 (0,18)	9,54 (0,69)	1,12
Hivers	2,24 (0,26)	2,03 (0,61)	- 0,21
<b>Mont-Cenis (2 000 m)</b>			
Années (légales)	2,51 (1,17)	3,12 (0,56)	0,61 (0,31) t = 1,98 ; p = 0,036 *
Années (écologiques)	2,42 (0,34)	3,09 (0,37)	0,67
Étés	5,11 (0,70)	6,16 (0,31)	1,05
Hivers	0,27 (0,23)	0,02 (0,46)	0,29
Températures moyennes et (écarts-types) en °C			

Tableau VI. Différentiel thermique observé en Vanoise (et en Dombes) entre les deux périodes 1971-1987 et 1988-2007

PARC NATIONAL DE LA VANOISE

<b>Dombes</b>				Étés	Hivers	Années
1964-1970	13,59 (0,46)	6,45 (0,44)	10,02 (0,32)			
1971-1976	13,59 (0,44)	6,45 (0,62)	10,02 (6,45)			
1977-1982	13,74 (0,73)	6,91 (0,85)	10,33 (0,76)			
1983-1988	14,38 (0,77)	7,27 (1,20)	10,83 (0,82)			
-----				1,95°C	1,12°C	1,54°C
1989-1994	15,73 (0,41)	7,71 (0,88)	11,72 (0,64)	t = 6,59	t = 5,08	t = 6,45
1995-2000	15,41 (0,61)	7,92 (1,00)	11,67 (0,75)	p < 0,001	p = 0,002	p < 0,001
2001-2007	16,20 (1,03)	8,03 (0,95)	12,12 (0,64)	***	**	***
<b>Bourg-Saint-Maurice</b>				Étés	Hivers	Années
1965-1970	12,28 (0,64)	5,06 (0,29)	8,67 (0,23)			
1971-1976	12,78 (0,44)	5,28 (0,48)	9,03 (0,27)			
1977-1982	12,33 (0,69)	5,07 (0,72)	8,70 (0,64)			
1983-1988	12,82 (0,71)	5,61 (0,92)	9,22 (0,62)			
-----				1,79°C	0,81°C	1,30°C
1989-1994	14,20 (0,34)	5,85 (0,76)	10,03 (0,44)	t = 7,39	t = 4,78	t = 6,94
1995-2000	14,10 (0,52)	6,16 (1,00)	10,13 (0,49)	p < 0,001	p = 0,003	p < 0,001
2001-2007	14,73 (0,95)	6,21 (1,03)	10,47 (0,67)	***	**	***
<b>Avrieux</b>				Étés	Hivers	Années
1967-1970	11,04 (0,78)	3,66 (0,42)	7,35 (0,41)			
1971-1976	11,29 (0,32)	3,87 (0,48)	7,59 (0,27)			
1977-1982	10,89 (0,47)	3,78 (0,62)	7,34 (0,51)			
1983-1988	11,19 (0,64)	4,11 (0,86)	7,65 (0,54)			
-----				1,32°C	0,31°C	0,82°C
1989-1994	12,44 (0,32)	4,28 (0,67)	8,36 (0,39)	t = 6,89	t = 2,91	t = 6,64
1995-2000	12,12 (0,47)	4,11 (1,05)	8,12 (0,50)	p < 0,001	p = 0,017	p < 0,001
2001-2007	12,71 (0,72)	4,13 (0,93)	8,43 (0,48)	***	*	***
<b>Pralognan</b>				Étés	Hivers	Années
1967-1970	8,40 (0,49)	2,05 (0,43)	5,23 (0,33)			
1971-1976	8,50 (0,45)	2,22 (0,76)	5,36 (0,38)			
1977-1982	8,17 (0,79)	2,07 (0,80)	5,12 (0,74)			
1983-1988	8,59 (0,75)	2,61 (0,80)	5,60 (0,54)			
-----				1,12°C	- 0,21°C	0,46°C
1989-1994	10,11 (0,46)	2,73 (1,09)	6,43 (0,39)	t = 2,77	t = 0,55	t = 1,26
1995-2000	8,78 (0,85)	1,64 (0,63)	5,21 (0,69)	p = 0,020	p = 0,303	p = 0,132
2001-2007	9,73 (0,98)	1,72 (1,47)	5,73 (0,94)	*	NS	NS
<b>Mont-Cenis</b>				Étés	Hivers	Années
1971-1976	5,89 (0,93)	0,39 (1,57)	2,75 (1,06)			
1977-1982	4,56 (1,36)	0,41 (2,01)	2,08 (1,39)			
1983-1988	4,87 (0,64)	0,00 (0,87)	2,43 (0,71)			
-----				1,05°C	0,29°C	0,67°C
1989-1994	6,34 (0,63)	0,43 (1,14)	3,38 (0,64)	t = 2,41	t = 0,98	t = 2,32
1995-2000	5,81 (0,14)	0,47 (0,71)	2,67 (0,35)	p = 0,037	p = 0,192	p = 0,040
2001-2007	6,34 (0,91)	0,11 (1,38)	3,23 (0,84)	*	NS	*

Températures moyennes (écart-types) en °C

Différences entre les deux sous-périodes consécutives

Tableau VII. Moyennes thermiques en Vanoise (et en Dombes), exprimées par sous-périodes de 6 ans (de 4 à 7 ans dans certaines stations).



<b>Dombes</b>	<b>1964-1987</b>	<b>1988-2007</b>	<b>différence</b>	<b>test t (risque p)</b>
janvier	1,55 (2,23)	3,32 (1,79)	1,76 (0,61)	2,91 (0,3 %) **
février	3,33 (2,17)	4,57 (2,37)	1,24 (0,69)	1,79 (3,8 %) *
mars	5,96 (1,57)	8,14 (1,54)	2,18 (0,47)	4,63 (0,0 %) ***
avril	9,08 (1,35)	10,64 (1,29)	1,55 (0,40)	3,89 (0,0 %) ***
mai	13,17 (1,08)	15,53 (1,29)	2,35 (0,36)	6,49 (0,0 %) ***
juin	16,73 (2,00)	18,73 (1,79)	2,00 (0,48)	4,17 (0,0 %) ***
juillet	19,22 (1,61)	20,83 (1,47)	1,61 (0,47)	3,39 (0,1 %) ***
août	18,36 (1,15)	20,78 (1,64)	2,42 (0,44)	5,55 (0,0 %) ***
septembre	15,57 (1,71)	16,54 (1,70)	0,97 (0,52)	1,87 (3,2 %) *
octobre	11,21 (1,86)	12,81 (1,94)	1,60 (0,58)	2,78 (0,4 %) **
novembre	5,73 (1,44)	6,56 (1,93)	0,83 (0,52)	1,58 (5,9 %) (*)
décembre	2,54 (1,97)	3,58 (1,90)	1,04 (0,58)	1,78 (4,0 %) *
<i>année</i>	10,25 (0,50)	11,87 (0,54)	1,62 (0,16)	10,29 (0,0 %) ***
<b>Bourg-Saint-Maurice</b>	<b>1964-1987</b>	<b>1988-2007</b>	<b>différence</b>	<b>test t (risque p)</b>
janvier	-0,38 (1,97)	1,34 (1,67)	1,72 (0,55)	3,13 (0,2 %) **
février	1,45 (2,56)	2,51 (2,19)	1,05 (0,67)	1,56 (6,1 %) (*)
mars	4,39 (1,69)	6,58 (1,80)	2,19 (0,53)	4,14 (0,01 %) ***
avril	7,88 (1,50)	9,30 (1,60)	1,42 (0,47)	3,01 (0,22 %) **
mai	12,05 (1,21)	14,25 (1,25)	2,19 (0,37)	5,89 (0,00 %) ***
juin	15,50 (1,22)	17,24 (1,82)	1,74 (0,48)	3,64 (0,04 %) ***
juillet	18,15 (1,58)	19,39 (1,47)	1,24 (0,46)	2,69 (0,50 %) **
août	17,40 (1,13)	19,16 (1,48)	1,76 (0,40)	4,38 (0,01 %) ***
septembre	14,71 (1,46)	15,11 (1,57)	0,40 (0,46)	0,86 (19,88 %) NS
octobre	10,19 (1,88)	11,08 (1,74)	0,89 (0,55)	1,63 (5,36 %) (*)
novembre	4,35 (1,56)	4,92 (1,61)	0,57 (0,48)	1,18 (12,20 %) NS
décembre	0,62 (1,86)	1,41 (1,84)	0,79 (0,56)	1,41 (8,18 %) (*)
<i>année</i>	8,90 (0,44)	10,18 (0,47)	1,28 (0,14)	9,22 (0,0 %) ***
<b>Avrieux</b>	<b>1967-1987</b>	<b>1988-2007</b>	<b>différence</b>	<b>test t (risque p)</b>
janvier	-1,51 (1,97)	-0,73 (1,72)	0,78 (0,58)	1,36 (8,90 %) (*)
février	-0,20 (2,06)	0,61 (2,32)	0,81 (0,69)	1,18 (12,23 %) NS
mars	2,80 (1,87)	4,60 (1,69)	1,80 (0,56)	3,24 (0,13 %) **
avril	6,24 (1,37)	7,11 (1,47)	0,86 (0,45)	1,94 (2,86 %) *
mai	10,44 (1,25)	12,23 (1,18)	1,78 (0,38)	4,70 (0,00 %) ***
juin	13,98 (1,08)	15,38 (1,50)	1,39 (0,41)	3,40 (0,08 %) ***
juillet	16,85 (1,32)	17,65 (1,36)	0,80 (0,42)	1,91 (3,02 %) *
août	16,16 (1,30)	17,48 (1,53)	1,32 (0,44)	2,97 (0,26 %) **
septembre	13,48 (1,43)	13,31 (1,47)	-0,17 (0,45)	0,38 (35,46 %) NS
octobre	9,00 (1,88)	9,46 (1,82)	0,46 (0,58)	0,80 (21,82 %) NS
novembre	3,08 (1,55)	3,14 (1,50)	0,06 (0,48)	0,12 (44,90 %) NS
décembre	-0,91 (1,69)	-0,78 (1,88)	0,13 (0,56)	0,24 (40,34 %) NS
<i>année</i>	7,49 (0,38)	8,32 (0,40)	0,83 (0,12)	6,74 (0,0 %) ***

Tableau VIII. Évolution thermique mensuelle comparée en Vanoise (et en Dombes) entre les deux périodes 1971-1987 et 1988-2007 (voir fin du tableau page suivante).

PARC NATIONAL DE LA VANOISE

<b>Pralognan</b>	<b>1967-1987</b>	<b>1988-2007</b>	<b>différence</b>	<b>test t (risque p)</b>
janvier	-2,91 (1,99)	-2,50 (2,15)	0,41 (0,65)	0,64 (26,67 %) NS
février	-1,90 (2,45)	-1,85 (2,58)	0,05 (0,76)	0,07 (47,29 %) NS
mars	0,18 (1,84)	1,53 (1,98)	1,34 (0,60)	2,25 (1,42 %) *
avril	3,70 (1,46)	4,29 (1,59)	0,59 (0,48)	1,23 (11,24 %) NS
mai	7,92 (1,41)	9,41 (1,53)	1,48 (0,46)	3,23 (0,13 %) **
juin	11,18 (1,23)	12,44 (1,80)	1,26 (0,48)	2,60 (0,63 %) **
juillet	14,04 (1,53)	14,74 (1,77)	0,70 (0,52)	1,35 (9,14 %) (*)
août	13,43 (1,08)	14,64 (1,69)	1,21 (0,44)	2,71 (0,48 %) **
septembre	11,09 (1,54)	10,46 (1,95)	-0,63 (0,55)	1,14 (12,93 %) NS
octobre	7,28 (1,97)	6,99 (1,88)	-0,29 (0,60)	0,48 (31,80 %) NS
novembre	1,71 (1,74)	0,97 (1,91)	-0,74 (0,57)	1,30 (9,98 %) (*)
décembre	-1,95 (2,00)	-2,30 (1,97)	-0,35 (0,62)	0,56 (29,28 %) NS
<i>année</i>	5,35 (0,50)	5,78 (0,80)	0,43 (0,21)	2,04 (2,3 %) *
<b>Mont-Cenis</b>	<b>1971-1987</b>	<b>1988-2007</b>	<b>différence</b>	<b>test t (risque p)</b>
janvier	5,19 (2,90)	-3,47 (1,93)	1,72 (0,82)	2,08 (2,11 %) *
février	-4,64 (2,35)	-3,87 (2,79)	0,77 (0,85)	0,90 (18,77 %) NS
mars	-3,01 (2,32)	-1,64 (1,84)	1,37 (0,70)	1,96 (2,78 %) *
avril	-0,35 (1,86)	0,19 (1,59)	0,54 (0,57)	0,94 (17,89 %) NS
mai	4,02 (1,74)	5,38 (1,70)	1,35 (0,57)	2,38 (1,10 %) *
juin	8,26 (1,29)	9,20 (1,61)	0,94 (0,48)	1,96 (2,78 %) *
juillet	11,33 (1,62)	11,67 (1,29)	0,34 (0,49)	0,70 (24,84 %) NS
août	10,33 (2,13)	11,76 (1,60)	1,43 (0,63)	2,27 (1,40 %) *
septembre	7,81 (2,56)	7,51 (1,67)	-0,31 (0,72)	0,43 (33,89 %) NS
octobre	3,63 (1,63)	4,13 (1,84)	0,50 (0,37)	0,87 (19,75 %) NS
novembre	-0,71 (2,00)	-0,85 (1,94)	-0,14 (0,65)	0,21 (41,33 %) NS
décembre	-3,18 (1,91)	-3,24 (1,47)	-0,06 (0,57)	0,10 (45,77 %) NS
<i>année</i>	2,51 (1,17)	3,12 (0,56)	0,61 (0,31)	1,98 (2,7 %) *

Tableau VIII. Évolution thermique mensuelle comparée en Vanoise (et en Dombes) entre les deux périodes 1971-1987 et 1988-2007 (*suite et fin*).



## BIBLIOGRAPHIE

- ALLAINÉ (D.), RODRIGUE (I.), LE BERRE (M.), RAMOUSSE (R.), 1994. Habitat preferences in Alpine marmots (*Marmota marmota*). *Can. J. Zool.*, 72 : 2193-2198.
- ALLAINE (D.), BRONDEX (F.), GRAZIANI (L.), COULON (J.) et TILL BOTTRAUD (I.), 2000. Male-biased sex ratio in litters of alpine marmots supports the helper repayment hypothesis. *Behavioral Ecology*, 11 : 507-514.
- ALLAINE (D.) et THEURIAU (F.), 2004. Is there an optimal number of helpers in alpine marmot family groups ? *Behavioral Ecology*, 15 : 916-924.
- ANEM (Association nationale des élus de la montagne), 2007. Au-delà du changement climatique, les défis de l'avenir de la montagne. *Rapport 23ème Congrès ANEM*, 25 oct. 2007, 102 p.
- BARTOLI (Ch.), 1966. Études écologiques sur les Associations forestières de la Haute-Maurienne. *Ann. Sci. forest.*, XXIII, fasc. 3 : 1-321.
- BLANCHET (G.) et RICHOUX (Ph.), 1999. Quelques aspects du climat de la région Rhône-Alpes. *Bull. mens. Soc. Linn. Lyon*, 68 : 305-320.
- CHASSAGNEUX (P.), DEBLAERE (J.-C.) et THEBAULT (E.), 1992. *Atlas Agroclimatique Rhône-Alpes*. Paris : Direction de la Météorologie nationale. 88 p.
- CHOQUET (R.), REBOULET (A.), PRADEL (R.), GIMENEZ (O.) et LEBRETON (J.), 2004. M-SURGE : new software specifically designed for multistate capture-recapture models. *Animal Biodiversity and Conservation*, 27 : 207-215.
- CONVENTION ALPINE, 2006. *Changement du climat dans l'espace alpin : effets et défis*. C.R. Manifest. thémat., Vienne, Autriche : Galtür, Minist. Vie, 2006, 46 p.
- FARAND (E.), ALLAINÉ (D.) et COULON (J.), 2002. Variation in survival rates for the alpine marmot (*Marmota marmota*): effects of sex, age, year, and climatic factors. *Canadian Journal of Zoology*, 80 : 342-349.
- FOURNIER (J.), 1985. Contribution à l'étude des Alpes intermédiaires françaises : la moyenne-Maurienne : bioclimatologie, groupements végétaux forestiers et impacts humains. Thèse 3ème Cycle : écologie appliquée : Grenoble 1 : 1985, p.15-52.
- GARRAUD (L.), LEBRETON (Ph.) et GENIS J.-M. (2009). Biogéographie et écologie comparées du Génévrier thurifère dans les Alpes françaises. *Bull. mens. Soc. Linn. Lyon*, 78 : 111-117.
- GENSAC (P.), 1967. Les forêts d'Épicéa de Tarentaise. Recherche des différents types de Pessières. *Rev. gén. Bot.*, 74 : 425-528.
- GENSAC (P.), 1978. Observations thermométriques de 1973 à 1976 dans le Parc national de la Vanoise. Conséquences biologiques. *Trav. sci. Parc natl. Vanoise*, IX : 9-24.
- GUILLON (A.) et DEHNARD (B.), 2007. Changement climatique. Quel avenir ? *Isère-Nature* (FRAPNA-Isère), dossier mars / avril 2007, n°278, 12 p.
- GURREY (B.), 2007. Les scientifiques entérinent la responsabilité de l'homme dans le réchauffement climatique. *Le Monde* 2, n°19293, p.8 (4ème rapport du GIEC, Paris, février 2007).
- JOHNSON (J. B.) et OMLAND (K.S.), 2004. Model selection in ecology and evolution. *Trends in Ecology and Evolution*, 19 : 101-108.
- KAISER (B.), 1983. Morphodynamique périglaciaire en Vanoise : observations et mesures sur deux formes majeures ; talus d'éboulis et glacier-rocheux. *Trav. sci. Parc natl. Vanoise*, XIII : 55-80.
- LEBRETON (Ph.), 2007. Le réchauffement climatique : de Genève à Pralognan (conférence. 30 janvier 2007). *Mém. Acad. Lyon*, 4ème série, Tome 7 : 131-139.
- LEBRETON (J.D.), BURNHAM (K.P.), CLOBERT (J.) and ANDERSON (D.R.), 1992. Modeling survival and testing biological hypotheses using marked animals : a unified approach with case studies. *Ecological Monographs*, 62 : 67-118.
- LEBRETON (Ph.) et al., 2000. Approche écologique de l'Avifaune de Vanoise. *Trav. sci. Parc natl. Vanoise*, XXI, 304 p. (paragraphe 2.2. « Climatologie », p.30-51).
- LEBRETON (Ph.) et CHOISY (J.-P.), 2000. Déprise rurale et évolution avifaunistique. *Le Bièvre* (C.O.R.A.), 17 : 25-34.
- LLIBOUTRY (L.), 1976. Les glaciers de Bellecôte. *Trav. sci. Parc natl. Vanoise.*, VII : 9-24.
- MARTIN (S.) et PELTIER (J.-P.), 1986. Séquences de jours secs consécutifs en Maurienne (Alpes françaises). *Trav. sci. Parc natl. Vanoise*, XV : 9-30.
- MARTINOT (J.-P.) et LEBRETON (Ph.), 2006. Sur la séparation des niches écologiques chez les Galliformes de montagne en Vanoise. *Trav. sci. Parc natl. Vanoise*, XXIII : 119-145.
- NAVARRÉ (J.-P.), 2006. Climatologie des situations nivo-météorologiques associées aux périodes avalanches importantes de ces 45 dernières années en Isère. Rapport de Synthèse Météo-France / CRRM/CEN et CEMAGREF-ETNA. Doc. multicop. nov. 2006, 22 p.

- OZENDA (P.), 1994. *Végétation du continent européen*. Lausanne ; Paris : Delachaux et Niestlé, 271 p.
- OZENDA (P.), 2002. *Perspectives pour une géobiologie des montagnes*. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 195 p.
- PEGUY (Ch.-P.), 1973. Étude sur la variabilité des précipitations du semestre froid en Vanoise. *Trav. sci. Parc natl. Vanoise*, III : 41-61.
- PEGUY (Ch.-P.), 1974. Étude sur la variabilité de l'enneigement en Vanoise. *Trav. sci. Parc natl. Vanoise*, V : 41-55.
- PEGUY (Ch.-P.), 1975. Quelques aspects peu connus de la pluviométrie en Tarentaise. *Trav. sci. Parc natl. Vanoise.*, VI : 9-25.
- REPUBLIQUE FRANCAISE, 2006. Décret n°2006-116 du 31 janvier 2006 portant publication du protocole d'application de la Convention alpine de 1991 dans le domaine des "Forêts de montagne". Journal Officiel, 7 février 2006, n°32, 10 p.
- REYNAUD (L.), VALLON (E.) et CARLE (Ch.), 1983. Analyse et synthèse des mesures glaciologiques effectuées sur le glacier de Gébroulaz, massif de la Vanoise, France. *Trav. sci. Parc natl. Vanoise*, XIII : 9-29.
- REYNAUD (L.), VINCENT (Chr.) et VALLON (M.), 1997. Mesures récentes effectuées sur le glacier de Gébroulaz (Massif de la Vanoise, France), depuis 1978, par le Laboratoire de glaciologie du C.N.R.S. concernant les variations d'altitude, de vitesse, de bilan de masse et la mise en place d'un réseau de repères topographiques pour l'utilisation de la photogrammétrie aérienne. *Trav. sci. Parc natl. Vanoise*, XX : 83-109.
- RICHARD (L.), PELTIER (J.-P.) et ASTA (J.), 1996. Livret-guide de l'excursion Alpes nord-occidentales françaises, Colloque "Végétation et sols de montagne. Diversité, fonctionnement et évolution", 51 p. + cartes.
- RICHOUX (Ph.) et LEBRETON (Ph.), 2008. L'évolution climatique et son impact en Dombes. *Cahiers Fondation Pierre Vérots*, n°1 : 1-12.
- VALLON (M.), VINCENT (C.) et REYNAUD (L.), 1995. Sensibilité des bilans de masses glaciaires aux fluctuations climatiques. *Houille Blanche*, n° 5/6 : 167-174.
- VINCENT (C.), Kappenberger (G.), Valla (F.), Bauder (A.), Funk (M.) and Le Meur (E.), 2004. Ice ablation as evidence of climate change in the Alps over the 20th Century. *Journal of Geophysical Research*, vol.109, D10104.
- VINCENT (C.) et BLANC (R.), 2006. Évolution du glacier de Gébroulaz (Vanoise) au cours des 100 dernières années. *Trav. sci. Parc natl. Vanoise*, XXIII : 49-64.
- VOIRON (H.), 1983. Les régimes nivométriques de la Vanoise. *Trav. sci. Parc natl. Vanoise*, XIII : 81-100.
- VOUILLON (Ph.), 2008. Coup de chaud sur la Vanoise. *Vanoise*, n°9 : 2-3.

