

5
MAI 2015

5
rnf
cahier

Archives environnementales et évolution des écosystèmes.

**« Etudier le passé pour
comprendre le présent
et éclairer l'avenir »**



RÉSERVES NATURELLES DE FRANCE



**1 ÈRES RENCONTRES
SCIENTIFIQUES
RÉSERVES NATURELLES
RHÔNE-ALPES**

PROGRAMME

**MARDI 19 NOVEMBRE 2013
À DIVONNE-LES-BAINS**

Archives environnementales et évolution des écosystèmes.
« Etudier le passé pour comprendre le présent et éclairer l'avenir »



5

MARS 2015

cahier rnf

Archives environnementales et évolution des écosystèmes.

**« Etudier le passé pour
comprendre le présent
et éclairer l'avenir »**

Actes des 1^{res} Rencontres scientifiques des Réserves Naturelles de Rhône-Alpes, tenues le 19 novembre 2013. Salle de congrès de l'esplanade du lac de Divonne-les-Bains (01).

RÉSERVES NATURELLES DE FRANCE

Les réserves naturelles forment le premier réseau d'espaces protégés de France métropolitaine et d'outre-mer : en nombre (plus de 300), en surface (près de 3 millions d'hectares), en diversité des paysages et milieux naturels.

Près de 700 personnes travaillent à connaître, protéger et gérer ces espaces, ainsi qu'à sensibiliser les habitants, usagers et visiteurs à leur beauté, à leur fragilité, à la nécessité de leur sauvegarde.

Mais qui sait tout ce dévouement, tout cet enthousiasme, toute cette compétence ?

Les Cahiers de RNF veulent les faire connaître et reconnaître.

Publiés depuis 2013 pour rendre compte de leurs travaux,

ils sont disponibles uniquement en version électronique et sont diffusés gratuitement.

Directeur de la publication : Arnaud COLLIN, directeur de RNF.

Rédacteur en chef : Olivier GILG, Directeur scientifique de RNF.

Coordination: Carole BIRCK (Asters), Robin MARGUIER (RNF)

Mise en page : Studio Préférences

Réserves Naturelles de France

6bis, rue de la Gouge

CS60100

21803 Quétigny - France

Tel: +33 (0)3 80 48 91 00

Fax: +33 (0)3 80 48 91 01

www.reserves-naturelles.org

ISBN : 978-2-9544868-5-7



9 782954 486857

SOMMAIRE

7 Introduction

Introduction aux 1^{res} Rencontres Scientifiques des Réserves Naturelles de Rhône-Alpes

Jacques Bordon

9 Préambule

Jean-Marcel Dorioz

13 L'évolution des écosystèmes du secteur Reculet - Crêt-de-la-Neige : Quelles implications pour la gestion à venir de la Réserve ?

Patrice Prunier

RN Haute chaîne du Jura

23 Archéologie et paléo-environnement dans la Réserve des Hauts de Chartreuse : le site de l'Aulp du Seuil à Saint-Bernard-du-Touvet (Isère)

Pierre Bintz

RN Hauts de Chartreuse

39 Evolution du paysage, du climat et des pratiques pastorales autour de la montagne d'Anterne depuis 10 000 ans

Charline Giguet-Covex

RN Sixt-Passy

49 Modélisation de la dynamique de l'écotone forêt-prairie dans la Réserve Naturelle des Hauts