Rédaction au 1er février 2009

#### Liste des membres du "Groupe Climat" du Parc national de la Vanoise (au 1er janvier 2008)

- Mme Anne DELESTRADE, "Phénoclim", C.R.E.A. (Centre de recherches sur les écosystèmes d'altitude). Observatoire du Mont-Blanc, 74400 Chamonix Mont-Blanc.
- M. Michaël DELORME, cellule "Patrimoine naturel", Parc national de la Vanoise. 135 rue Docteur Julliard, 73000 Chambéry.
- M. Philippe LEBRETON, Conseil scientifique du Parc national de la Vanoise. Ancien enseignant-chercheur à l'Université Lyon I. 56 chemin du Lavoisier, 01700 Beynost.
- M. Jean-Pierre MARTINOT, cellule "Patrimoine naturel", Parc national de la Vanoise. 135 rue Docteur Julliard, 73000 Chambéry.
- M. Gérard NICOU, Conseil scientifique du Parc national de la Vanoise. Ancien enseignant-chercheur à l'Université de Savoie. Laboratoire Edytem.
- M. Jean-Paul PELTIER, ancien enseignant-chercheur du Centre de biologie alpine de l'Université Joseph Fourier, Grenoble. 6 place de la Commune, 38130 Echirolles.
- Mme Véronique PLAIGE, cellule "Patrimoine naturel", Parc national de la Vanoise. 135 rue Docteur Julliard, 73000 Chambéry.
- M. Louis-Etienne REYNAUD, Conseil scientifique du Parc national de la Vanoise. Ancien enseignant-chercheur du Laboratoire de glaciologie de l'Université Joseph Fourier, Grenoble. Les Chaumines, 38320 Herbeys.
- M. Philippe YVERANDE, Directeur du centre départemental de Météo-France.



## APPLICATION DE LA TECHNOLOGIE GPS AU SUIVI DU DÉPLACEMENT DE BOUQUETINS DES ALPES (*CAPRA IBEX IBEX*, L.) DANS LES PARCS NATIONAUX DE LA VANOISE ET DU GRAN PARADISO (ITALIE)

par Irène Girard<sup>1</sup>, Christophe Adrados<sup>2</sup>, Bruno Bassano<sup>3</sup> et Georges Janeau<sup>2</sup>

**Résumé.** Le Global Positioning System (GPS) permet un enregistrement automatique de la position des animaux selon un programme prédéfini. Il a été utilisé, après des tests préalables concernant son fonctionnement en haute montagne, afin de suivre le déplacement de bouquetins des Alpes dans les Parcs nationaux de la Vanoise (France) et du Gran Paradiso (Italie) et de caractériser certains paramètres de leur habitat (pente, altitude, exposition). Entre mai 2003 et mai 2004, 12 mâles et 7 femelles ont été suivis et 26 889 localisations ont été enregistrées. Ces données ont montré une grande variabilité des déplacements individuels. Tous les mâles ainsi que 2 des 7 femelles ont occupé un domaine vital annuel scindé en au moins 2 zones distinctes. La superficie des domaines vitaux globaux était comprise entre 125,2 et 620,4 ha. (en excluant les trajets de liaison), les mâles utilisant une superficie supérieure à celle des femelles. L'évaluation de la taille des domaines mensuels ainsi que de la distance les séparant a permis de préciser ces différentes stratégies d'occupation spatiale. Les déplacements des individus au cours du cycle journalier ont également été analysés. En été (juin à août), 2 importants pics de déplacement des animaux sont apparus (entre 03 h et 06 h voire 09 h puis entre 15 h et 18 h voire 21 h), tandis qu'aucun pic n'était visible en période hivernale (décembre à mars). L'analyse des paramètres de l'habitat a montré des différences selon le sexe. Les femelles ont utilisé préférentiellement des altitudes comprises entre 2 400 et 2 700 m, des pentes de 33° à 45 ° et des orientations S, SE et SO. Les mâles ont été localisés à des altitudes comprises entre 2 300 et 2 800 m, sur des pentes de 26° à 39° et des expositions S, SE et SO. Cependant, outre ces grandes tendances, des variations en fonction des mois ont été mises en évidence pour les 2 sexes.

L'utilisation de colliers GPS, permettant de s'affranchir des contraintes liées au suivi visuel ou au radiopistage, s'avère particulièrement adaptée pour les études portant sur le comportement spatial des animaux. Toutefois, certains paramètres explicatifs (organisation sociale de l'espèce, interactions avec d'autres espèces, impact des activités humaines, facteurs climatologiques) doivent pouvoir être évalués en complément afin de préciser les résultats.

**Mots-clés :** Bouquetin des Alpes - *Capra ibex ibex*, L. - GPS - Occupation spatiale - Utilisation de l'habitat.

### Use of the GPS technology to monitor the movement of Alpine ibex (*Capra ibex ibex* L.) in the Vanoise and Gran Paradiso National Parks

**Abstract.** Global Positioning System (GPS) allows an automatic recording of animals position according to a preprogrammed schedule. Preliminary tests were performed in order to assess its performances in high mountain areas. It was, then, used to follow Alpine ibex movements in the Vanoise (France) and the Gran Paradiso (Italy) National Parks and to characterized some of their habitat parameters (slope, height, exposure). From May 2003 to May 2004, 12 males and 7 females were studied and 26 889 locations were recorded. These data showed an important variability of individual movements. All the males as well as 2 of 7 females occupied an annual vital range split into at least 2 different zones. The vital ranges areas were included from 125,2 to 620,4 ha (by excluding connection routes). Males used greater areas than those used by the females.

The evaluation of monthly ranges size as well as the distance separating them allowed to clarify the various animals space use strategies. Individuals movements during the daily cycle were analyzed, also. Two main peaks of animals movements appeared during summer time (in July and in August), between

<sup>1</sup> Parc national de la Vanoise, BP 705, 73007 Chambéry cedex, France.

<sup>2</sup> CEFS, Institut national de la recherche agronomique, BP 27, 31326 Castanet-Tolosan cedex, France.

<sup>3</sup> Parc national Gran Paradiso, Via della Rocca, 47, 10123 Torino, Italie.



3 a.m and 6 a.m even 9 a.m and between 3 p.m and 6 p.m even 9 p.m. No peak was visible in wintry period (from December to March). The analysis of habitat parameters showed differences according to the sex. Females preferentially used heights included from 2 400 to 2 700 m, slopes from 33° to 45° and South and South-West exposures. Males were located from 2 300 to 2 800 m, on slopes from 26° to 39° and used South and South-West exposures. Besides these main tendencies, monthly variations occurred for the two sexes.

The use of GPS collars is useful to by-pass the constraints linked to the visual follow-up or to the radio-tracking. It appears particularly suitable to studies concerning animals spatial behavior. However, other explaining parameters (such as populations social organization, interactions with other species, the impact of human activities, climatological factors, ...) have to be estimated in order to complement these results.

**Key-words :** Alpine ibex - *Capra ibex ibex* L. – GPS - space use - habitat use.

## INTRODUCTION

L'observation directe a toujours constitué la méthodologie privilégiée pour l'étude de la faune sauvage et en particulier du bouquetin des Alpes (*Capra ibex ibex* L.). Mais ce mode de suivi possède de nombreuses limites : nuit, accessibilité du terrain, conditions météorologiques, déplacement rapide des animaux, ...). La localisation des animaux à partir de colliers radio-émetteurs (VHF), utilisés depuis le milieu des années 1960 (COCHRAN et LORD, 1963), a permis de réaliser de nombreux progrès dans la connaissance de l'occupation de l'espace par la faune sauvage mais cette technique a aussi ses limites en haute montagne (accessibilité réduite, conditions météorologiques souvent difficiles, localisation des individus en haute altitude, phénomènes d'échos, ...). Les premières utilisations des satellites pour suivre des individus marqués étaient basées sur le système Argos. Cependant, le degré d'exactitude des localisations obtenues par ce dernier (plusieurs centaines de mètres) s'est avéré limitant pour les études fines d'utilisation de l'habitat et de l'espace, en particulier pour les espèces ne présentant pas de grandes distances de déplacement au cours de leur cycle annuel. Le Global Positioning System (GPS), utilisé pour localiser les animaux sauvages, s'est développé à partir du milieu des années 1990 (RODGERS et ANSON, 1994). Cette technique efficace permet de localiser très régulièrement (voire en continu) les animaux et d'obtenir, indépendamment des conditions environnementales et météorologiques, des localisations fiables (et dont l'imprécision peut être évaluée). La technologie GPS utilise un système de localisation basé sur la réception de signaux provenant de plusieurs satellites et permet un enregistrement automatique de la position des animaux à tout instant, selon un calendrier prédéfini, avec une précision de quelques mètres (MOEN *et al.*, 1997 ; DUSSAULT *et al.*, 2001 ; ADRADOS *et al.*, 2002). Elle s'avère très adaptée pour les études nécessitant un grand nombre de données et une collecte régulière et indépendante de toute contrainte extérieure. Elle est, également, particulièrement intéressante en milieu de haute montagne (JANEAU, 2002), du fait des contraintes particulières de suivi et malgré la présence d'obstacles naturels (falaises).

Ainsi, après avoir validé expérimentalement son fonctionnement dans ces conditions particulières (GIRARD *et al.*, 2002), cette technologie a été utilisée dans le cadre du suivi réalisé sur le bouquetin des Alpes. En effet, la gestion et la protection de cette espèce, protégée en France et en Italie, ainsi que de son habitat, constituent un enjeu majeur pour les Parcs nationaux de la Vanoise et du Gran Paradiso (Italie), initialement créés pour sa sauvegarde. Pour ce faire, une bonne connaissance des modalités de déplacement des individus ainsi que des caractéristiques des milieux fréquentés par l'espèce au cours de l'année est primordiale pour l'établissement de mesures appropriées de conservation de l'habitat propice à son développement, qui reste encore à présent très éloigné de l'aire de répartition initiale de l'espèce (WEBER, 1994). Par ailleurs, les déplacements transfrontaliers d'une partie de la population de



bouquetins des Alpes entre l'extrémité Est du Parc national de la Vanoise et celle contiguë située à l'Ouest du Parc national du Gran Paradiso soulignent la nécessité d'un ajustement des consignes de gestion entre ces deux espaces protégés. De façon à mieux connaître la localisation géographique des quartiers saisonniers utilisés par les animaux ainsi que leur mode d'utilisation de l'habitat, qui constituent un préalable à l'étude des facteurs susceptibles d'affecter la disponibilité du milieu pour l'espèce (activités touristiques ou pastorales, projets d'aménagement), un marquage d'individus par GPS a été réalisé, dans le cadre d'un programme transfrontalier Vanoise – Gran Paradiso financé par l'Union Européenne (Interreg IIIA).

## I. LA TECHNOLOGIE GPS

### I.1. Principe

Elle est basée sur le principe de la triangulation, à partir d'une constellation de 24 satellites qui évoluent à plus de 20 000 km au-dessus de la Terre, et qui émettent en permanence des signaux. La combinaison de ces signaux permet à des récepteurs GPS situés à terre, de calculer leur position géographique à tout instant, à condition que les signaux d'au moins 3 satellites (pour une localisation en 2 dimensions [2D] : latitude et longitude) ou 4 satellites (pour une localisation en 3 dimensions [3D] : latitude, longitude et altitude) soient perçus simultanément. L'exactitude des localisations obtenues dépend donc du nombre de satellites visibles (théoriquement au minimum de 4 sur 99,6 % de la surface terrestre) et de leur configuration (hauteur angulaire sur l'horizon et position des uns par rapport aux autres). Des obstacles situés entre le satellite et l'antenne du GPS peuvent faire écran à la propagation des signaux, entraînant un phénomène d'obstruction. Ces obstacles peuvent être dus à la végétation (REMPEL *et al.*, 1995 ; EDENIUS, 1997 ; DUSSAULT *et al.*, 1999 ; JANEAU *et al.*, 1998, 2001, 2004) ainsi qu'à des obstacles naturels liés à la topographie. C'est pourquoi, dans notre cas, préalablement à la pose des colliers sur les animaux, l'incidence des masques naturels (falaises rocheuses essentiellement) sur la réception des signaux émis par les satellites a été étudiée (GIRARD *et al.*, 2002). D'autres paramètres (propagation des ondes électromagnétiques au travers des différentes couches de l'atmosphère, erreurs des horloges des satellites ou des éphémérides) peuvent occasionner des imprécisions, dont l'ampleur peut, toutefois, être considérée comme peu importante dans les conditions dans lesquelles nous avons travaillé.

### I.2. Performance des colliers GPS en milieu de haute montagne<sup>4</sup>

L'effet de la topographie a été testé en effectuant des mesures simultanées en pied et haut de falaises, pour les 4 orientations principales (E, O, N et S), ainsi qu'en fond de vallée (orientées N-S et E-O). La Réserve naturelle de la Grande Sassièrè, fréquentée par une partie de la population transfrontalière de bouquetins, a constitué le support de ces mesures. Deux types de colliers ont été utilisés : 3 colliers de la firme Lotek (Lotek Wireless Inc., Canada) et 3 colliers de la firme Télévilt (TVP Positioning AB, Suède). Tous comportaient 8 canaux de réception des signaux satellites. Pour chaque position topographique, 30 enregistrements théoriques ont été programmés avec une fréquence d'un point toutes les 5 minutes. Les enregistrements ont été effectués, pour une même orientation, de façon simultanée en pied et haut de falaise ainsi qu'en un point de référence situé en un lieu dégagé. Pour chaque position, l'importance des masques naturels a été calculée aux 4 points cardinaux, en mesurant le degré d'obstruction du milieu. L'effet des masques naturels sur le fonctionnement des colliers GPS a été évalué en calculant le pourcentage de localisations réussies (rapport entre le nombre de localisations enregistrées et

<sup>4</sup> cf. GIRARD *et al.* (2002) pour une description détaillée de cette étude.

celui de localisations attendues en fonction de la programmation initiale), ainsi qu'en différenciant les enregistrements en 2D et 3D.

Les tests ont montré une diminution du pourcentage de localisations réussies et de celles obtenues en 3D en bas de falaise, tandis que le collier utilisé au point de référence a enregistré 100% des localisations attendues, toutes en 3D. Par ailleurs, un effet de l'orientation des falaises a été constaté, avec une diminution du pourcentage de localisations réussies pour celles exposées au nord, et une augmentation du pourcentage de localisations en 3D pour celles exposées au sud. Ces tests ont mis en évidence la possibilité d'utiliser la localisation par GPS en milieu de haute montagne, malgré l'importance des masques naturels avec, toutefois, une diminution des performances en pied de falaise ainsi que pour celles exposées au nord (du fait de la configuration du réseau satellitaire).

Par ailleurs, nous avons, également, cherché à évaluer l'exactitude des localisations, afin de pouvoir apprécier les biais éventuels lors de l'analyse ultérieure (*cf.* ADRADOS *et al.*, 2002). Cette exactitude peut être déterminée par les paramètres fournis pour chaque enregistrement : statut de la localisation (2D ou 3D) ; valeurs de DOP<sup>5</sup>. Des enregistrements en continu (1 point / 5 minutes) ont été réalisés à l'aide de colliers placés en position fixe. Le barycentre des points (centre géométrique) pour lesquels l'exactitude était la meilleure (localisations en 3D avec une DOP < 5) a été estimé, et a servi de référence pour évaluer la dispersion moyenne des points. Le tableau I détaille les résultats.

Erreur de localisation (m)	2D		3D	
	DOP < 5 % (n=108)	DOP ≥ 5 % (n=29)	DOP < 5 % (n=151)	DOP ≥ 5 % (n=51)
0-5	25,9	3,4	38,4	25,5
5-10	49,1	3,4	62,3	58,8
10-15	76,9	17,2	87,4	82,4
15-20	80,6	27,6	90,1	88,2
20-30	94,4	55,2	100	98,0
30-40	97,2	86,2		98,0
40-50	97,2	93,1		100
50-100	99,1	100		
100-200	100			
<b>Moyenne (m)</b>	<b>13,1</b>	<b>27,9</b>	<b>8,8</b>	<b>10,1</b>
Écart-type	1,7	2,5	0,5	1,0
Maximum (m)	160,1	62,8	27,1	43,2

*n = nombre d'enregistrements*

Tableau I. Pourcentages cumulés des erreurs de localisation des enregistrements (distance par rapport au barycentre) réalisés en 2D et 3D avec une DOP < 5 ou ≥ 5.

Les résultats permettent d'évaluer l'erreur moyenne des localisations obtenues en 3D aux environs de 10 m, quelle que soit la valeur de la DOP, et entre 13 et 28 m pour celles obtenues en 2D, pour des valeurs respectives de DOP < 5 et ≥ 5. Ces valeurs s'avèrent compatibles avec la perspective d'analyses fines de l'utilisation de l'espace et de l'habitat pour le bouquetin des Alpes, au vu de l'ampleur des déplacements effectués par les animaux (plusieurs kilomètres en quelques heures lors des déplacements saisonniers), ainsi que des couvertures géographiques disponibles (basées pour la plupart sur une résolution de 50 m).

<sup>5</sup> DOP (*Dilution Of Precision*) : cette valeur permet d'évaluer la configuration des satellites entre eux, et donc le degré de précision des données.



## II. APPLICATION AU SUIVI DU DÉPLACEMENT DE BOUQUETINS DES ALPES

### II.1. Protocole

Dans le but de réaliser une typologie du déplacement des bouquetins au cours de l'année, ainsi que d'analyser certains paramètres physiques de l'habitat utilisés par les individus (pente, altitude, exposition), 23 animaux ont été équipés de colliers GPS (3300 S [Rév.2], Lotek Wireless Inc., Canada) en début d'été 2003. Une fréquence de 8 enregistrements par jour (1 toutes les 3 h) a été programmée. Au cours de l'été 2004, 19 colliers ont été récupérés, par le moyen d'un mécanisme d'ouverture à distance, ne nécessitant pas la re-capture des individus. Pour les 4 autres colliers, une défection du système de localisation par VHF, inclus dans le collier, n'a pas permis de les récupérer.

### II.2. Analyse des données

#### II.2.1. Traitement des données brutes

Au vu des résultats précédents et d'une série de tests préalables réalisés à partir de 2 colliers GPS en point fixe (6 552 localisations recueillies), seules les localisations en 2D ayant une DOP <10 et les localisations en 3D ayant une DOP <15 ont été conservées pour les analyses ultérieures, parmi l'ensemble des données recueillies. En point fixe, l'exactitude des localisations obtenues est alors inférieure en moyenne à 10,8 m et l'erreur moyenne de localisation pour les localisations les moins précises est de 19,2 m. À partir du pourcentage de données conservées, une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée en fonction des facteurs individu (aléatoire, imbriqué dans le facteur sexe), sexe et mois (facteurs pris isolément ou en interaction), afin d'évaluer leur influence sur le nombre de données conservées pour chaque individu.

#### II.2.2. Utilisation de l'espace

Les localisations des individus ont été cartographiées, afin de déterminer leur mode d'occupation du domaine vital au cours de l'année, c'est-à-dire les zones plus particulièrement utilisées en fonction des saisons, la distance entre elles ainsi que les périodes de déplacement.

##### II.2.2.1. Domaine vital

- La taille du domaine vital global (toutes localisations confondues) de chaque individu a été évaluée en appliquant une zone-tampon, de rayon équivalent à l'erreur de localisation (20 m) autour des trajectoires individuelles. Les trajets entre les différentes zones du domaine vital (discriminés visuellement à partir des trajectoires individuelles) ont été exclus du calcul afin d'éviter d'en augmenter artificiellement la valeur.
- Un domaine mensuel a été déterminé par la méthode des polygones convexes (MOHR, 1947 ; HAYNE, 1949), en utilisant l'ensemble des données disponibles. Il permet de mettre en évidence les périodes et l'ampleur des déplacements individuels. La taille de ces domaines a été comparée entre mâles et femelles à l'aide de tests U de Mann-Whitney (SCHERRER, 1984). La distance linéaire séparant le barycentre de chaque domaine mensuel successif a également été évaluée.

##### II.2.2.2. Distance par période horaire

Les distances linéaires séparant 2 localisations consécutives espacées de 3 heures ont été calculées afin d'évaluer si l'amplitude des déplacements variait au cours de la journée (bien que cette mesure discontinue ne reflète que très imparfaitement les déplacements réels des individus). Une ANOVA de ce paramètre a été réalisée en fonction des facteurs sexe, mois et période horaire (facteurs pris isolément ou en interaction).

Num	Sexe	Année de naissance	Age*	Lieu de capture**	Date de capture	Fin de suivi	Durée du suivi (j.)	Nb et taux (%) d'enregistrement	Nb de localisations conservées
405	F	2000	3	PNGP	03/06/03	20/02/04	262	1 501 (71,6)	953
409	F	2000	3	PNGP	27/05/03	01/03/04	279	1 542 (69,1)	1018
424	F	1997	6	PNV	13/07/03	08/05/04	299	1 655 (69,1)	1049
426	F	1995	8	PNV	11/06/03	12/04/04	306	1 602 (65,5)	1006
425	F	1993	10	PNV	13/06/03	13/05/04	335	2 040 (76,1)	1333
407	F	1991	12	PNGP	27/05/03	20/03/04	297	1 652 (69,4)	1241
411	F	1987	16	PNGP	06/06/03	01/03/04	270	1 416 (65,6)	962
422	M	2000	3	PNV	10/06/03	23/04/04	318	1 589 (62,5)	1116
416	M	1999	4	PNV	10/06/03	18/04/04	313	1 638 (65,3)	889
403	M	1997	6	PNGP	22/05/03	18/02/04	272	1 383 (63,5)	985
398	M	1996	7	PNGP	22/05/03	30/08/03	99	668 (83,5)	580
412	M	1996	7	PNV	10/06/03	14/11/03	156	973 (77,7)	650
415	M	1995	8	PNV	14/06/03	05/10/03	113	821 (90,9)	637
418	M	1994	9	PNV	20/06/03	16/05/04	331	2 019 (76,2)	1354
414	M	1993	10	PNV	18/06/03	16/05/04	332	2 071 (77,9)	1545
413	M	1993	10	PNV	14/06/03	07/03/04	277	2 138 (72,6)	1094
402	M	1992	11	PNGP	12/08/03	10/02/04	182	669 (45,8)	375
400	M	1991	12	PNGP	12/08/03	24/08/03	12	88 (91,7)	70
404	M	1990	13	PNGP	13/08/03	25/03/04	226	1 424 (78,9)	1087
<b>Total</b>								26 889(72,3)	17 944

\* calculé en années révolues au 1<sup>er</sup> juin de l'année de capture.

\*\* les captures se sont déroulées dans le Val de Rhêmes pour ce qui concerne le Parc national Gran Paradiso (PNGP) et dans la Réserve naturelle de la Grande Sassièrre pour le Parc national de la Vanoise (PNV).

Tableau II. Récapitulatif des données disponibles par individu

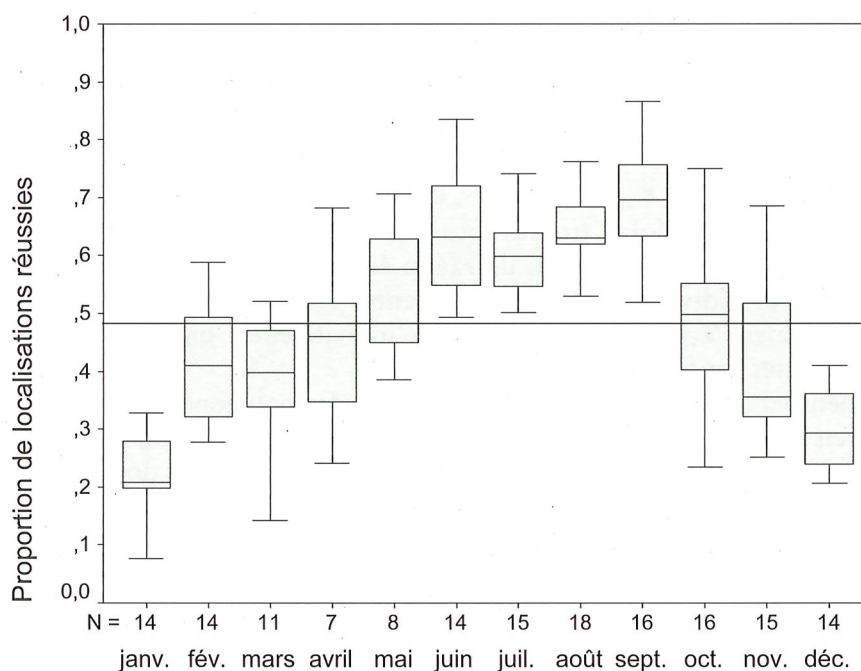


Figure 1. Proportion de localisations conservées par mois pour l'ensemble des individus. La médiane (trait horizontal) ainsi que l'étendue interquartile correspondant à 50% des observations (boîte) sont représentées.



### **II.2.3. Utilisation de l'habitat**

Les paramètres de l'habitat utilisé par les bouquetins (pente, altitude, exposition) ont été évalués en utilisant 3 modèles numériques de terrain (MNT) :

- un MNT Vanoise (sous format raster), résolution 50 m, projection Lambert II étendu ;
- un MNT Piémont (sous forme de courbes de niveau), résolution 10 m, projection UTM 32 ;
- un MNT Aoste (20 fichiers de 4x4 km sous forme points), résolution 10 m, projection UTM 32.

Du fait des formats et des systèmes de projections différents, une transformation a été effectuée afin d'aboutir à un seul fond cartographique (le MNT Vanoise a été converti en contours, puis projeté en UTM 32 ; les 20 fichiers MNT Aoste ont été convertis en contours, et regroupés en un seul fichier [format raster]). En 3 endroits, les localisations sortant de ce MNT global, des courbes de niveau ont été recréées après digitalisation à partir d'un fond cartographique au 20 000<sup>ème</sup> numérisé (résolution 50 m). Elles ont, ensuite, été converties en grille puis incorporées au reste du MNT.

À partir du MNT global, les valeurs de pente, altitude et exposition ont été extraites pour chaque localisation. Elles ont, ensuite, été comparées à celles disponibles, évaluées après définition d'une enveloppe englobant l'ensemble des localisations individuelles, et extraction des proportions de chaque valeur de pente, altitude et exposition comprises dans cette zone.

Une ANOVA de chaque variable de l'habitat a été réalisée en fonction des facteurs individu (aléatoire, imbriqué dans le facteur sexe), sexe et mois (facteurs pris isolément ou en interaction).

## **II.3. Résultats**

### **II.3.1. Aspect technique**

Les 19 colliers GPS ont enregistré une moyenne de 1 415 localisations ( $\sigma=547$ , min=88, max=2070) sur une période moyenne de 246 jours ( $\sigma=92$ , min=12, max=335). La plupart des animaux (15/19) ont été suivis pendant plus de 6 mois consécutifs voire plus de 9 mois (pour 11 d'entre eux). Pendant la période de fonctionnement des colliers, une moyenne de 72,3 % des localisations attendues (tableau II) a été enregistrée, mais ces résultats sont très variables d'un individu à l'autre (min.=45,8%, max.=91,7%).

Parmi l'ensemble des données recueillies, 66,7 % en moyenne des localisations effectives des bouquetins ont été conservées (tableau II), en fonction des critères définis préalablement (*cf.* § II.2.1). Des différences très importantes apparaissent entre les individus (de 25,7% [mâle 402] à plus de 72% [mâles 398 et 400],  $F_{16,122}=7,361$ ,  $p<10^{-3}$ ). Il n'apparaît pas de différence entre les sexes ( $F_{1,17}=0,705$ ,  $p=0,412$ ), ni d'interaction mois\*sexe ( $F_{11,122}=1,415$ ,  $p=0,174$ ). Par contre, des différences significatives apparaissent entre les mois (figure 1,  $F_{11,122}=29,545$ ,  $p<10^{-3}$ ), les mois d'automne et d'hiver (octobre à avril) présentant les plus faibles taux de données conservées.

### **II.3.2. Modalités de déplacement**

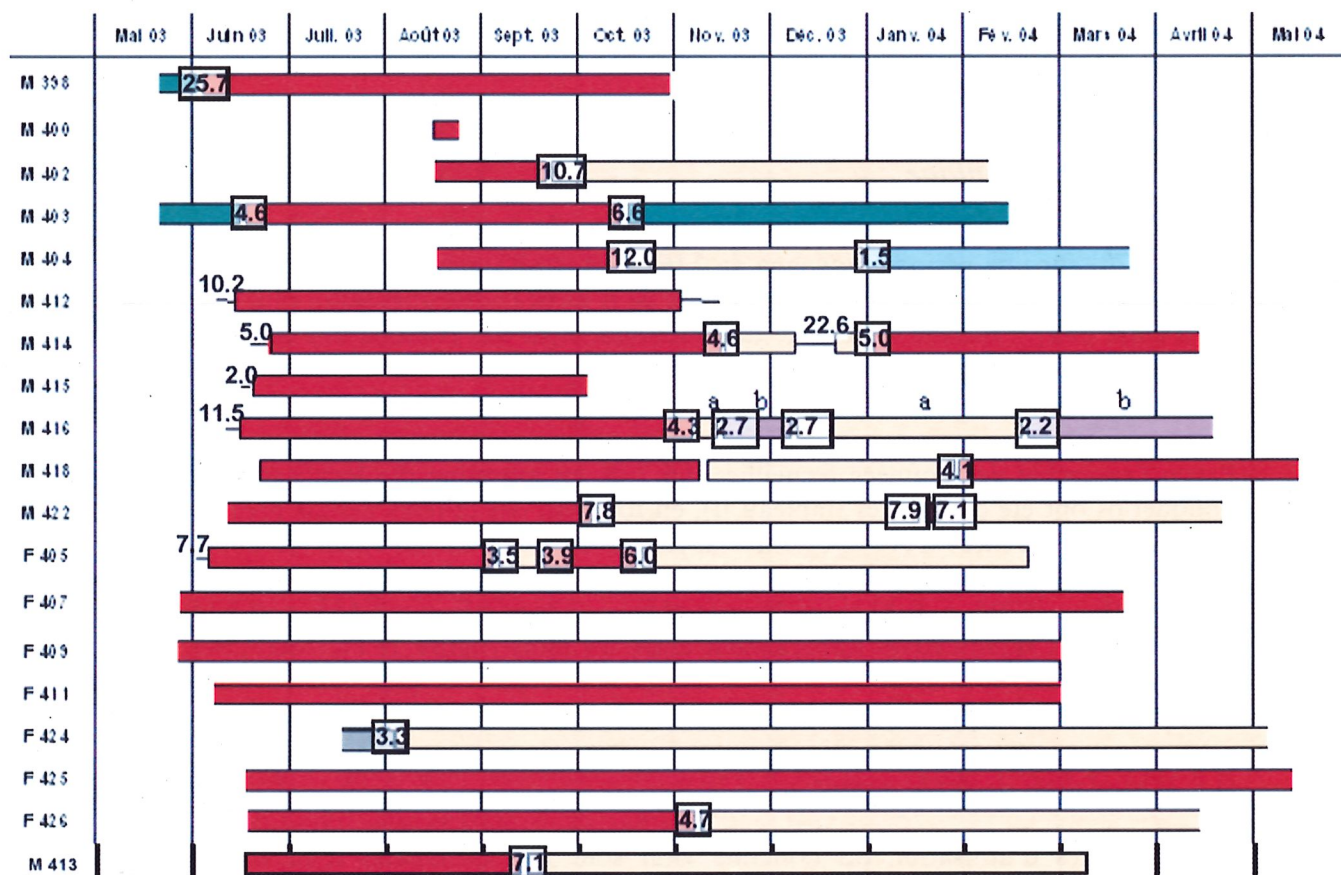
Les modalités d'utilisation du domaine vital sont très différentes d'un individu à l'autre, indépendamment du sexe ou de l'âge de ces derniers. La figure 2 récapitule le déplacement des individus marqués au cours de la période de suivi (différentes zones utilisées et distance entre elles). Un effet de la capture semble apparaître pour 5 individus (mâles 412, 414, 415 et 416 et femelle 405), qui montrent des déplacements importants (2 à 11,5 km) dans les heures ou les jours qui suivent leur marquage sans que cela ne semble correspondre à une utilisation saisonnière d'une zone particulière du domaine vital. De façon générale, à l'exception des mâles 400, 402 et 415, pour lesquels la brièveté de la période de suivi ne permet pas de statuer quant

à leur modalité d'utilisation de l'espace, tous les mâles utilisent au moins deux zones distinctes au cours de l'année. La première est occupée de juin à septembre voire novembre selon les mâles, et la seconde, selon les cas, de novembre à décembre-janvier ou de septembre-octobre à février-avril. Les mâles 414 et 418 utilisent une 2<sup>ème</sup> zone pendant une période réduite (novembre à janvier) puis reviennent sur la 1<sup>ère</sup>. Le mâle 404 utilise également une 2<sup>ème</sup> zone d'octobre à décembre, puis une 3<sup>ème</sup> pour les autres mois d'hiver. Parmi les femelles, seules 2 d'entre elles ont un domaine vital disjoint, avec un déplacement d'une zone à l'autre en octobre-novembre. Pour la femelle 424, un changement de site a eu lieu en juillet, mais il semble plutôt correspondre à un changement de versant quelques jours après la capture. En dehors des grands déplacements liés à l'utilisation saisonnière de certaines zones du domaine vital, certains individus réalisent parfois de brefs trajets allers-retours entre ces zones (cas du mâle 422 en période hivernale ainsi que de la femelle 405 en septembre).

À noter que, par la suite, nous qualifierons les individus présentant un domaine vital disjoint de « migrants », même si les distances entre les quartiers saisonniers peuvent paraître modestes (26 km au maximum).

La distance entre les différentes zones du domaine vital utilisées au cours de l'année s'avère très variable selon les individus, avec des valeurs comprises entre 1,5 et 25,7 km.

La carte (figure 3) permet de visualiser, sous la forme du barycentre des enregistrements, la localisation des individus pendant les périodes hivernales et estivales.



Les couleurs différentes rendent compte de zones distinctes utilisées de façon saisonnière. Les chiffres indiquent les distances linéaires entre elles. Les traits horizontaux représentent de grands déplacements en-dehors de celui réalisé pour relier une zone à l'autre (effet de la capture ?). a, b : il s'agit de 2 zones différentes utilisées alternativement d'octobre à avril.

Figure 2. Modalité d'utilisation du domaine vital par les 19 bouquetins suivis de mai 2003 à mai 2004.



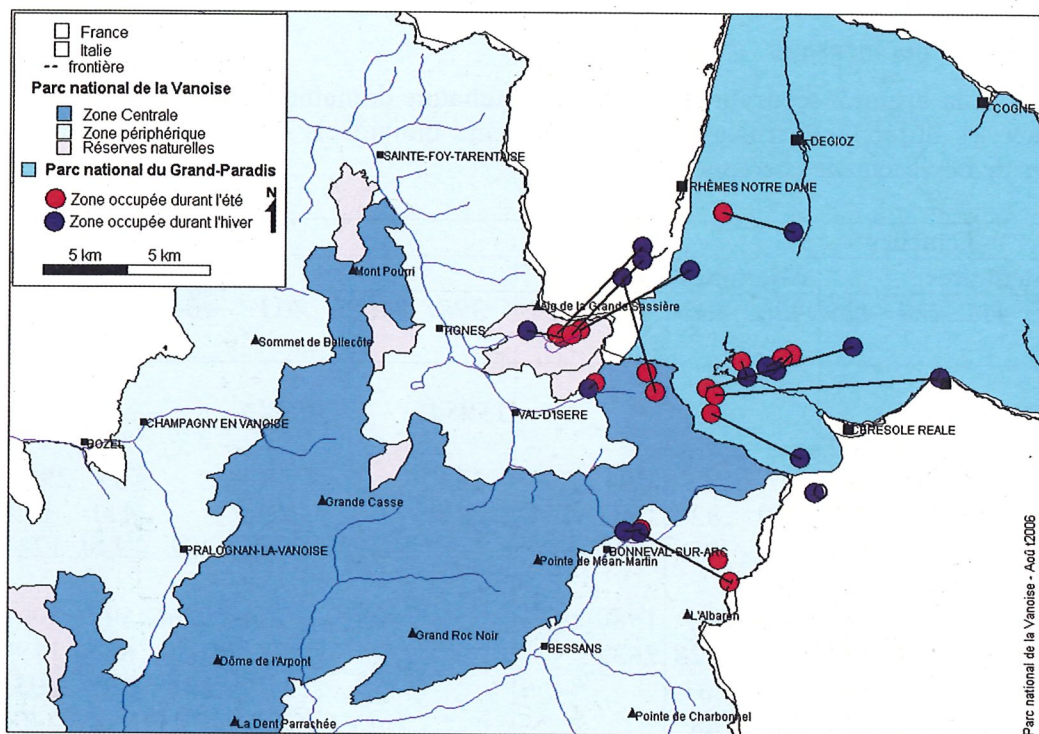


Figure 3. Représentation synthétique (barycentre des localisations) des zones occupées durant l'hiver (bleu) et l'été (rouge) par les animaux marqués (le trait relie 2 zones utilisées par un même individu)

### II.3.3. Domaines vitaux

#### II.3.3.1. Domaines vitaux globaux

La surface du domaine vital global des individus (figure 4) est comprise entre 125,2 ha et 620,4 ha (en excluant 2 mâles pour lesquels la durée du suivi a été très courte : 12 et 99 jours). Elle s'avère plus importante pour les mâles que pour les femelles ( $U_{9,7}=7,000$ ,  $p=0,008$ , test bilatéral,  $\alpha=0,01$ ).

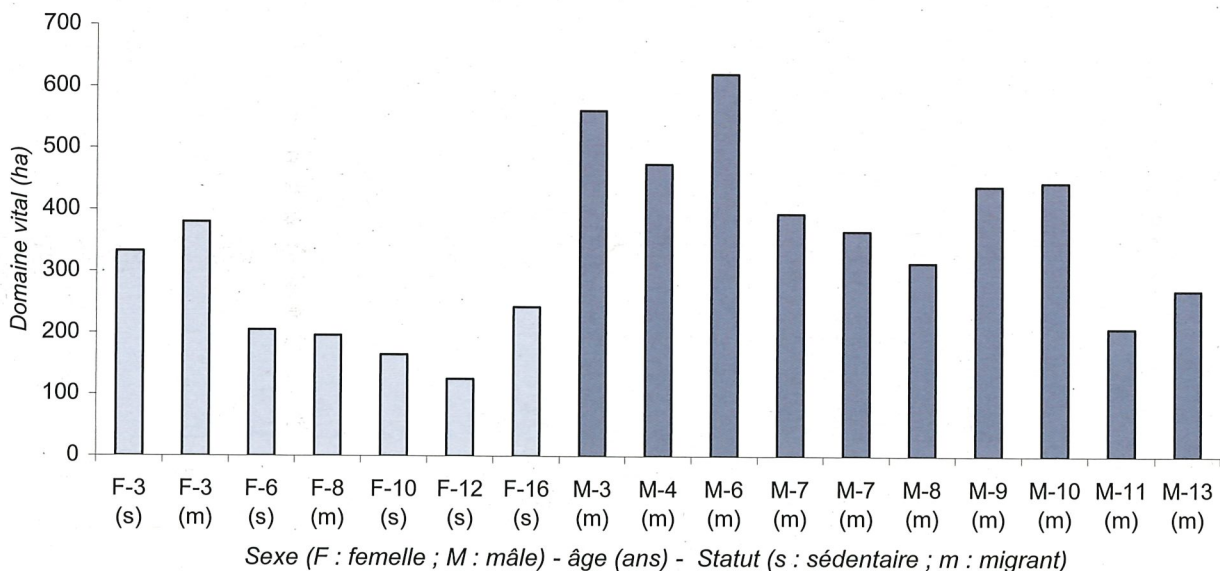


Figure 4. Superficie du domaine vital global des individus (tous mois confondus)

II.3.3.2. Domaines mensuels

Le calcul de la distance séparant le barycentre de chaque domaine mensuel successif permet de confirmer les différentes stratégies de déplacements individuels et de mettre en évidence les périodes de déplacement saisonnier (tableau III).

Sexe	Femelles								Mâles										
Statut	Sédentaires					Migrantes			?	?	Migrants								
Num Mois	407	409	411	424	425	426	405	412	415	398	402	403	404	413	414	416	418	422	
5/6	675 * 1541*										15954*		4042*						
6/7	109					107													
7/8	3	676	539	9		67	256	594	133	144	54		89		2914*	1161	893*	1711	
7/8	48	188	303	3163	85	959	82	1582	364	1279	32		411		199	973	788	2629	
8/9	173	297	341	263	101	148	45	1810	959	9293		1442	202	7244	1225	351	455	221	
9/10	131										603		6174	10266	507	646	2862	483	5788
10/11	9	321	501	152	474	147	987	1980	1413			588	1620	624	1199	8129	6824	72	
10/11	4	341	337	300	159	5779	5828	2632				2229	334	637	7015	68	695	283	
11/12	120	157	48	496	163	781	761					2729	1773	714	7406	6064	140	277	
12/1	10	61	312	361	315	512	68					58	263	565	511	7653	245		
1/2	63	163	349	607	319	257	477					325	155	458	2886	121	153		
2/3	148														102	320	735	98	
3/4					217	21	177									589	44		
4/5					1034	51													

\* données ne recouvrant que partiellement le mois concerné, du fait de la date de capture.

Tableau III. Distance linéaire (m) séparant le barycentre de chaque domaine mensuel successif (en gras : distance reflétant un changement de quartier)

Les différentes stratégies de déplacement apparaissent également lors du calcul de la taille des domaines mensuels (figures 5a et 5b).

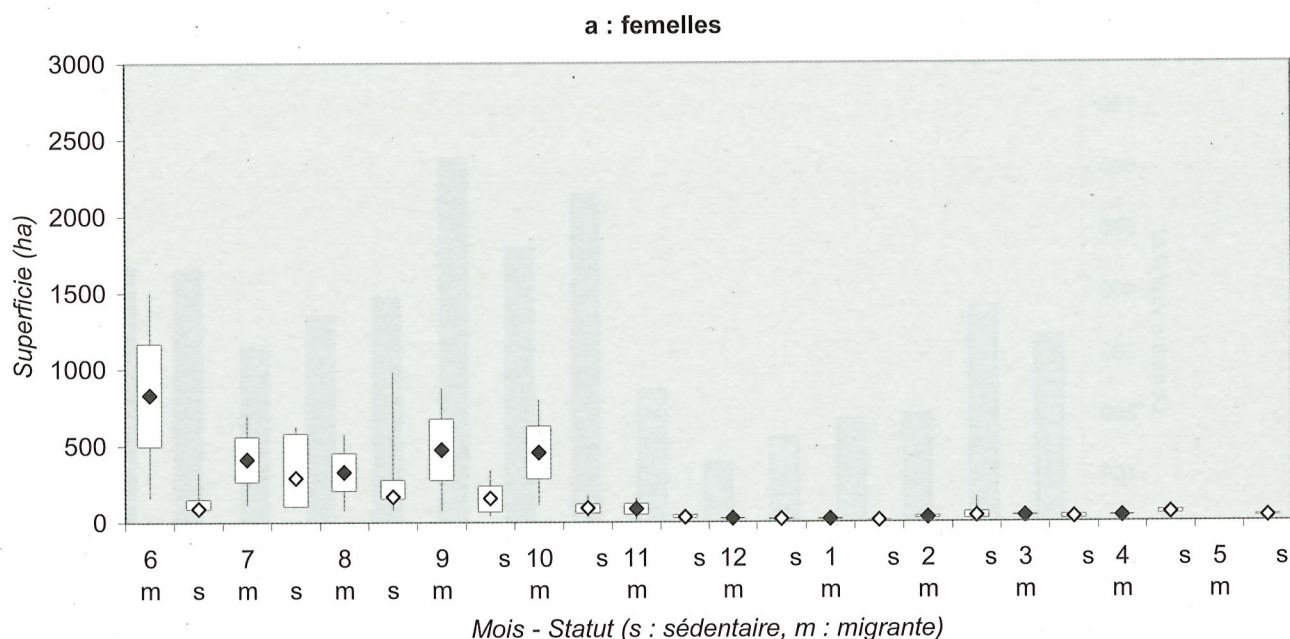


Figure 5a. Taille des domaines mensuels des femelles (a) (barre verticale : valeurs min. et max. ; boîte rectangulaire : correspond à 50% des valeurs ; point : valeur médiane)



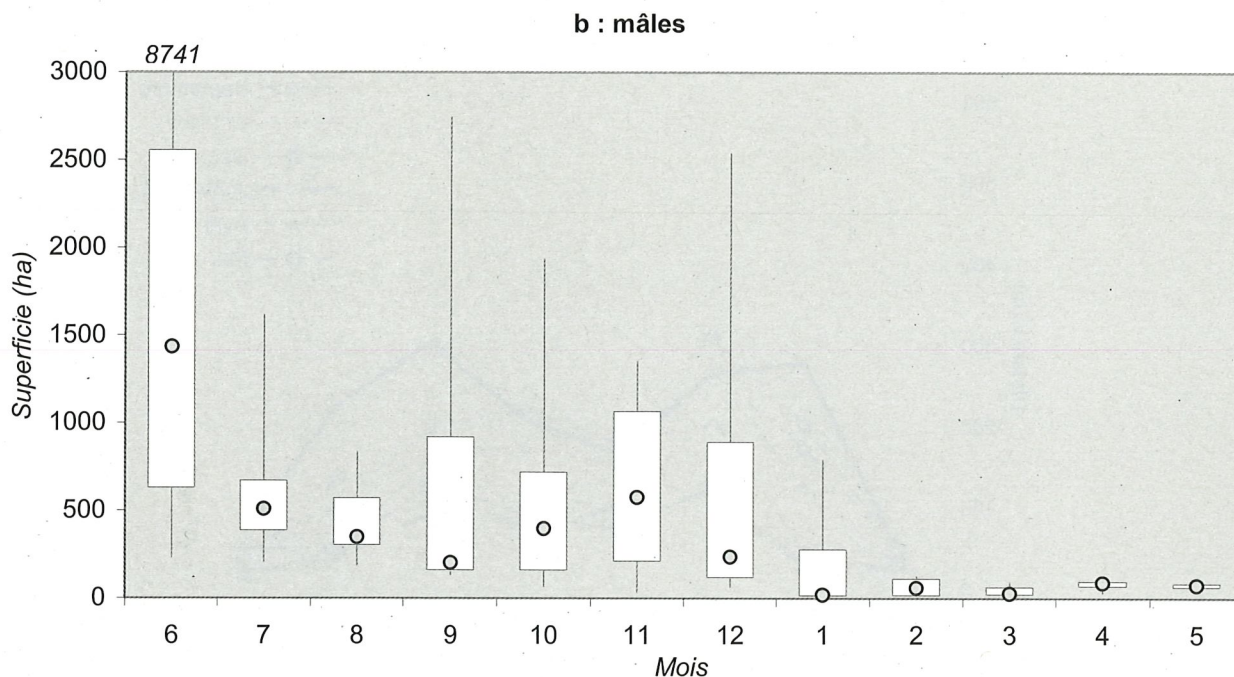


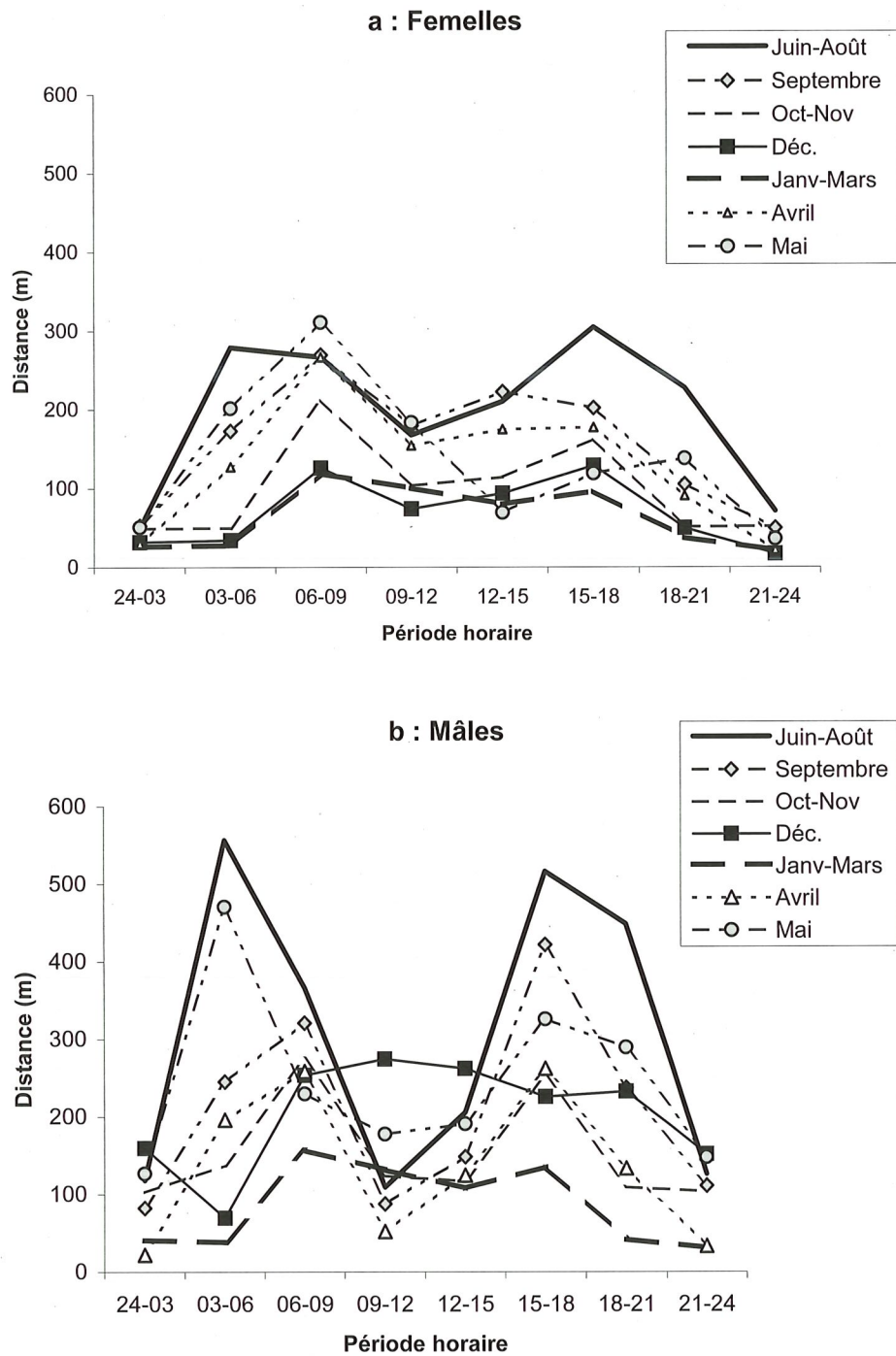
Figure 5b. Taille des domaines mensuels des mâles (b) (barre verticale : valeurs min. et max. ; boîte rectangulaire : correspond à 50% des valeurs ; point : valeur médiane)

Des différences marquées entre les sexes apparaissent. La taille des domaines mensuels des femelles est très réduite entre les mois d'octobre (femelles sédentaires) ou novembre (femelles migrantes) et mai. En début et fin de période estivale (juin et septembre), les femelles migrantes montrent des domaines plus étendus que ceux des femelles sédentaires, du fait du déplacement saisonnier. Les mâles possèdent des domaines mensuels de taille globalement supérieure à celle des femelles, bien que de très fortes variations interindividuelles apparaissent. On peut constater une restriction marquée des déplacements entre les mois de janvier (excepté pour les mâles 414 et 418, *cf.* figure 2) et mai, tandis que des déplacements importants sont encore effectués entre les mois d'octobre et de décembre ou janvier (période de rut), contrairement aux femelles. De ce fait, une différence significative de taille de domaine mensuel entre les sexes est observée pour les mois d'octobre ( $U_{7,7}=7,000$ ,  $p=0,025$ ), de novembre ( $U_{7,7}=5,000$ ,  $p=0,013$ ) et décembre ( $U_{7,7}=0,000$ ,  $p=0,002$ ).

#### II.3.4. Distance linéaire par période horaire

Les distances parcourues entre 2 enregistrements espacés de 3 heures varient selon le sexe, le mois et la période horaire (interaction entre ces 3 facteurs :  $F_{77,9979}=1,86$ ,  $p<0,05$ ). Les distances parcourues par les mâles, toutes périodes horaires confondues, sont significativement différentes ( $p<0,05$ ) de celles parcourues par les femelles entre les mois de juin et janvier, tandis qu'elles s'avèrent de même ampleur entre les mois de février et mai.

Les figures 6a (femelles) et 6b (mâles) soulignent l'existence de 2 pics principaux de déplacement au cours de la journée, de façon particulièrement marquée chez les mâles (figure b). Pour les femelles, les distances minimales sont parcourues entre les mois de décembre et mars, quelle que soit l'heure considérée. Pendant cette période hivernale, les pics de déplacement s'avèrent peu marqués. À l'inverse, les déplacements les plus importants sont observés de juin à août voire septembre, avec des pics plus marqués entre 3 h et 9 h puis entre 15 h et 18 h. La période 21 h – 3 h est celle au cours de laquelle les plus faibles déplacements sont observés, quel que soit le mois considéré (pas de différence significative entre les mois).



Figures 6 a et b. Distance linéaire séparant 2 enregistrements consécutifs par période horaire et par mois pour les femelles (a) et les mâles (b)

Pour les mâles, les déplacements les plus importants sont, également, observés pendant la période estivale (juin – septembre), avec 2 pics très marqués entre 03 h et 06 h puis entre 15 h et 18 h voire 21 h. De même que pour les femelles, ces pics sont moins marqués, voire inexistantes, en période hivernale (décembre – mars). Toutefois, alors que l'amplitude des déplacements est de même ordre pendant toute cette période chez les femelles, les mâles montrent des déplacements plus importants en décembre (comparaison décembre/janvier-mars :  $F_{1,1114}=66,18$ ,  $p<0,05$ ), période qui correspond au rut et durant laquelle les mâles se déplacent de hardes en hardes à la recherche de femelles réceptives.



## II.3.5. Utilisation de l'habitat

### II.3.5.1. Altitude

La grande majorité des localisations (90%) se situe entre 2 000 et 3 000 m (figure 7), les altitudes les plus utilisées se situant entre 2 400 et 2 700 m (50% des localisations). Les mâles sont observés préférentiellement (50% des localisations) à des altitudes situées entre 2 300 et 2 800 m. À noter que les altitudes situées entre 1 100 et 1 400 m pour les mâles sont le fait d'un seul individu (404).

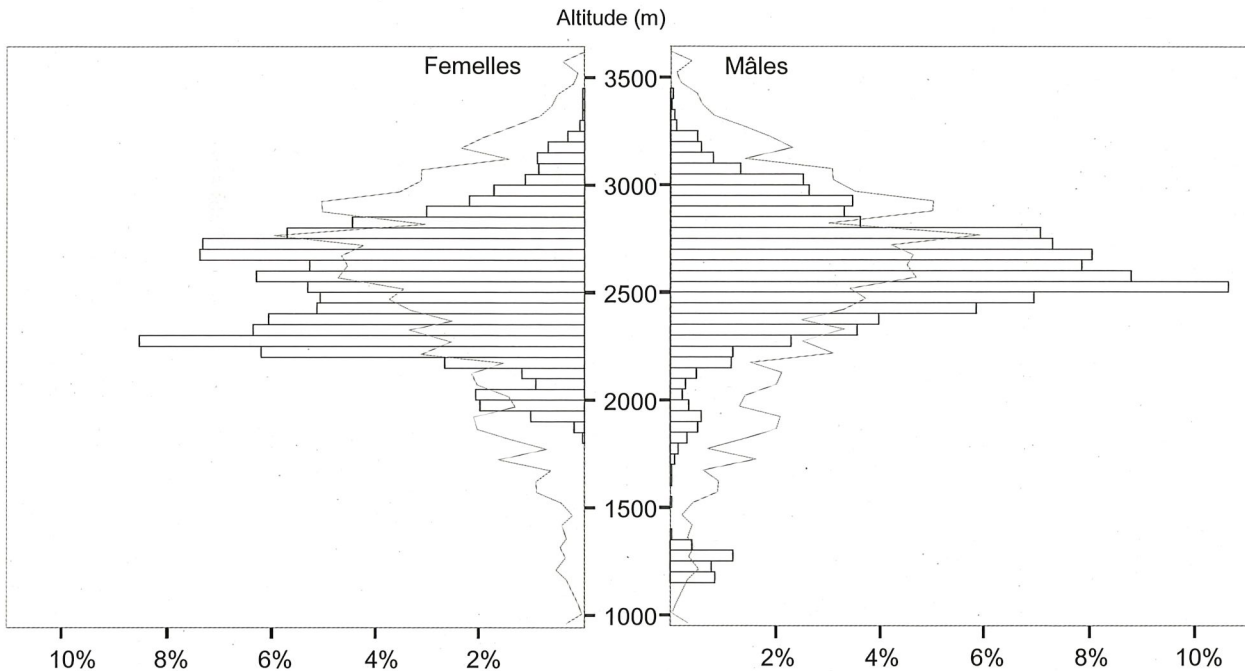


Figure 7. Répartition altitudinale des bouquetins mâles et femelles sur le site d'étude au cours du suivi. Les altitudes disponibles sont figurées par la courbe grise.

Les altitudes utilisées varient au cours des mois pour les 2 sexes (figure 8). Les altitudes les plus faibles sont utilisées de décembre à mars, et celles les plus élevées de juin à septembre. Toutefois, le facteur sexe ( $F_{1,16}=0,367$ ,  $p=0,553$ ) et l'interaction mois\*sexe ( $F_{11,122}=1,397$ ,  $p=0,183$ ) ne sont pas significatifs. Les différences s'avèrent significatives entre individus ( $F_{16,122}=18,950$ ,  $p<10^{-3}$ ) et entre mois ( $F_{11,122}=14,741$ ,  $p<10^{-3}$ ) ainsi que pour l'interaction individu\*mois ( $F_{122,16688}=95,751$ ,  $p<10^{-3}$ ). Cependant, les grandes variations interindividuelles constatées pour les mâles en janvier et décembre (figure 8) ne sont le fait que d'un individu (mâle 404). En retirant cet individu, un graphique relativement différent est obtenu (figure 9), avec un effet significatif du sexe ( $F_{1,15}=7,743$ ,  $p=0,01$ ), et une interaction significative mois\*sexe ( $F_{11,115}=3,596$ ,  $p<10^{-3}$ ). Les autres facteurs et interactions restent significatifs (mois :  $F_{11,115}=32,118$ ,  $p<10^{-3}$ ; individu :  $F_{15,115}=10,201$ ,  $p<10^{-3}$ ; individu\*mois :  $F_{115,15609}=36,909$ ,  $p<10^{-3}$ ). Les mâles montrent une utilisation d'altitudes plus élevées que les femelles de janvier à mai puis d'octobre à décembre, tandis que, de juin à septembre, les altitudes utilisées par les 2 sexes apparaissent similaires.

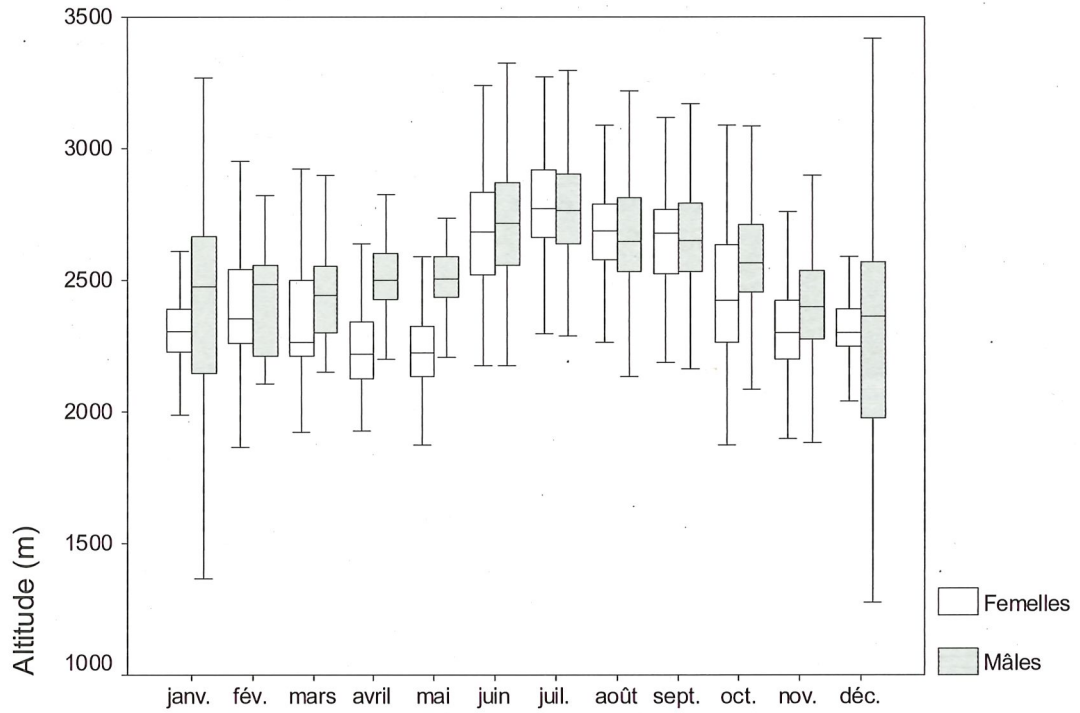


Figure 8. Répartition altitudinale des bouquetins suivis au cours des mois en fonction du sexe. La médiane (trait horizontal) ainsi que l'étendue interquartile correspondant à 50% des observations (boîte) sont représentées.

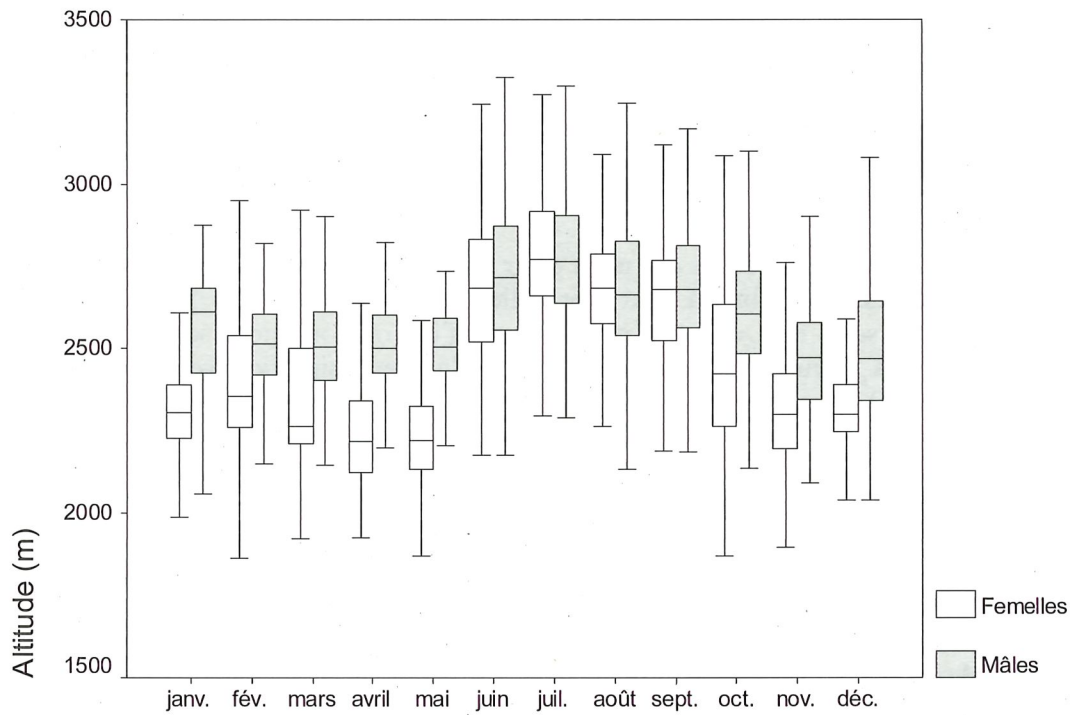


Figure 9. Répartition altitudinale des bouquetins suivis (mâle 404 exclu) au cours des mois en fonction du sexe (trait horizontal : médiane ; boîte : étendue interquartile correspondant à 50% des observations).



### II.3.5.2. Pente

Les bouquetins marqués utilisent principalement les pentes situées entre 18° et 52° (90% des localisations), les pentes les plus utilisées étant comprises entre 28° et 42° (50% des localisations). Les femelles se montrent plus sélectives que les mâles (figure 10) et utilisent des pentes plus fortes : 50% des localisations se situent entre 33° et 45° pour les femelles, et entre 26° et 39° pour les mâles.

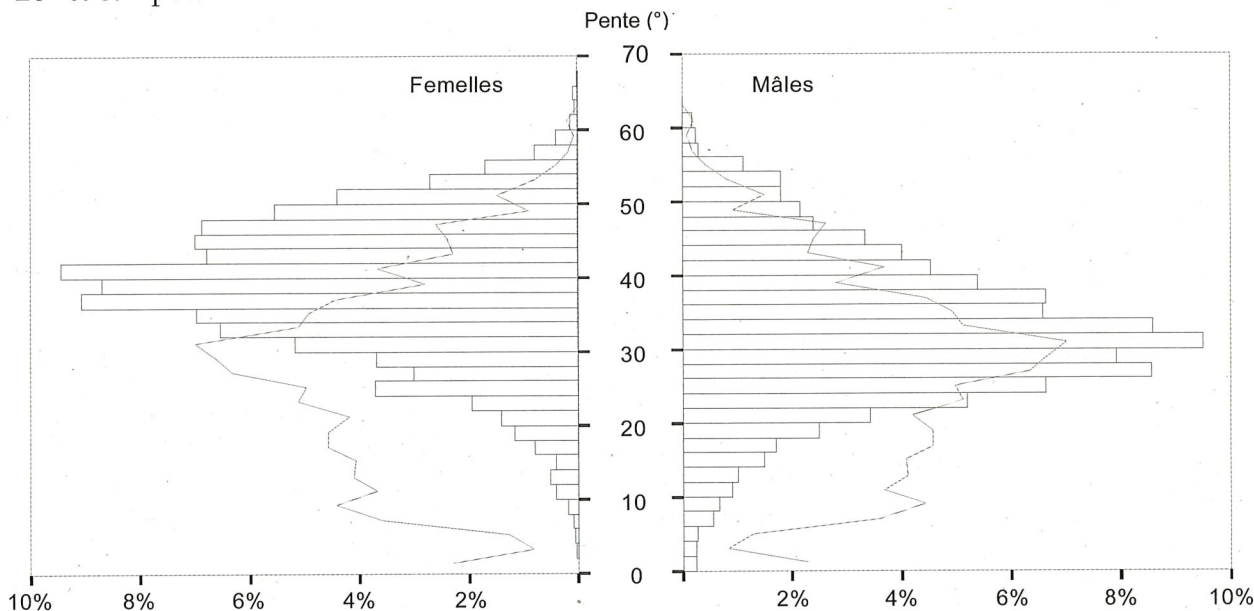


Figure 10. Proportions des valeurs de pente utilisées par les bouquetins mâles et femelles sur le site d'étude au cours du suivi. Les valeurs disponibles sont figurées par la courbe grise.

Cet effet du sexe est significatif ( $F_{1,16}=8,900$ ,  $p=0,009$ ) et valable pour toute l'année, malgré une variation d'utilisation des pentes au cours des mois (facteur significatif :  $F_{11,122}=14,653$ ,  $p<10^{-3}$ ) par les 2 sexes (figure 11). Les plus fortes pentes sont utilisées par les mâles durant les mois de novembre à janvier, tandis qu'elles le sont entre novembre et mai par les femelles.

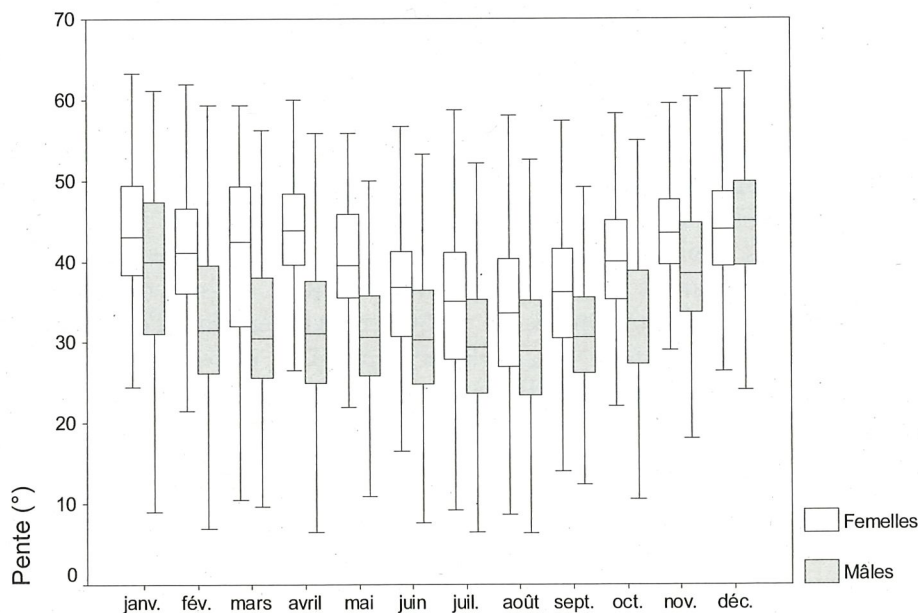


Figure 11. Pentes utilisées par les bouquetins mâles et femelles au cours de l'année (trait horizontal : médiane ; boîte : étendue interquartile correspondant à 50% des observations).

### II.3.5.3. Exposition

Les données indiquent une utilisation principale des pentes exposées du SE au SO (Figure 12). Les mâles semblent moins sélectifs que les femelles : ils utilisent davantage d'expositions E-NE et O-NO : alors que 90% des localisations des femelles se situent entre 113° et 262°, 90% des localisations des mâles se situent entre 72° et 309° (50% des localisations se situent entre 164° et 204° pour les femelles, et entre 135 et 211° pour les mâles).

NB : N = 0° ; NE = 45° ; E = 90° ; SE = 135° ; S = 180° ; SO = 225° ; O = 270° ; NO = 315°.

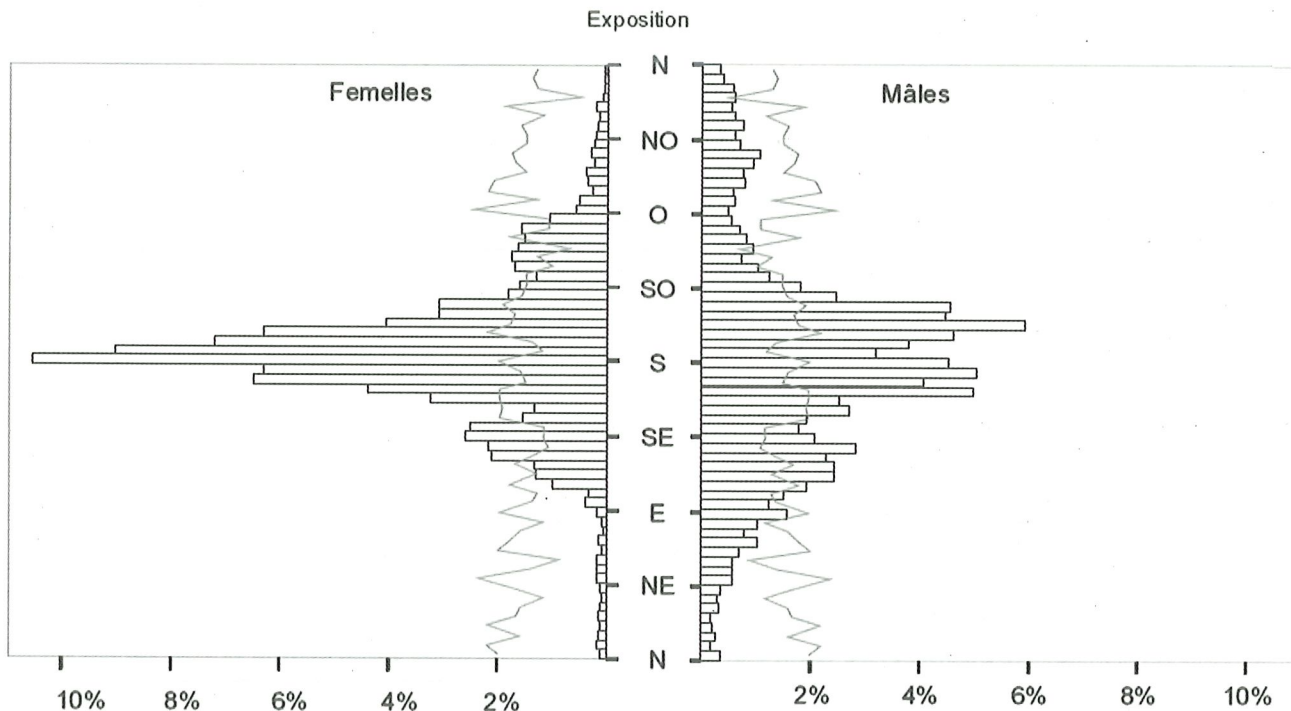


Figure 12. Proportions des expositions utilisées par les bouquetins mâles et femelles sur le site d'étude au cours du suivi. Les pentes disponibles sont figurées par la courbe grise.

Globalement, au cours de l'année (figure 13), les localisations semblent plus exposées au SE durant les mois d'hiver (novembre à février), et au SO pendant les mois d'été (juin à septembre). Une différence significative apparaît dans la façon dont les 2 sexes utilisent les expositions au cours des mois (interaction mois\*sexe :  $F_{11,122}=2,157$ ,  $p=0,021$ ). Ainsi, toutes les orientations sont utilisées par les mâles en juin, juillet et août. A l'inverse, les femelles utilisent de façon très sélective les orientations S, SE et SO en avril et mai. Toutefois, les différences interindividuelles sont importantes ( $F_{16,122}=9,089$ ,  $p<10^{-3}$ ), et varient au cours des mois (interaction individu\*mois significative :  $F_{122,16688}=22,415$ ,  $p<10^{-3}$ ).



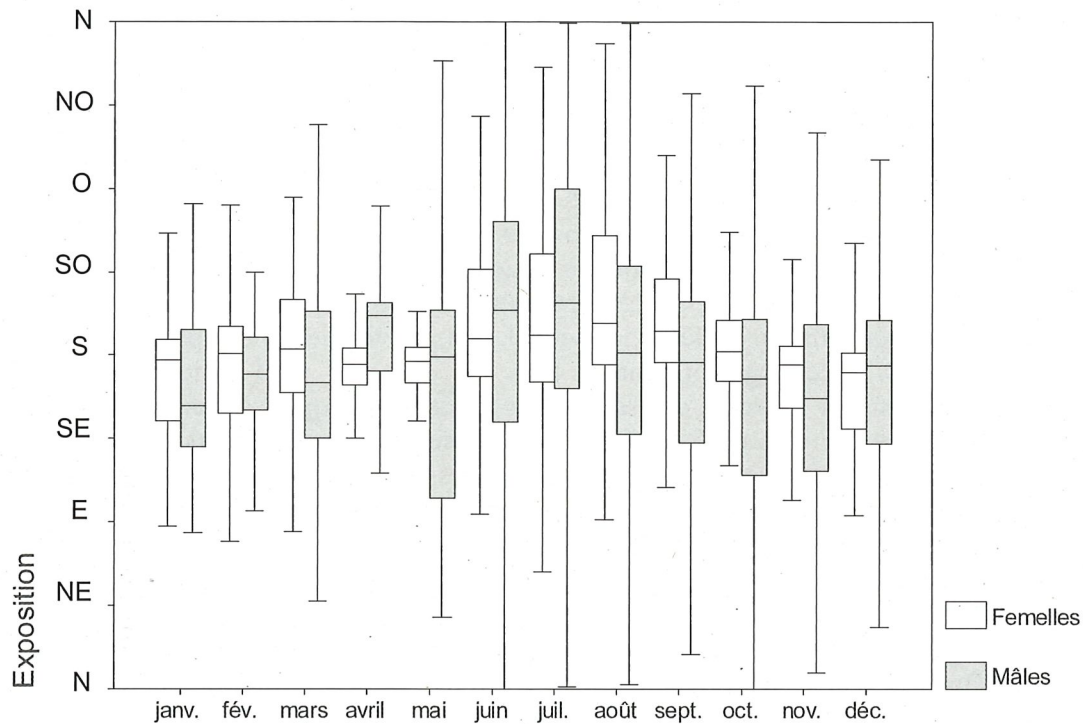


Figure 13. Expositions utilisées par les bouquetins mâles et femelles au cours de l'année (trait horizontal : médiane ; boîte : étendue interquartile correspondant à 50% des observations).

## DISCUSSION - CONCLUSION

L'ensemble de ces résultats montrent l'intérêt du suivi des bouquetins par la technologie GPS. Malgré la présence de masques naturels (falaises), il s'avère possible d'obtenir un nombre conséquent de données, à toute heure de la journée et en toute saison. Toutefois, la fiabilité des colliers s'est avérée très variable, puisque certains enregistrements se sont arrêtés prématurément (après 12 jours de suivi) et qu'aucun animal n'a pu être suivi pendant une année complète (période maximum = 335 jours), contrairement à ce qui était attendu (plus d'une année), du fait d'un manque de batteries. Parallèlement, il est apparu une forte diminution du taux de localisations correctement effectuées pendant la période hivernale, qui semblerait indiquer un effet marqué des conditions climatiques sur le fonctionnement des colliers. Cette baisse des performances pourrait être due à un dysfonctionnement technique, lié à une accumulation de neige se transformant en glace sur les antennes réceptrices, ou à l'utilisation, par les animaux à cette période particulière, de zones-refuges situées en pied de falaise voire sous des surplombs (observations des agents de terrain). Cependant, malgré ces contraintes techniques, le jeu de données récolté s'avère plus conséquent que ceux obtenus antérieurement par le suivi visuel ou le radio-pistage. Ainsi, il a permis, par exemple, d'étudier le déplacement des individus au cours du cycle journalier. De grands déplacements sur une durée très courte (quelques heures à quelques jours) ont, également, été mis en évidence soit consécutivement à la capture, soit en période hivernale (*cf.* figure 2, mâles 412, 414 ou encore 416). Ce type de déplacements, accomplis sur une durée très réduite et parfois en conditions hivernales, n'auraient pu être mis en évidence que très difficilement par un suivi visuel ou même par radio-localisation VHF.

Les modalités d'occupation spatiale mises en évidence par ce suivi s'avèrent très variables selon les individus, certains d'entre eux étant localisés toute l'année sur une même zone, tandis que d'autres utilisent plusieurs zones distinctes de leur domaine vital, plus ou moins éloignées selon les individus. Ces résultats s'avèrent similaires à ceux obtenus lors d'études antérieures menées sur le bouquetin des Alpes, qui ont montré l'importance des modalités individuelles de déplacement, pouvant aboutir à des mouvements de grande ampleur (WIERSEMA et GAUTHIER, 1990 ; GAUTHIER *et al.*, 1991 ; TERRIER *et al.*, 1992 ; MICHALLET, 1994). Ainsi, si la distribution des ressources trophiques dans l'espace constitue, en premier lieu, un facteur prépondérant dans la répartition spatiale des ongulés de montagne au cours de l'année (OWEN-SMITH, 1977 ; ESCOS et ALADOS, 1992 ; LARTER et GATES, 1994 ; MENAUT, 1997), d'autres paramètres interviennent au niveau individuel. En particulier, il apparaît une différence marquée entre les mâles, qui présentent tous un domaine vital disjoint avec des zones particulières utilisées en fonction des saisons, et les femelles, qui semblent plutôt occuper un même site toute l'année (cas de 5 femelles/7). Ce résultat doit être nuancé par le fait que les opérations de capture ont cherché à équiper de colliers des animaux pour lesquels l'existence de déplacements saisonniers était déjà connue (animaux marqués préalablement par boucles auriculaires), dans le but de mieux comprendre les facteurs associés à ces déplacements. Toutefois, si cela s'est avéré possible pour une partie des mâles, il n'a pas été possible de recapturer des femelles, du fait de leur comportement plus farouche. Cependant, malgré cette réserve et le faible nombre d'individus suivis, les différences de modalités de déplacement entre mâles et femelles ont déjà été rapportées dans des études antérieures. L'importance du déplacement de certains bouquetins mâles semble être une caractéristique connue de cette espèce (WIERSEMA, 1984). GAUTHIER et VILLARET (1990) indiquent que les phénomènes migratoires peuvent impliquer des déplacements de grande ampleur pour relier les quartiers saisonniers, effectués généralement d'un seul trait (GAUTHIER, comm. pers.). Ainsi, les mâles semblent constituer les individus pionniers dans le cadre du processus de colonisation, au cours d'une phase exploratoire, suivie d'une seconde phase aboutissant à l'installation définitive des femelles et à leur reproduction sur le site (GIRARD, 2000). De même, chez le chamois (*Rupicapra rupicapra*), les animaux effectuent plutôt des mouvements réduits dans les populations à forte densité (JULLIEN *et al.*, 1997), alors que, dans les populations à développement rapide, les mâles effectuent des déplacements plus nombreux (CLARKE, 1978). Chez le bighorn (*Ovis canadensis*), la stabilité de l'occupation spatiale des femelles a été soulignée, du fait d'une forte fidélité spatiale pour les lieux de mise-bas (FESTA-BIANCHET, 1988). Par ailleurs, le déplacement des individus mâles pourrait également être lié à la stratégie de reproduction adoptée par cette espèce (recherche de femelles en œstrus incitant les mâles à effectuer de grands déplacements, AESBACHER, 1978). Ainsi, la taille des domaines mensuels des mâles s'avère très supérieure à celle des femelles, en particulier entre novembre et janvier (période du rut). Alors que les femelles montrent des déplacements très réduits dès le mois d'octobre, les mâles effectuent des trajets encore conséquents jusqu'en janvier. Ce n'est qu'entre février et mai que les déplacements sont réduits chez les deux sexes. Cette importance du rut dans l'utilisation spatiale des mâles apparaît également au travers des distances parcourues entre 2 enregistrements espacés de 3 heures. En particulier, les déplacements des mâles au cours du mois de décembre sont plus importants que ceux relevés pendant le reste de la période hivernale (janvier – mars), ce qui n'apparaît pas chez les femelles. Ainsi, les modalités d'occupation spatiale des mâles semblent largement influencées par le rut en début d'hiver, en dépit des contraintes météorologiques propres à cette période.

Les résultats concernant l'utilisation de l'habitat, caractérisé par les valeurs de pente, altitude et exposition fréquentées par les individus, apparaissent conformes à ceux généralement décrits pour le bouquetin des Alpes (NIEVERGELT, 1966 ; WIERSEMA, 1983 ; FRANCISCI *et al.*, 1985 ; TOSI *et al.*, 1986 ; PERACINO *et al.*, 1989 ; GAUTHIER *et al.*, 1991). Ces auteurs soulignent la localisation privilégiée des animaux sur des pentes raides souvent exposées au sud, notamment en hiver, permettant de diminuer les risques de prédation et de limiter les contraintes liées à la présence de la couverture neigeuse. Cette préférence pour les habitats de forte inclinaison



apparaît commune à plusieurs espèces d'ongulés de montagne (SHANNON *et al.*, 1975 ; GIONFRIDDO et KRAUSMAN, 1986 ; CRAMPE, 1990 ; LOVARI et APOLLONIO, 1993). Les expositions tournées vers le sud apparaissent privilégiées par les animaux en toutes saisons. L'importance des pentes exposées au soleil dans l'habitat du bouquetin des Alpes a déjà été soulignée (WIERSEMA, 1984 ; WIERSEMA et GAUTHIER, 1990), en indiquant également l'utilisation, par les bouquetins, lors de pointes de chaleur estivale, des pentes plus froides, tournées vers le nord-ouest, situées à l'ombre pendant la majorité de la journée. Cette utilisation du micro-habitat peut expliquer la grande variabilité des expositions utilisées par les mâles entre juin et août, et correspondrait à une recherche d'un certain confort thermique. Par ailleurs, CRAMPE (1990) précise, également, le rôle de régulateur thermique de l'exposition. Cette dernière ainsi que l'altitude constituent deux facteurs prépondérants dans le développement de la végétation, qui conditionnent ensuite la disponibilité des ressources trophiques pour les individus.

L'utilisation différente de certains paramètres de l'habitat selon les sexes peut être expliquée par des facteurs énergétiques et comportementaux. La différence de corpulence entre mâles et femelles ainsi que les périodes de gestation et de lactation des femelles impliquent des besoins trophiques différents, qui constituent un élément majeur de ségrégation entre les sexes (BON et CAMPAN, 1996 ; CONRADT, 1998). Par ailleurs, la présence de cabris aux côtés des femelles favoriserait leur fréquentation préférentielle de pentes fortement inclinées, constituant une défense naturelle contre les prédateurs terrestres (BERGERUD *et al.*, 1984 ; PERACINO *et al.*, 1989 ; GROSS *et al.*, 1995). Ainsi, GEIST (1986) souligne que, chez les Caprinae, les femelles maximisent la sécurité des jeunes, alors que les mâles privilégient leur développement corporel pour favoriser leur dominance. MAIN et COBLENTZ (1996) précisent, également, que les femelles de cerfs muets des Montagnes Rocheuses (*Odocoileus hemionus*) utilisent les habitats qui favorisent la survie des jeunes (pentes fortes, peu utilisées par les coyotes, à proximité de points d'eau et de ressources alimentaires suffisantes).

L'ensemble des résultats de notre étude, obtenus grâce à l'utilisation de colliers GPS, permet d'affiner les conclusions issues des études antérieures portant sur l'espèce et basées sur des observations visuelles, tout en les consolidant du fait du nombre important de données collectées par individu, en particulier en période hivernale et sur l'ensemble du cycle journalier. Toutefois, l'analyse concernant l'utilisation de l'habitat s'avère limitée par les données cartographiques disponibles, en particulier la résolution des modèles numériques de terrain (50 m dans notre cas). Par ailleurs, certains paramètres pouvant influencer la répartition des individus sur le territoire n'ont pu être analysés (végétation<sup>6</sup>, données climatologiques, de nivologie, ...) du fait de l'absence de cartes suffisamment appropriées. Il serait également intéressant de coupler ces résultats avec d'autres facteurs explicatifs (présence d'infrastructures d'origine anthropiques, dérangement lié aux activités touristiques, interactions avec les ongulés domestiques).

Enfin, une compréhension complète des paramètres influençant les modalités d'occupation spatiale et d'utilisation de l'habitat nécessiterait une prise en compte de facteurs agissant au niveau individuel, probablement à l'origine de la forte variabilité observée pour l'ensemble de nos résultats, tels que l'ontogenèse, les besoins physiologiques particuliers à chaque classe de sexe et d'âge et au statut reproducteur ou non des femelles, ... Toutefois, l'obtention de telles données ne peut s'affranchir de la mise en place de protocoles d'observations visuelles. Ainsi, si la technologie GPS ouvre de larges perspectives quant au suivi de la faune sauvage, son choix doit être fait en fonction du type de données à acquérir et des possibilités ultérieures de traitement.

---

<sup>6</sup> Pas de carte disponible de la végétation mais acquisition en cours (programme Interreg IIIB Habitatp).

**Remerciements.** Nous tenons à remercier l'ensemble des agents de terrain du Parc national de la Vanoise impliqués dans les captures et le suivi des bouquetins marqués, en particulier ceux des secteurs de Val d'Isère et Bonneval-sur-Arc, ainsi que, côté italien, ceux du Parc national du Gran Paradiso et les gardes forestiers de la Réserve du Comte Rossi. Ce programme a été financé par les fonds Feder dans le cadre d'un programme Interreg IIIA (2002-2004).

## BIBLIOGRAPHIE

- ADRADOS (C.), 2004. Occupation de l'espace et utilisation de l'habitat par le Bouquetin des Alpes en zone transfrontalière : Parc national de la Vanoise – Parc national du Grand Paradis : rapport d'activité. Chambéry : Parc national de la Vanoise. 39 p.
- ADRADOS (C.), GIRARD (I.), GENDNER (J.P.) et JANEAU (G.), 2002. Global Positioning System (GPS) location accuracy improvement due to selective availability removal. *C. R. Biologies*, 325 : 165-170.
- AESBACHER (A.), 1978. Das Brunftverhalten des Alpensteinwildes. Eine ethologische Beschreibung des Fortpflanzungsverhaltens des Alpensteinwildes (*Capra ibex ibex* L.). Erlenbach, Zürich.
- BERGERUD (A.T.), BUTLER (H.E.) et MILLER (D.R.), 1984. Antipredator tactics of calving caribou : dispersion in mountains. *Can. J. Zool.*, 62 : 1566-1575.
- BON (R.) et CAMPAN (R.), 1996. Unexplained sexual segregation in polygamous ungulates : a defense of an ontogenetic approach. *Behavioural Processes*, 38 : 131-154.
- CLARKE (C.M.H.), 1978. How far do Chamois range ? *What's new in forest research*, 60 : 4 p.
- COCHRAN (W.W.) et LORD (R.D.Jr.), 1963. A radio-tracking system for wild animals. *J. Wildl. Manage.*, 27 : 9-24.
- CONRADT (L.), 1998. Measuring the degree of sexual segregation in group-living animals. *J. Anim. Ecol.*, 67 : 217-226.
- CRAMPE (J.P.), 1990. Le bouquetin ibérique : éléments pour une réintroduction au versant nord des Pyrénées occidentales. Tarbes : Parc national des Pyrénées. 187 p. (Documents scientifiques du Parc national des Pyrénées ; 26).
- DUSSAULT (C.), COURTOIS (R.), OUELLET (J.P.) et HUOT (J.), 1999. Evaluation of GPS telemetry collar performance for habitat studies in the boreal forest. *Wildl. Soc. Bull.*, 27(4) : 965-972.
- DUSSAULT (C.), COURTOIS (R.), OUELLET (J.P.) et HUOT (J.), 2001. Influence of satellite geometry and differential correction on GPS location accuracy. *Wildl. Soc. Bull.*, 29 : 171-179.
- EDENIUS (L.), 1997. Field test of a GPS location system for Moose *Alces alces* under Scandinavian boreal conditions. *Wildlife Biology*, 3 : 39-43.
- ESCOS (J.) et ALADOS (C.L.), 1992. The home-range of the Spanish ibex in spring and fall. *Mammalia*, 56 (1) : 57-63.
- FESTA-BIANCHET (M.), 1988. Seasonal range selection in bighorn sheep : conflicts between forage quality, forage quantity, and predator avoidance. *Oecologia (Berlin)*, 75 : 580-586.
- FRANCISCI (F.), FOCARDI (S.) et BOITONI (L.), 1985. Male and female alpine ibex : phenology of space use and herd size. In : *The Biology and Management of Mountain Ungulates* / edited by Sandro Lovari. London ; Dover, N.H. : Croom Helm. Proceedings of the fourth International Conference on Chamois and Other Mountain Ungulates, held in Pescasseroli, Abruzzo National Park, Italy, June 17-19, 1983. p. 124-133.
- GAUTHIER (D.) et VILLARET (J.C.), 1990 - La réintroduction en France du bouquetin des Alpes. *Rev. Ecol. (Terre et Vie)*, Suppl. 5 : 97-120.
- GAUTHIER (D.), MARTINOT (J.P.), CHOISY (J.P.), MICHALLET (J.), VILLARET (J.C.) et FAURE (E.), 1991. Le Bouquetin des Alpes. *Rev. Ecol. (Terre et Vie)*, Suppl. 6 : 233-275.
- GEIST (V.), 1986. On the evolution of the Caprinae. In : "The Biology and Management of Capricornis and Related Mountain Antelope". Proceedings of the International Symposium on Capricornis and its related species. Japan, Serow Centre, Komono-cho. May 11-13, 1986. Ed. Hiroka Soma, Croom Helms Ltd. p. 3-40.
- GIONFRIDDO (J.P.) et KRAUSMAN (P.R.), 1986. Summer habitat use by mountain sheep. *J. Wildl. Manage.*, 50 (2) : 331-336.



- GIRARD (I.), 2000 - Dynamique des populations et expansion géographique du Bouquetin des Alpes (*Capra ibex ibex*, L.) dans le Parc national de la Vanoise. Thèse de doctorat : sciences biologiques : Chambéry. 251 p.
- GIRARD (I.), ADRADOS (C.), PERACINO (A.), MARTINOT (J.P.), BASSANO (B.) ET JANEAU (G.), 2002. Feasibility of GPS use to locate wild ungulates in high mountain environment. *J. of Mountain Ecology "Pirineos"*, 157 : 7-13.
- GROSS (J.E.), ALKON (P.U.) et DEMMENT (N.W.), 1995. Grouping patterns and social segregation by Nubian ibex. *J. of Arid Environment*, 30 : 423-439.
- HAYNE (D.W.), 1949. Calculation of size of home range. *J. Mamm.*, 30 (1) : 1-18.
- JANEAU (G.), 2002. Le Global Positioning System (GPS) : une alternative aux techniques classiques de localisation utilisées pour l'étude de l'occupation de l'espace par les grands mammifères. *in* : Les Actes du Réseau Alpin. Colloque Ongulés « Bouquetin et Chamois ». Chambéry : Parc national de la Vanoise ; Gap : Réseau Alpin des espaces protégés. p.32-35, p. 72-75 et p.110-113.
- JANEAU (G.), ANGIBAULT (J.M.), CARGNELUTTI (B.), JOACHIM (J.), PÉPIN (D.) et SPITZ (F.), 1998. Le Global Positioning System (GPS) et son utilisation (en mode différentiel) chez les grands mammifères : principes, précision, limites, contraintes et perspectives. *In* : *Arvicola (Actes Amiens)*, 97 : 19-24.
- JANEAU (G.), ADRADOS (C.), JOACHIM (J.) et PÉPIN (D.), 2001. GPS performance in a temperate forest environment. *In* : *Tracking animals with GPS*. Aberdeen : Macaulay Land Use Research Institute. p. 69-72.
- JANEAU (G.), ADRADOS (C.), JOACHIM (J.), GENDNER (J.P.) et PÉPIN (D.), 2004. Performance of differential GPS collars in temperate mountain forests. *C. R. Biologies*, 327 : 1143-1149.
- JULLIEN (J.M.), LOISON (A.) et PÉPIN (D.), 1997. Domaines vitaux des chamois des Bauges. *Bulletin mensuel de l'ONC*, 221 : 5-9.
- LARTER (N.C.) et GATES (C.C.), 1994. Home range size of wood bison : effect of age, sex, and forage availability. *J. Mamm.*, 75(1) : 142-149.
- LOVARI (S.) et APOLLONIO (M.), 1993. Notes on the ecology of gorals in two areas of southern asia. *Rev. Ecol. (Terre et Vie)*, 48 : 365-374.
- MAIN (M.B.) et COBLENTZ (B.E.), 1996. Sexual segregation in rocky mountain mule deer. *J. Wildl. Manage.*, 60(3) : 497-507.
- MENAULT (P.), 1997. Domaines vitaux des isards d'Orlu. *Bulletin mensuel de l'ONC*, 221 : 10-13.
- MICHALLET (J.), 1994. Domaines vitaux et déplacements de Bouquetins des Alpes (*Capra ibex ibex* L.) dans le massif de Belledonne/Sept Laux : bilan de deux années de suivi télémétrique. *Trav. sci. Parc natl. Vanoise*, XVIII : 239-248.
- MOEN (R.J.), PASTOR (J.) et COHEN (Y.), 1997. Accuracy of GPS telemetry collar locations with differential correction. *J. Wildl. Manage.*, 61 : 530-539.
- MOHR (C.O.), 1947. Table of equivalent populations of North American small mammals. *American Midland Naturalist*, 37 : 223-249.
- NIEVERGELT (B.), 1966. Der Alpensteinbock (*Capra ibex ibex* L.) in seinem Lebensraum. Hambourg ; Berlin : P. Parey. 85 p.
- OWEN-SMITH (N.), 1977. On territoriality in ungulates and an evolutionary model. *The Quarterly Review of Biology*, 52(1) : 1-38.
- PERACINO (V.), BASSANO (B.) et GRIMOD (I.), 1989. Alcuni aspetti dell'uso dello spazio, dell'organizzazione sociale e della dinamica di popolazione dello stambecco (*Capra ibex ibex* L.) in un'area campione del Parco nazionale del Gran Paradiso. *Collana scientifica Parco nazionale Gran Paradiso*. Via della Rocca 47. Torino. 69 p.
- REMPEL (R.S.), RODGERS (A.R.) et ABRAHAM (K.F.), 1995. Performance of a GPS animal location system under boreal forest canopy. *J. Wildl. Manage.*, 59 : 543-551.
- RODGERS (A.R.) et ANSON (P.), 1994. Animal-borne GPS: tracking the habitat. *GPS World*, 5 : 20-32.
- SCHERRER (B.), 1984. Biostatistique. Ed. Gaëtan Morin, 854 p.
- SHANNON (N.A.), HUDSON (R.J.), BRINK (V.C.) ET KILTS (W.D.), 1975. Determinants of spatial distribution of rocky mountain bighorn sheep. *J. Wildl. Manage.*, 39(2) : 387-401.
- TERRIER (G.), BRET (E.), TRON (L.) et GONZALEZ (G.), 1992. Individual space use patterns obtained with tagged Alpine Ibexes in the case of 3 relocations programmes. *In* : *Ongulés 91 = Ungulates 91* : proceedings of the International Symposium "Ongulés/Ungulates 91", Toulouse-France, september 2-6, 1991 / ed. by François Spitz. [et al.]. - Paris : S.F.E.P.M.; Toulouse : I.R.G.M. p. 309-315.
- TOSI (G.), SCHERINI (G.), APOLLONIO (M.), FERRARIO (G.), PACHETTI (G.), TOSO (S.) et CUIDALI (F.), 1986. Modello di valutazione ambientale per la reintroduzione dello stambecco (*Capra ibex ibex* L. 1758). Istituto nazionale di biologia della selvaggina. 77 p.

PARC NATIONAL DE LA VANOISE

- WEBER (E.), 1994. Sur les traces des bouquetins d'Europe. Éditions Delachaux et Niestlé, 176 p.
- WIERSEMA (G.), 1983 - L'habitat saisonnier du bouquetin (*Capra ibex ibex*) dans le Parc national de la Vanoise. *Trav. sci. Parc natl. Vanoise*, XIII : 211-222.
- WIERSEMA (G.), 1984. Seasonal use and quality assessment of ibex habitat. *Acta Zool. Fennica*, 172 : 89-90.
- WIERSEMA (G.) et GAUTHIER (D.), 1990. Statut du bouquetin des Alpes : contribution à la réintroduction et à la gestion de cette espèce. *Trav. sci. Parc natl. Vanoise*, XVII : 235-252.



## LES MONDES DE LA FORÊT DE L'ORGÈRE

par Pierre Le Quéau<sup>1</sup>

### Sommaire :

1. Introduction
2. Analyse du discours
  - 2.1. «Travailler» la forêt
  - 2.2. «Sentir» la forêt
  - 2.3. «Voir» la forêt
3. Les mondes de la forêt
  - 3.1. Le «pays»
  - 3.2. Le «paysage»
  - 3.3. L'«écosystème»
4. Conclusion

**Résumé.** L'article présente les résultats d'une enquête sociologique conduite sur les valeurs et significations attribuées à la forêt de l'Orgère, sise sur la frontière entre le cœur du Parc national de la Vanoise et la commune de Villarodin-Bourget. Au terme d'une analyse réalisée sur les discours tenus par les différentes populations interrogées, trois grands univers de compréhension de la forêt, qui sont autant de mondes sociaux, se dégagent et déterminent les valeurs de la forêt.

**Mots-clés :** sociologie, analyse du discours, représentations sociales, mondes sociaux.

**Summary.** The contribution presents the findings of a sociological survey which aimed at analyzing the values and significations given to a forest located in the Vanoise National Park and a village district (Villarodin-Bourget). A discourse analysis shows that values and significations basically depend on three main "universes of understanding" which are, at the same time, three "social worlds" historically and culturally structured.

**Key-words :** sociology, discourse analysis, social representation, social worlds.

## 1. INTRODUCTION

Cette enquête s'inscrit dans le cadre du programme de recherches pluridisciplinaires mis en place par le Parc national de la Vanoise (PNV) pour objectiver les valeurs, tant naturelles qu'humaines, de la forêt de l'Orgère qui se situe sur son territoire et sur celui de la commune de Villarodin-Bourget. L'intérêt porté à cette forêt suit le développement d'une controverse qui a connu plusieurs moments critiques mais dont le dernier date de 1999, année au cours de laquelle a été étudié un plan pour son exploitation. Tandis que certains ont revendiqué le droit d'y prélever du bois à des fins domestiques, les autres ont défendu l'idée que cette forêt, épargnée par la main de l'homme sûrement depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle, mais qui compte des arbres encore plus anciens (600 ans), appartient à un patrimoine national qu'il convient de conserver intact. C'est pour informer les différents partis en présence que ce programme d'études a été décidé et financé par le PNV.

Le volet sociologique de cette recherche s'est déroulé sur trois ans, entre 2001 et 2003. La première année a été consacrée à une observation ethnographique et à la réalisation de 72 entretiens non-directifs de recherche auprès des habitants de la commune de Villarodin-Bourget

---

<sup>1</sup> Maître de conférences, Centre de sociologie des représentations et des pratiques culturelles, Université Grenoble 2.

(30 personnes interrogées), de randonneurs de passage aux abords immédiats de la forêt (30), d'experts ou professionnels impliqués dans la gestion de cette forêt (12). La seconde année a donné lieu à une enquête de validation effectuée par questionnaires auprès des mêmes populations : 175 randonneurs et 145 habitants de la commune.

## 2. ANALYSE DU DISCOURS

Le questionnaire accordait une grande place aux questions ouvertes pour recueillir le matériau d'évocations associées à la forêt de l'Orgère le plus large possible. Parmi les questions posées, il en est une qui offre un intérêt spécial pour introduire les principaux enseignements de l'enquête : elle reprenait les termes d'une autre posée au cours des entretiens individuels préparatoires : « Quels sont tous les mots, images et expressions qui vous viennent à l'esprit pour décrire la façon dont vous voyez la forêt de l'Orgère ? ». L'analyse (lexicométrique) a alors consisté à compter les mots et à classer les réponses à partir de leur profil lexical. Elle a permis d'identifier 6 classes de réponses homogènes du point de vue de leur vocabulaire et cela sur une base objective puisque le logiciel de traitement n'effectue aucune interprétation (Tableau I et figure 1).

Classe 1		Classe 2		Classe 3	
Voir. (9)	39,72	Travail<(9)	36,65	Flore+(10)	39,68
Forêt+(14)	21,04	Bois(13)	22,76	Faune+(6)	21,08
Magnifique+(4)	16,32	Champignon+(11)	22,73	Accès(4)	17,38
Belle+(8)	13,03	Chasse(6)	22,17	Découverte+(4)	17,38
Mélèze+(6)	11,78	Promeneur(7)	19,03	Rhododendron+(5)	16,67
				Facile+(6)	14,02
				Varié+(3)	12,94

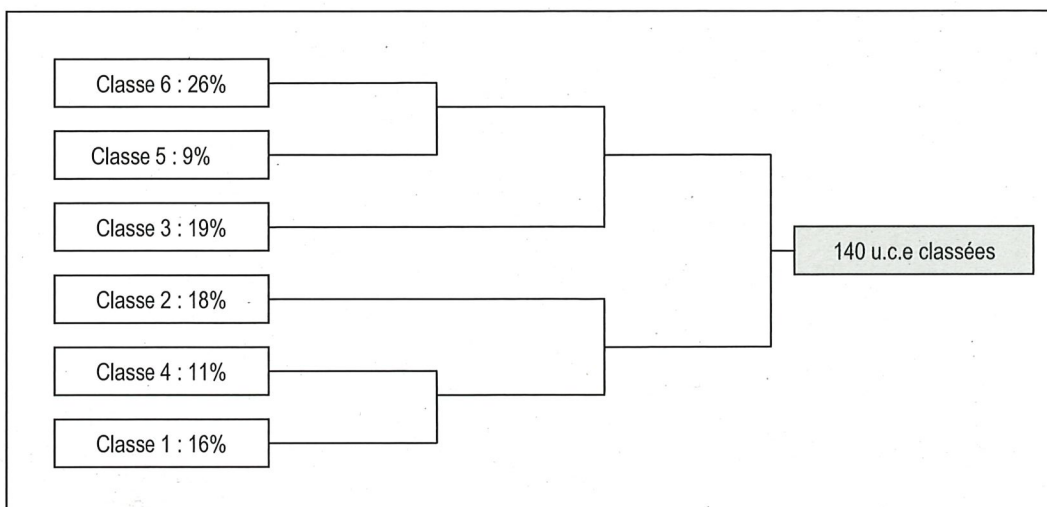
  

Classe 4		Classe 5		Classe 6	
Cembro(10)	67,56	Beauté+(8)	72,90	Sentier+(16)	26,65
Pin+(13)	62,69	Calm+e (10)	49,44	Agréable+ (11)	21,99
Mélèze+(6)	19,48	Paysage+ (4)	31,03	Sentir. (7)	20,70
Humid+e(3)	16,58			Marmotte+(7)	20,70
Oiseau+(4)	16,58			Nature+ (14)	15,39
Epicéa+(2)	9,32			Fait (6)	10,42
Côte+(2)	9,32				

**Guide de lecture :** le logiciel effectue des comptages à partir des formes réduites à leur radical. Le point après un verbe (comme « voir. » dans la classe 1), signale que sont comprises toutes ses conjugaisons. Le signe « + » (comme dans « humid+e », classe 4) indique que les substantifs ou adjectifs sont considérés avec toutes leurs terminaisons possibles (humide, humides, humidité...). Enfin, le signe « < » (comme dans « travail< », classe 2) souligne que la forme est aussi bien un substantif qu'un verbe, considérant toutes leurs terminaisons. Le chiffre qui figure dans la colonne de droite après un mot est un indicateur de significativité ( $\chi^2$ ), celui qui est entre parenthèses représente le nombre d'occurrences du mot dans la classe.

Tableau I. Les six classes de discours sur la forêt de l'Orgère





**Guide de lecture :** le logiciel classe des propositions, au sens grammatical du terme, ou « unités de contexte élémentaire » (u.c.e.) qui, en l'occurrence, et compte tenu du format imposé par une question ouverte posée à travers un questionnaire, correspond le plus souvent à une réponse.

Figure 1 : Classification descendante hiérarchique

## 2.1. « Travailler » la forêt

La classe 2 se distingue très nettement des autres et correspond essentiellement au discours de certains habitants de la commune de Villarodin-Bourget. C'est le verbe « travailler » qui représente le mieux cette classe de vocabulaire : conjugué ou bien substantivé. Très caractéristique en est également la forme « bois ». Alors que, dans toutes les autres classes, il est toujours question de la « forêt » et des « arbres » vivants, c'est le matériau qu'ils produisent et que l'on « travaille » qui est ici évoqué. D'ailleurs, parmi les segments répétés significatifs de cette classe, on trouve toutes les déclinaisons possibles de l'expression : « travail< bois ».

- « *Avant on y montait pour le travail du bois... »*
- « *Travailler le bois, les affouages. Les champignons : les bolets... »*.

Le thème qu'évoquent ces deux formes est ensuite surdéterminé par un certain nombre d'équivalents sémantiques. Au lieu de « travail< », on peut trouver d'autres verbes qui traduisent le même genre d'activités : « couper », « ramasser », « aller » (dans l'expression « aller au bois ») :

- « *On s'en servait pour l'affouage. La commune délivrait une quantité de bois sur pied pour le chauffage, pas du beau bois. Fallait être équipé : avant, on y allait avec le mulet.»*

Enfin, la notion de travail s'élargit puisqu'elle peut éventuellement englober les différentes activités agricoles auxquelles on pouvait autrefois se livrer dans le vallon (les foins, le pastoralisme, ...) ou la cueillette d'autres produits de la forêt : champignon, myrtille, framboise, pigne, ... Sans parler de la chasse qui est un terme que l'on ne retrouve dans aucune autre classe :

- « *Avant on montait avec les vaches. La chasse, les coupes de bois, les champignons... »*
- « *On ramassait le bois, les myrtilles, les pignons. Normalement, on y allait pour le travail, pour aller au bois, rarement pour la promenade. »*

Dans cette classe de réponses, la forêt de l'Orgère n'est envisagée qu'à travers ce qu'elle produit pour les hommes. Mais les temps autour desquels est construite la quasi-totalité de ces

réponses sont très caractéristiques : le passé composé ou l'imparfait. Il est donc moins question de la forêt telle qu'elle est aujourd'hui, que du souvenir qu'elle laisse :

- « *Les promenades avec mon père quand on allait travailler le bois.* »
- « *Quand on allait travailler à l'affouage, dans les années cinquante, on prenait le casse-croûte ensemble.* »
- « *L'Orgère, c'est mon rêve. J'y monte en été et à l'automne, pour la chasse. J'y ai passé ma jeunesse.* »

Les seuls éléments de réponse exprimés au présent, servent précisément à indiquer une évolution qui est rarement perçue favorablement. Dans nombre de réponses, il y a une sorte d'opposition entre un « avant » idéal et un « maintenant » qui renvoie à une sorte d'abandon :

- « *Depuis le parc, on ne peut plus y aller comme avant : on ne peut plus couper du bois. Elle reste sauvage grâce à la convention et aux travaux du Parc. Ça s'appelle l'Orgère parce qu'avant il y poussait de l'orge. Avant, on allait à la chasse, maintenant on ne peut plus.* »
- « *Elle n'est plus ce qu'elle était : elle n'est plus entretenue, sale, avec du bois sec au sol. Maintenant, on ne ramasse plus que le bon bois et on laisse tout traîner. Il y a beaucoup de bois mort, c'est lamentable. Elle a été belle jusque dans les années 1970. Je n'y monte plus.* »

Pour pouvoir apprécier cette évolution, il faut bien entendu avoir vécu assez longtemps. La formulation de ce groupe de réponses le dit assez explicitement, mais on note une assez forte corrélation entre cette classe de réponses et certaines variables comme l'âge. Typiquement, celui qui formule une telle réponse est donc un habitant du Bourget : un homme âgé d'au moins 65 ans qui a été ouvrier pendant sa vie active. La plupart des personnes dont la réponse est ainsi classée présente ce profil sociodémographique, ce qui confère une homogénéité particulière à cet ensemble de réponses.

## 2.2. « Sentir » la forêt

Le verbe « sentir. » est une des toutes premières formes qui caractérisent la classe 6 et cette particularité n'est pas seulement statistique mais sémantique : il dénote une approche esthétique de la forêt de l'Orgère qui structure aussi les classes 3 et 5. Au premier degré, « sentir » se rapporte à une impression olfactive : « odeur » est d'ailleurs une des autres formes caractéristiques de la classe 6 qui renvoie à celle des pins, de la résine, des fleurs, ... Bien que cette dernière forme soit peu fréquente dans cet ensemble de réponses. Elle l'est en revanche davantage dans la classe 3 à travers les occurrences significatives de « flore+ », de « fleur+ » et de « rhododendron+ ».

- « *Elle n'est pas sombre mais lumineuse. Il n'y a pas que des épineux. Elle est variée, odorante. La flore. Elle n'est pas hostile, pas impressionnante.* » (réponse caractéristique de la classe 3).
- « *Mystère, respect, protection... Loups, arbres, calme, odeur, ambiance...* » (classe 5).
- « *Elle est jolie, ça sent bon... C'est frais, beau, ça sent la résine.* » (classe 6).

La nuance que l'on peut noter entre les classes 3, 5 et 6 tient dans le fait que les réponses contenues dans les deux premières (3 et 5) restent un peu plus souvent « extérieures » à la forêt elle-même, comme le souligne d'ailleurs explicitement la notion de « paysage+ » :

- « *Le calme et la beauté de la nature. Les odeurs de pin. Le paysage.* » (classe 5).
- « *C'est une forêt complète. Avec les rhododendrons, elle est très colorée.* » (classe 3).

A *contrario*, le discours typique de la classe 6 est surtout construit à partir du sentier nature qui traverse la forêt « de l'intérieur » :

- « *Elle est agréable, jolie. Le sentier nature est intéressant.* »
- « *Le sentier botanique qu'on fait découvrir à nos enfants.* »



Le verbe « sentir. » ne renvoie pas seulement à une impression olfactive : plus fondamentalement, c'est en cela qu'il paraît bien décrire ce qui fait le point commun des classes 3, 5 et 6, il désigne l'état des impressions que laisse la forêt de l'Orgère à celui qui s'y promène. Autrement dit, il s'agit tout autant de dire comment « on s'y sent » (classe 6). Parmi les impressions le plus fréquemment citées, deux dominent nettement d'un point de vue quantitatif et se recoupent assez largement sur le plan sémantique : le « calme » et la « tranquillité » :

- « *J'aime passer dedans, regarder les animaux, les fleurs, les oiseaux : ce qui se présente. Le calme.* ». (classe 3).
- « *Le calme, la beauté du paysage. Ça me plaît.* » (classe 5).
- « *Elle est calme, silencieuse, ça sent bon les pins.* » (classe 6).

On peut encore lire différentes expressions qui traduisent la même perception de sérénité en leur donnant un tour au moins allégorique et, quelques fois, poétique : le « paradis », la « paix », l'« idylle », ... Une personne interrogée évoque son « imagination » que la forêt stimule. Et une autre explicite le principe de cette correspondance qui s'établit entre la sensibilité et la forêt : « C'est merveilleux, splendide, beau. Ça se ressent à l'intérieur ». C'est par ailleurs une opinion souvent formulée que de reconnaître dans la forêt un « abri » qui protège du monde moderne. Elle constitue, pour certains, un refuge, un espace où les contraintes du quotidien disparaissent :

- « *Agréable, tranquillité, nature. C'est un endroit où on peut tout oublier : il n'y a plus d'heures, plus de jours... On déconnecte du réel.* »

D'autres personnes dont la réponse a été classée dans l'un de ces trois groupes parlent de leur besoin d'isolement qu'elles parviennent à y satisfaire. Comme si du lieu pouvait aussi se dégager quelque sentiment de religiosité. La forêt est alors désignée avec des mots qui tentent d'approcher quelque chose d'ineffable : les arbres sont perçus comme « impressionnants », on évoque leur « grandeur », ou bien la forêt est tout simplement dite « majestueuse ». Des randonneurs ont explicitement fait allusion à la crainte, voire la peur, que peut leur laisser une forêt : mais il semble que celle de l'Orgère ne corresponde pas à cette image. Celle-ci est même le plus souvent associée à des adjectifs comme « facile », « praticable », « rassurante », etc. Principalement parce que le chemin tracé dans la forêt permet au promeneur de ne pas s'y perdre et la rend lisible ou accessible : « *On s'y sent bien. Pas de crainte. Elle ne fait pas peur, grâce au sentier* ». Ce qui explique que dans les classes 3, 5 et 6, il est souvent fait allusion aux enfants que l'on peut y promener :

- « *C'est facile d'accès pour les enfants, ça permet la découverte de la flore et de la faune.* » (classe 3).
- « *Quiétude, beauté de l'environnement. Ballade facile et courte avec les enfants et les amis.* » (classe 5).
- « *Le sentier botanique qu'on fait découvrir à nos enfants...* » (classe 6).

### 2.3. « Voir » la forêt

La forme lexicale la plus significative de ces dernières classes de réponses est le verbe « voir. », étant entendu qu'il peut être conjugué à toutes les personnes de tous les temps. Il s'applique indifféremment à la forêt toute entière, aux arbres qui la composent, et animaux qui l'habitent. Ce « regard » posé sur la forêt de l'Orgère n'est pas aussi distant qu'on pourrait le supposer *a priori* car nombre d'autres notions que l'on retrouve spécifiquement dans cette classe de réponses dénotent une grande attention accordée non seulement aux essences d'arbres mais aussi aux formes et éclairages particuliers qui s'en dégagent. Il s'agit, en d'autres termes, d'un regard observateur, scrutateur, porté sur la forêt de l'intérieur : non pas un de ceux qui embrassent, de loin, un paysage :

- « *La clarté de cette forêt : elle n'est jamais très sombre à cause des mélèzes. Mais il y a une grande variété dans cette forêt : des rochers, un relief, plusieurs essences... En général, les forêts sont sombres, on y voit peu, alors qu'à l'Orgère, il existe un éclairage spécial à cause de l'exposition.* » (Réponse caractéristique de la classe 1).

Cette première classe partage avec la quatrième de rassembler les discours de ceux qui se présentent comme des connaisseurs de la forêt. On peut en juger par le nom des arbres cités : alors que le mélèze est surtout nommé dans la première classe, les essences désignées sont plus variées dans la quatrième (pin, pin cembro, pin sylvestre, épicéa, sapin, ...). On ne trouve aucun nom d'arbre dans les autres classes de réponses. Les classes 1 et 4 contiennent en outre plusieurs noms d'animaux qui vont des plus attendus (chamois, chevreuil, ...), aux moins connus du grand public (pics noir et vert, grassette, ...). L'attention va parfois jusqu'à se porter sur les insectes qui peuplent la forêt de l'Orgère. Le souci du détail qui caractérise ces deux ensembles de réponses englobe enfin des considérations relatives au climat, à l'exposition de la forêt ou à sa situation et que l'on ne retrouve dans aucune autre classe de réponses :

- « *Ce n'est pas une forêt exposée et sèche...* » (classe 1).
- « *Le climat méditerranéen, le pin cembro.* » (classe 4).

Le regard traduit par ces formes lexicales n'est donc pas seulement « observateur » : il est aussi « objectivant ». C'est pourquoi elles ont encore en commun de contenir des notions qui peuvent se rattacher à un corpus scientifique. On trouve en effet citées dans ces deux classes, et dans aucune autre, les notions de « biotope », d'« écologie » :

- « *C'est un biotope particulier, très riche qui donne son importance à la forêt.* » (classe 1).
- « *C'est là que j'ai découvert le casse-noix et son écologie liée au pin cembro. Il faut que ces arbres ne soient pas coupés juste à cause de cet oiseau.* » (classe 4).

Les classes 1 et 4 évoquent la forêt en des termes très proches et « par le menu », c'est-à-dire : en détaillant les différents éléments qui font la diversité de ses règnes végétal et animal. Ce qui les distingue réside principalement dans les adjectifs. Surtout dénotatifs dans la classe 4, ils précisent la propriété d'une chose singulière : « verts » ou « noirs » (les pics), « naturelle » (la forêt), « couchés » (les arbres), etc. Parfois, ils tendraient presque à évoquer une sensation physique : « raide » (la côte), « humide » (la forêt), « forte » (l'odeur), etc. Mais ils désignent rarement un sentiment. Les adjectifs qui spécifient la classe 1 sont *a contrario* plus souvent de cet ordre. La forêt y est ainsi perçue comme : « belle », « magnifique », « riche », « importante », etc.

### 3. LES MONDES DE LA FORÊT

L'analyse fait apparaître un lien statistique entre chaque type de discours et certaines caractéristiques sociodémographiques des personnes interrogées. Mais au-delà des individus, ce sont des mondes sociaux plus vastes dont on peut voir se dessiner les contours : des groupes ayant leurs propres langages et univers de référence. Bien plus qu'un vocabulaire commun, les classes de discours manifestent autrement dit une vision du monde qui délimite un collectif historiquement structuré. Chacun de ces collectifs se caractérisant par un type spécifique de relation à la forêt désigné par les trois expressions : le « pays », le « paysage », l'« écosystème » (figure 2).



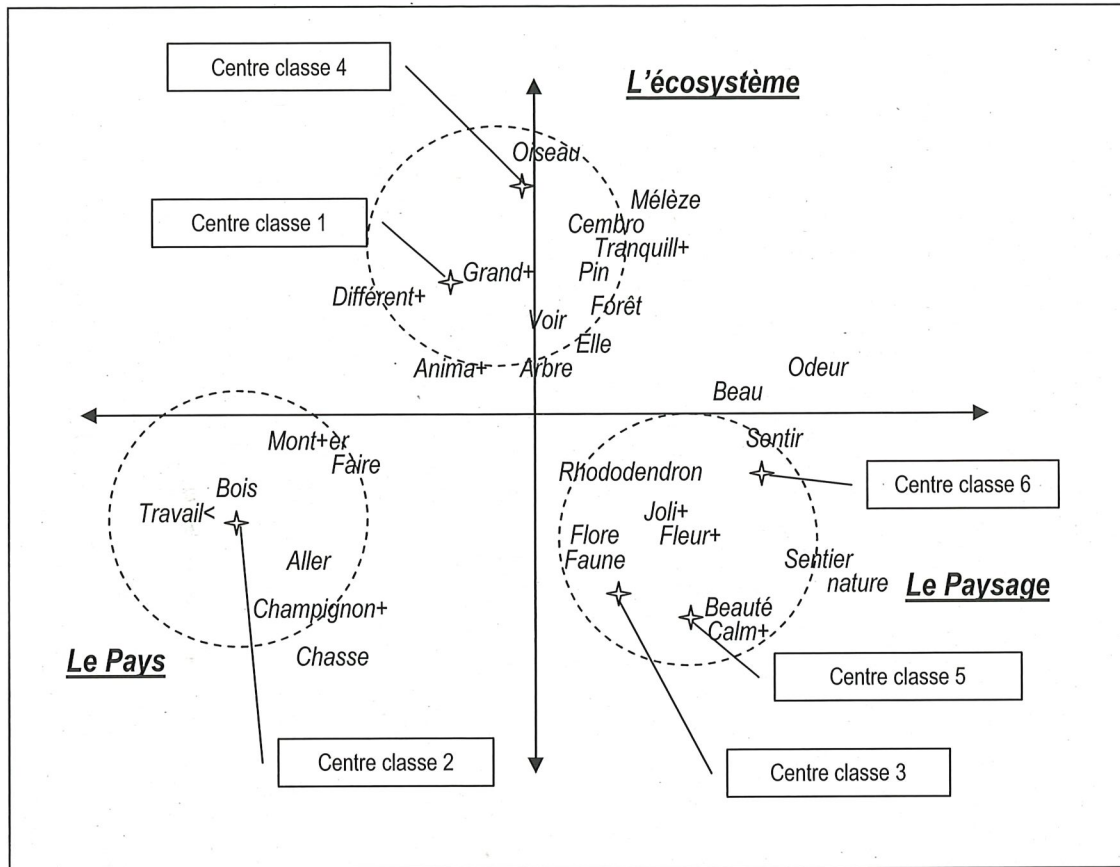


Figure 2. Analyse factorielle

### 3.1. La forêt comme « pays »

Le point de départ de cette forme réside dans le thème identifié au travers de la classe 2, c'est-à-dire le discours prononcé par les plus anciens habitants de Villarodin-Bourget, étant entendu que c'est dans le hameau du Bourget qu'ils sont les plus nombreux. Nous avons choisi de qualifier cette relation particulière de « pays » en raison du caractère pratique et concret qu'elle suggère. Bien que leur rapport à l'environnement ne soit pas exempt de considérations esthétiques, les habitants d'un « pays » accordent, en principe, une primauté à sa valeur d'usage. Même si l'habitant contemporain du vallon de l'Orgère ne saurait se confondre avec le « paysan » qui l'y a précédé, il n'en reste pas moins que la nature et la forêt demeurent perçues comme un « lieu de labeur ». Notion qui rejoint opportunément celle de « travail » employée par le plus grand nombre des habitants du Bourget pour évoquer leur rapport à la forêt.

#### Âge d'or

La forêt de l'Orgère n'est évoquée que par le détour de récits qui entretiennent la mémoire de la vie quotidienne vécue par une communauté rurale jusqu'au tournant du XX<sup>e</sup> siècle. Ces récits sont marqués par le souvenir de temps difficiles. La vie était organisée par un travail sans relâche rendu plus ardu par le climat et le relief. Un terme revient dans tous les entretiens pour symboliser cette dureté de l'existence : celui des « corvées ». Cette notion redouble celle de travail, en insistant sur son aspect pénible et obligé. Mais elle s'applique plus spécifiquement à plusieurs des domaines de l'activité rurale structurant la vie au Bourget jusqu'au début des années 60 du siècle dernier : la collecte de l'eau quand il s'agissait au printemps de restaurer les canaux creusés dans le flanc de la montagne pour irriguer les terres en contrebas ; la fabrication du pain puisqu'on ne faisait son pain qu'une seule fois toutes les trois semaines

pour toute la période ; la lessive qui consistait en un long et pénible travail pour bouillir et battre le linge de la maison, etc.

La corvée s'étend, enfin, au travail du bois. Ce travail était pratiquement continu et recouvrait différentes activités : le ramassage réalisé par les femmes et les enfants à chacun de leur passage en forêt. Les anciens racontent volontiers comment leur père fabriquait leur premier traîneau pour descendre le bois glané au sol. Il s'agissait aussi de la coupe des affouages concédés par la commune. Ceux qui ont connu cette époque rappellent les difficultés liées à la coupe qui s'est longtemps effectuée à la main avec un « passe-partout ». Il fallait ensuite tirer le tronc de l'arbre à travers la forêt jusqu'à un chemin pour le descendre au village. Même avec l'aide d'un mulet, il fallait parfois travailler, à plusieurs, plus d'un jour pour y parvenir. Autant que les récits nous permettent d'en juger, il s'agit là du travail le plus pénible de ceux qui étaient accomplis périodiquement, sans parler de l'élaboration des différents produits dérivés de ces coupes tous aussi indispensables les uns que les autres à la vie quotidienne : les outils, l'ameublement, les aménagements intérieurs, la charpente et le chauffage.

Les différents exemples retenus ont ceci de remarquable qu'ils ont tous une dimension collective : les corvées n'ont pas qu'une utilité matérielle, elles sont aussi un moyen de reproduire le lien communautaire. Les veillées forment à cet égard la topique majeure de cette représentation du collectif et le moment le plus marquant de la cohésion du groupe. Elles sont évoquées par nombre de personnes qui n'ont pas pu les connaître mais qui savent, pour l'avoir entendu dire par leurs propres parents, qu'on y racontait ce qu'on avait fait dans la journée, ce qu'on avait vu ou entendu ; que les femmes y chantaient et filaient la laine, en même temps que le fil de la « trame » communautaire. Il n'y a en vérité que les personnes les plus âgées qui ont pu y assister puisque les veillées ont peu à peu cessé à partir du lendemain de la seconde guerre mondiale. Elles se souviennent que, dans leur enfance, celles-ci étaient très régulières bien qu'elles n'eussent guère le droit d'y assister en raison de leur âge ou de leurs propres occupations.

La corvée et la veillée apparaissent ainsi comme deux thèmes qui structurent une représentation du passé qui, s'il est marqué par une certaine difficulté de vie, n'en est pas moins le moment repère d'une fondation. Dans les récits que nous avons recueillis, ces deux thèmes introduisent en général à d'autres développements autour des notions de solidarité et d'entraide : « Quand on voyait quelqu'un qui était en peine, on allait l'aider ». Cette thématique est encore extrêmement présente dans la manière dont les habitants du Bourget se représentent eux-mêmes aujourd'hui. Ce dont témoigne encore aujourd'hui le vallon de l'Orgère avec sa forêt, pour la plupart des habitants du Bourget, est bien cette construction idéale du souvenir. Une dame, qui est montée pour la première fois garder les troupeaux de son père à neuf ans en 1919, le dit très clairement : « La montagne, là-haut, c'était notre vie... Mes souvenirs, c'est tout là-haut ».

### *Les temps changent*

Ce souvenir qui structure la communauté est le contrepoint de la perception d'un changement en cours. Lorsqu'on leur demande ce qui a le plus changé au cours des dernières années dans leur village (chacun pouvant exprimer plusieurs réponses parmi les types suivants), il apparaît que parmi les réponses obtenues : 43% dénotent très clairement un déclin ; 65%, une mutation comportant autant d'aspects positifs que négatifs ; et 24%, aucun changement. Cette dernière réponse étant essentiellement le fait de jeunes gens qui veulent en réalité dire que « rien ne change jamais » à Villarodin-Bourget, traduisant ainsi un ennui caractéristique d'une certaine jeunesse en milieu rural. La perception du déclin est, en tout cas, nettement plus sensible au Bourget puisque 57% de ceux qui y vivent donnent au moins une réponse de ce type alors que 31% des habitants de Villarodin, seulement, font de même. Pour comprendre cet



écart, il faut avoir présent à l'esprit que le Bourget compte la plus grande part d'habitants des plus âgés, des plus anciens résidents originaires de la commune.

Le déclin est perçu à travers plusieurs aspects parmi lesquels figurent, en premier lieu, la déprise agricole (23% des réponses, du type : « L'agriculture meurt », « Les champs sont envahis par les ronces », etc.) et, en second lieu, un délitement social (20% des réponses, du type : « La mentalité des gens devient plus égoïste », « C'est devenu plus chacun pour soi », « Il y a moins d'entraide, il y avait beaucoup plus de solidarité, avant », etc.). À ces deux formes, s'ajoutent encore ceux de l'économie locale (17% des réponses, du type : « Les usines ont fermé, elles sont parties à Lyon », « Les commerces ont disparu », « Il n'y a plus de travail », etc.) et de la démographie (8% des réponses, du type : « La population a vieilli », « Les jeunes s'en vont », etc.). On trouve encore d'autres réponses (6%) qui évoquent, de façon moins précise, les mêmes aspects (« Avant on était plus heureux », « Les gens ne font plus leur jardin », etc.). Autrement dit, plus de la moitié des habitants du Bourget, et un peu moins du tiers de ceux de Villarodin, perçoivent leur situation d'une façon très pessimiste, caractérisée par l'imminence d'une disparition, au moins d'ordre symbolique, qui présente en tout cas tous les traits inversés de la représentation idéale autour de laquelle ils se rassemblent.

La perception du déclin se fixe particulièrement sur la nature comme si cette dernière était un miroir « réfléchissant » les aspirations et les angoisses de la communauté. L'ensauvagement de la nature, parce qu'il signifie l'effacement du travail qui y a été réalisé, est envisagé comme un scandale. La présence animale, par exemple, est un signe très révélateur d'une authentique « décadence » : « Les chamois nous font du mal, dit une nonagénaire du Bourget qui ne se rappelle pas en avoir vu dans son enfance, et les bouquetins aussi : ils viennent en bas et il y en a bien un petit peu de trop. Et les biches ? Il faut tout encercler pour qu'elles n'arrachent pas tout. Ça abîme les cultures... Ah oui, ça, les bêtes, elles font du mal ! ». De même, la forêt qui n'est pas « entretenue » meurt et, avec elle, une certaine idée de la communauté. Ces impressions étaient d'autres remarques portant sur la sécurité, comme si la nature livrée à elle-même était source de dangers : les risques liés aux avalanches, aux chutes d'arbres, aux incendies, etc. Elles justifient également des considérations aussi bien éthiques qu'esthétiques sur la culture de la nature. C'est ce que signifie l'adjectif de « propre » qui s'applique aux forêts quand elles sont accessibles, dégagées, les bois morts ôtés ; au vallon lorsque le foin est coupé et ramassé ; aux terrasses si elles sont entretenues et cultivées ; aux jardins dont les alignements au cordeau montrent la « rectitude » de ceux qui les travaillent. Dans cet univers de compréhension, est propre ce qui est beau, et beau ce qui montre une certaine « tenue » morale. Le sauvage et l'inculte sont, *a contrario*, synonymes d'« abandon ».

### 3.2. La forêt comme « paysage »

Le paysage désigne une appréhension de la nature assez paradoxale dans la mesure où elle suppose une certaine distance par rapport à l'objet tout en suggérant un moyen de combler cet écart. Son « invention » est contemporaine de celle de la modernité qui émerge lentement à partir du XV<sup>e</sup> siècle. Elle est donc, essentiellement, une création urbaine à laquelle l'art participe pleinement. La constitution de la forêt en paysage est plus tardive puisque ce n'est qu'à partir du XIX<sup>e</sup> siècle que se produit un changement significatif de son statut. Et ce n'est qu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle que la forêt de haute montagne devient à son tour un paysage : « En 1874, avec la création du C.A.F. [Club alpin français], les montagnes acquièrent de nouveaux usages. Elles deviennent un laboratoire scientifique et un "musée vert", lieu récréatif et esthétique » (Kalaora et Savoye, 1986, p. 106). Les élites urbaines, du Dauphiné ou de Savoie tout d'abord, s'approprient peu à peu les montagnes et commencent de vouloir imposer la vision qu'elles en ont.

*L'écart*

La notion de paysage recouvre assez bien le thème sous-jacent aux classes de discours 3, 5 et 6 non seulement en raison de l'univers sémantique dans lequel s'inscrivent les formes lexicales les plus remarquables de ces classes (« sentir », « beauté », etc.) mais aussi parce que le profil socio-démographique de ceux qui les prononcent présente toutes les caractéristiques d'une nouvelle « classe des loisirs » urbaine. Les enquêtes régulièrement réalisées par le PNV montrent que les deux tiers des visiteurs du parc passant par la porte de l'Orgère viennent d'autres régions que celle de Rhône-Alpes. Seuls 12% des promeneurs sont savoyards, étant entendu que la majorité d'entre eux viennent de Chambéry et ses environs immédiats. Le tableau II ci-après, issu de nos propres travaux, précise combien les randonneurs et les habitants du Bourget ne sont en effet pas du même « monde » : 63% des premiers sont issus des catégories supérieures et intermédiaires, tandis que 84% des seconds sont ouvriers ou employés. On notera incidemment que près du tiers des résidents du hameau de Villarodin présentent un profil comparable à celui des randonneurs, c'est-à-dire : sont issus des catégories supérieures ou intermédiaires et/ou ne sont pas originaires du pays et/ou y sont installés depuis une dizaine d'années tout au plus.

	Habitant Le Bourget (n = 73)	Habitant Villarodin (n= 72)	Randonneurs (n= 175)
<b>• Profession et catégorie sociale</b>			
<i>Agriculteurs.....</i>	2%	-	-
<i>Commerçants, artisans.....</i>	4%	18%	10%
<i>Cadres supérieurs.....</i>	-	12%	32%
<i>Professions intermédiaires.....</i>	10%	23%	31%
<i>Employés.....</i>	41%	37%	23%
<i>Ouvriers.....</i>	43%	10%	4%
<b>• Durée de résidence</b>			
<i>10 ans au plus.....</i>	11%	29%	
<i>Entre 10 et 20 ans.....</i>	16%	25%	
<i>Au moins 20 ans.....</i>	73%	46%	

Tableau II. Profil sociodémographique des populations interrogées

Celui qui les contemple ne peut donc lire son passé dans le vallon et la forêt de l'Orgère, et ce n'est pas la seule distance que le visiteur observe à l'endroit du paysage. Une autre est maintenue par son approche de l'environnement : la représentation dominante est celle qui est déterminée par un regard englobant. Les expressions relevées dans les entretiens qui traduisent cette saisie par le regard sont très variées : on parle, par exemple, de « spectacle », de « tableau », de « site », de « vue » ou bien encore de « cadre ». Cette appréciation du paysage suppose au moins une déambulation : les différents « tableaux » qu'offre la « scène » se succédant au rythme de la marche. Les éléments qui le composent forment une totalité que nombre de visiteurs appellent une « ambiance ». Or, parmi les éléments qui font une « ambiance », on relève tout d'abord, dans une vue très large, les sommets, les glaciers et les montagnes. Le plan se resserre ensuite sur les alpages et les chalets. Enfin, ce sont la faune et la flore qui sont un des « motifs » du décor du vallon les plus souvent évoqués. Un ingénieur parisien d'une cinquantaine d'années, photographe amateur, résume ainsi la collection des images souvenirs qu'il emporte chez lui après son passage : « Les vues, les sommets, les maisons, l'architecture alpine, les animaux : moutons, vaches... Les animaux qu'on peut



rencontrer. Les marmottes, c'est plus difficile mais de temps en temps on peut approcher suffisamment... Les fleurs. Et puis, bon, quelques fois il y a des vues un peu spectaculaires même quand il fait mauvais temps : un rayon de soleil qui arrive, un contre-jour, enfin des photos un peu bizarres. On essaie d'accrocher des choses, comme en peinture ».

La forêt n'est toutefois pas goûtée que « de l'extérieur » et le sentier qui la traverse est souvent cité comme un élément intéressant. Les enquêtes effectuées par le Parc confirment d'ailleurs cet attrait du sentier puisque 17% des personnes interrogées le citent comme une des motivations de leur passage (première motivation citée). Les panneaux d'informations qui ponctuent la visite du sentier ont ceci d'adéquat qu'ils permettent de compenser l'absence relative de « vue » dans la forêt et d'offrir à tout un chacun le moyen de « lire » l'environnement qu'il parcourt. Car, comme le précise fort justement un habitué de la forêt de l'Orgère : « Il faut savoir voir la forêt quand on est dedans.... ». Mais pour le plus grand nombre des visiteurs, ce qui fait le charme particulier de la forêt de l'Orgère tient aussi bien à la rareté des bois dans le parc que dans le fait qu'elle signifie mieux que tout autre forme de paysage une certaine idée de la nature : « La forêt, dit une femme d'une quarantaine d'années, c'est très important : ça représente la nature ».

### *Le temps retrouvé*

La distance existant entre le promeneur et le paysage qu'il contemple est réduite par l'accentuation de sa disposition esthétique, entendue au sens très large (et étymologique) de « sentir », et qui l'entraîne dans une rêverie où se confondent les souvenirs. Ces images ne sont toutefois pas, comme dans le cas du « pays », associées aux lieux particuliers qui sont visités mais s'inscrivent dans une vision plus large de l'enfance ou de l'adolescence. Tous les éléments du paysage et tous les sens concourent à cette anamnèse : « J'habite Lyon, dit un directeur d'école d'une cinquantaine d'années, donc oui, le silence. Le bruit d'ailleurs a une portée différente dans les montagnes. Je veux dire, tout gamin, il y avait quand j'arrivais en Haute-Savoie... Le souvenir que j'ai, c'est les clarines des vaches le matin ». Un peu plus loin, le même détaille l'expérience de la découverte que lui rappellent encore ses visites actuelles dans les Alpes : « [Vers 8 ans] J'ai découvert tout à fait autre chose et ça m'a énormément marqué pendant l'adolescence : une dimension différente dans les bruits, dans les paysages. Je crois que c'est une question de dimension, qui permet le rêve ». La forêt joue manifestement un rôle particulier dans la formation de la jeunesse comme pour ce Lorrain d'une soixantaine d'années, ancien ingénieur : « Je suis né dans les Vosges, alors partir dans la nature, on le faisait beaucoup quand j'étais gosse. J'aimais me balader, aller dans les bois... ».

Quand il ne s'agit pas de retrouver son enfance, certains visiteurs évoquent d'autres « racines », comme leur origine paysanne. D'autres se rappellent encore la sensation laissée par quelque poésie et qui renvoient à différentes variations romantiques. Cet état d'âme est encore souvent évoqué par des expressions comme : « se retrouver » et « se ressourcer ». Il peut s'agir de marcher avec ceux que l'on aime : visiter un tel endroit invite alors à redécouvrir des relations plus « vraies » entre amis ou membres de la même famille. Les contacts que l'on peut établir à cette occasion avec les habitants du pays sont un autre moyen d'expérimenter des relations plus « humaines » : « Les gens sont plus vrais, moins stressés, dit un Parisien d'une trentaine d'années, on fait plus attention aux autres ». Le mot clé, finalement, de cette expérience tient peut-être dans la notion d'« authentique » que l'on a souvent relevée au cours des entretiens et qui se révèle largement aussi équivoque que la « tradition » invoquée par les habitants du pays. Elle désigne une conception du soi plus originaire qui s'éprouve au contact d'une nature perçue comme « primitive ». L'expérience du temps dont témoignent les arbres est ce qui ouvre le mieux à cette perception, comme pour cet autre Parisien, quarantenaire : « Quand on voit le temps qu'il faut pour constituer une forêt, un arbre, etc. Je veux dire : on ne raisonne plus de la même façon, ce n'est plus la même échelle de temps [...] Sans être fanatique de l'authenticité, que rien ne bouge, que tout soit préservé, c'est quand même important de préserver des choses qui ont mis du temps, justement, à se faire ».



### 3.3. La forêt comme « écosystème »

L'écosystème est une sorte d'extension du paysage et le point extrême de son objectivation : la forêt, en ce sens, est comprise dans une sorte d'« en soi » autonome, non réductible à ce qu'il provoque comme souvenir ou sensation chez l'homme. Les tout premiers voyageurs du XVIII<sup>e</sup> siècle qui ont découvert les Alpes, ont gravi les montagnes avec des motivations qui se partageaient entre l'art et la science. Contrairement au romantisme classique qui place le promeneur au centre de la nature, celle-ci est alors envisagée « en elle-même » et de façon plus précise. Certains randonneurs, et ceux qui l'étudient scientifiquement, possèdent les mots pour nommer les essences d'arbres, les espèces végétales et animales ; lisent les traces et les signes de la présence animale (invisibles à l'œil inexpérimenté du simple promeneur) ; évaluent leur rareté ou, à tout le moins, leur intérêt pour la biodiversité ; et comprennent l'interaction entre les différents règnes. Leur discours est donc, de prime abord, dénotatif. Mais l'ensemble compose une totalité ou bien un être « doué de vie ». Autrement dit, si le pays est une appréhension de l'espace qui reconduit à soi, l'écosystème ouvre sur quelque chose d'absolument autre et de « grand » (l'adjectif est caractéristique de la classe 1) dont l'intuition fascine.

#### *La forêt en soi*

Au cours de notre enquête, nous avons rencontré un certain nombre de personnes qui méritent sans doute l'étiquette de « savant » en raison des connaissances qu'elles possèdent sur la nature, et en particulier sur la forêt de l'Orgère, et que l'on pourrait aussi présenter comme les héritiers de la tradition inaugurée par les sociétés naturalistes du XIX<sup>e</sup> siècle. La plupart des scientifiques interrogés ne se contentent pas de leur rôle académique mais sont également membres d'associations ou autres organisations intervenant à différents niveaux pour déterminer le « sort » de l'environnement, au moins localement. La notion d'« expert-militant » proposée par A. Micoud semble parfaitement leur convenir (2000). Cette expertise se manifeste notamment par un langage mais aussi un « point de vue » sur la forêt, et il n'est guère de ces rencontres qui ne débutent par une présentation analytique de la forêt en situation : « L'intérêt de cette forêt tient, dit ainsi un expert, dans la plus value apportée par la situation et la structure de la forêt. Ce n'est pas tant le côté biologique : c'est effectivement une forêt qui fait le plein de la biodiversité qu'on peut en attendre [...]. C'est plus sa situation : ce vallon reculé, adossé contre le parc dans un endroit qui n'est pas vierge de tout équipement [...]. Avec sa structure, c'est une forêt qui n'est pas complètement homogène ni fermée. Elle est assez clairière avec des secteurs plus denses et d'autres plus ouverts. Des ouvertures sont dues au fait que c'est un versant avec des rochers, des escarpements rocheux affleurant, quelques coulées d'avalanche... Certains de ces secteurs de clairière ont peut-être aussi une origine anthropique... ».

Certains randonneurs ne sont pas loin d'en savoir autant, sur le site, que certains des spécialistes dont il vient d'être question. Il en est ainsi de ce septuagénaire d'Annecy, ancien financier, qui dit avoir traversé le Parc de la Vanoise « dans tous les sens » depuis une trentaine d'années. Membre, entre autres associations, de celle des amis du Parc (association qui n'existe plus aujourd'hui), il possède une mémoire passionnante de l'évolution des forêts de l'Orgère et de Polset : « Bien que je ne sois pas un spécialiste des essences, dit-il, je connais les lieux et je me suis suffisamment intéressé à la nature pour suivre ». Pour lui, par exemple, la forêt de l'Orgère est exemplaire du conflit que se livrent, à cette altitude, le mélèze et le pin cembro : « Depuis les tout débuts où je suis passé, j'ai vu se développer le cembro et diminuer le mélèze. Parce que le mélèze subsiste là où il n'y a pas de cembro. C'est-à-dire qu'ils ont le même site de développement mais le mélèze a davantage besoin de soleil pour se développer et le pin cembro poussant plus vite, il lui fait de l'ombre ».

Si ce genre de visiteur reste exceptionnel, on peut en revanche rencontrer beaucoup plus fréquemment cet autre type qu'une enquête, réalisée en 1997 par la COFREMCA pour les



parcs nationaux, a baptisé le « pédagogique-découvreur ». Il s'agit de cette partie du public – un quart de ceux qui fréquentent les parcs – la plus sensible à leur mission « éducation ». Son profil ressemble d'assez près à celui de cet urbain des catégories supérieures qui a une approche « romantique » de la forêt mais ce « découvreur » nourrit un intérêt marqué pour le développement de ses connaissances dans les sciences naturelles. Un couple du Tarn-et-Garonne est ainsi venu visiter le parc de la Vanoise pour découvrir sa faune et sa flore :

- *(Elle) Nous quand on marche, c'est pour découvrir, regarder les fleurs, les oiseaux.*
- *(Lui) Ah oui, alors ça, tous les dix mètres, on s'arrête, on regarde une fleur ! Il faut qu'on la trouve sur le livre, qu'on trouve la page, qu'on la reconnaisse...*

Ce couple est habitué aux parcs nationaux : s'il dit bien connaître celui des Pyrénées, il a aussi récemment parcouru les parcs des Cévennes et du Mercantour. Ces personnes déclarent par ailleurs ne pas bien s'y reconnaître entre les différentes essences d'arbres (« Moi, dit l'homme, entre les mélèzes, les sapins, les épicéas, je m'y perds ») mais le souci d'éducation est déterminant dans le choix de leur séjour en Vanoise. On a rencontré la même préoccupation chez cet autre couple parisien qui visite pour la quatrième fois le parc de la Vanoise et le vallon de l'Orgère avec ses enfants :

- *(Elle) Ce qui nous a décidés à venir ici, c'est l'horreur des plages sur-bondées...*
- *(Lui) ...Et des papiers gras !*
- *(Elle) Et l'envie de passer des vacances utiles, enfin je veux dire...*
- *(Une des filles) ... Apprendre.*
- *(Elle) Oui, apprendre des choses, se balader, marcher.*
- *(Lui) Apprendre des choses aux enfants : ce qu'est l'environnement, respecter l'environnement.*

Comme le couple précédent, cette famille prend le soin de se munir d'ouvrages pour lui permettre de reconnaître les différentes espèces végétales mais dit aussi avoir eu recours à un guide : « Il nous a tout expliqué, il nous a montré des choses qu'on ne remarquait pas ». Nous avons d'ailleurs rencontré un de ces accompagnateurs, un Lyonnais guide de haute montagne, venu pour d'autres clients. Il confirme à sa façon le besoin qu'éprouvent pratiquement tous ses clients (« des novices qui ne connaissent pas la forêt, qui ne connaissent pas la montagne... ») d'apprendre à « lire » la nature. On doit particulièrement noter, et c'est sans doute ce qui distingue le mieux ces visiteurs de ceux dont il a été question au sujet du « paysage », que leur séjour dans ces lieux n'est pas exempt de tout « effort » : il ne s'agit pas seulement, pour eux, de se mettre « au vert », de se détendre ou même d'être en harmonie avec la nature : il faut aussi s'éduquer soi-même et/ou éduquer les autres, apprendre à connaître ou reconnaître tout ce qui y vit.

### *Le témoignage*

Le discours scientifique n'apparaît donc pas comme la seule dimension constitutive de cette expérience de l'écosystème mais le moyen le plus adéquat de justifier une certaine attitude à l'égard de l'environnement. Le mot qui revient le plus souvent pour rendre compte de cette attitude est celui de « respect », comme celui que l'on doit à l'intégrité d'un « autre ». Apprendre à nommer les plantes ou les animaux, savoir expliquer les mécanismes de leur dépendance réciproque, est un moyen d'acquérir un langage pour avoir accès à cette différence. En tant qu'elle est comprise comme un écosystème, la forêt est toujours envisagée comme le signe ou la manifestation d'une chose autre, c'est-à-dire « indépendante de nous » comme l'a dit un promeneur mais aussi cet expert-militant dans un article : « Le terme de nature est à réserver à l'ensemble des choses, des êtres et des phénomènes indépendants de notre espèce » (Lebreton, 2000, p. 33). Or cette nature impose par principe le respect et doit conduire à une certaine réserve ou, à tout le moins, une « modestie ».



L'altérité de la forêt peut prendre, dans le discours des personnes interrogées, deux « figures » récurrentes qui ont toutes les deux un rapport étroit avec l'expérience du temps. La première tient dans l'évocation du « monument ». La forêt témoigne d'un passé : elle est la trace d'un temps révolu et doit être préservée pour en entretenir le souvenir. L'argument prend, dans le contexte de l'écosystème, une signification rétrospective très longue car l'âge des arbres, cité dans tous les entretiens et tous les documents portant sur la forêt, renvoie à un temps « immémorable ». Il s'agit d'un « patrimoine » qu'ont légué les générations passées et qu'il convient de préserver au même titre que d'autres « monuments historiques ». Un expert interrogé rappelle une expérience qui a été réalisée à partir de la coupe d'un arbre et peut illustrer la manière dont la forêt peut « témoigner » : « On a exposé, dit-il, cette rondelle et effectivement, au niveau des cernes, on a pu reconstituer sur 600 ans, l'histoire de France : c'était assez impressionnant. Ce n'est pas qu'une anecdote, c'est pour vous dire combien cette forêt nous paraît importante, qu'on vient la voir de partout [...] Parce que avoir des arbres qui ont six siècles et qui ne sont pas morts, c'est quand même extraordinaire. Par conséquent, on fait tout pour conserver la forêt de l'Orgère qui est une espèce de monument de la forêt ». Cette « monumentalité » de la forêt est en tout cas l'une de ses caractéristiques souvent citées dans les documents produits par les mouvements de protection de la nature qui participent au collectif qui s'est formé pour défendre sa préservation.

La seconde acception des termes de « naturalité » et « spontanéité » s'inscrit plus résolument dans un registre intuitif : la perception d'un Être (la « Vie ») au-delà des étants qui composent l'écosystème. Sortant de ce registre strictement objectivant, pour entrer dans un ordre du discours plus esthétique, un autre expert développe ainsi les impressions que lui laisse la contemplation des formes des arbres : « Je n'en ai pas fait une analyse rationnelle mais on trouve ce côté sympa, exceptionnel et agréable dans les formes remarquables des arbres. Elles témoignent d'une certaine spontanéité ». La forme un peu « bizarre » des aroles (tout au contraire de ces fûts droits qui font la valeur des « beaux arbres » que l'on exploite) dit quelque chose sur l'adaptation de la vie végétale dans des situations limites puisque les conditions naturelles de la forêt (le climat, l'altitude, l'exposition, ...) n'apparaissent pas comme des plus favorables : elles peuvent donc évoquer une croissance « contrariée » par des éléments. Mais ces formes témoignent également de ce à quoi peuvent ressembler certaines essences lorsque, échappant à toute pression forestière, elles n'ont fait l'objet d'aucune sélection. Ce sentiment admiratif culmine à travers l'emploi de différentes métaphores. Sur le mode de l'euphémisme, il n'est pas rare de rencontrer les mots de « magique », de « merveilleux » ou de « mystère ». Ou bien, dans un autre registre, certains évoquent plus explicitement encore le « sacré » même si l'on en fait parfois mention comme d'une chose qui reste à établir : « Il faut sacrifier les limites du parc », nous dit par exemple un expert-militant. Le sacré, dans ce type de définition, peut seulement être envisagé comme la perception d'un principe. R. Hainard (1994), peintre, poète et philosophe qui inspire nombre d'experts parmi ceux que nous avons interrogés, évoque ainsi l'« infini » : « J'ai l'infini à ma portée, je le vois, je le sens, je le touche, je m'en nourris et je sais que je ne pourrai jamais l'épuiser. Et je comprends mon irrépressible révolte lorsque je vois supprimer la nature : on me tue mon infini ».

#### 4. CONCLUSION

La valeur humaine de la forêt se décline donc au pluriel : elle dépend, en dernière analyse, de sa compréhension dans différents mondes sociaux que l'on a définis comme des collectifs possédant, chacun, son langage, ses références (lieux, moments historiques, en partie réels en partie imaginés), ses manières de sentir et d'être touché. Ces mondes transcendent la seule question de leur rapport à la forêt mais en partie seulement puisque c'est bien à travers elle (et



éventuellement la controverse qui est née à son sujet) qu'ils se réalisent pleinement. La communauté des habitants du Bourget (re-)prend ainsi conscience d'elle-même en revendiquant des « droits » sur elle ; un collectif d'associations de préservation de la nature a vu le jour, *ad hoc*, pour assurer sa conservation. Sans parler des groupes de randonneurs (les plus éphémères) qui prennent forme à chaque fois que, faisant une pause réparatrice dans le refuge du vallon, ils échangent leurs impressions de paysage. Comprendre la forêt, consiste ainsi à se comprendre soi-même en élaborant, avec d'autres, un monde commun. Comme souvent dans le règne humain, cette (re)prise de conscience de soi est tout d'abord passée par le conflit : l'autre est, comme toujours dans ce cas, celui avec/contre qui on se réalise soi-même. Rien n'indique cependant que, pour différentes que soient les sensibilités exprimées dans ces trois mondes, elles soient définitivement incompatibles entre elles. C'est d'ailleurs une sorte de rapprochement qui s'est réalisée pendant la réalisation des travaux scientifiques commandés par le PNV ou, à tout le moins, de compréhension réciproque à travers la définition d'un « bien » commun. Reste à voir, dans les années à venir, si ce dialogue a permis de poser les fondations d'un « nouveau » monde dans lequel les trois précédents seraient « compris ».

### BIBLIOGRAPHIE

- COFREMCA (1997). *Fréquentation et image des parcs nationaux Écrins, Pyrénées et Vanoise : rapport d'étude 1996*. Paris : COFREMCA.
- HAINARD, R. (1994). *Et la nature ? Réflexions d'un peintre*. St Claude de Diray : C. Hesse. 236 p.
- KALAORA, B. (1993). *Le musée vert : radiographie du loisir en forêt*. Paris : L'Harmattan. 304 p.
- KALAORA, B. et SAVOYE, A. (1986). *La forêt pacifiée : les forestiers de l'École de Le Play, experts des sociétés pastorales*. Paris : L'Harmattan. 132 p.
- LEBRETON, P. (2000). La question de la nature. In : *L'écologisme à l'aube du XXIe siècle : de la rupture à la banalisation ?* : [actes du colloque "Le mythe écologiste : de la rupture à la banalisation" tenu les 19, 20 et 21 novembre 1988] / sous la dir. de Jean-Paul Bozonnet et Joel Jakubec. Genève : Georg.
- MICOUD, A. (2000). De la diversité des modes d'engagement dans la nébuleuse écologique. In : *L'écologisme à l'aube du XXIe siècle : de la rupture à la banalisation ?* : [actes du colloque "Le mythe écologiste : de la rupture à la banalisation" tenu les 19, 20 et 21 novembre 1988] / sous la dir. de Jean-Paul Bozonnet et Joel Jakubec. Genève : Georg.

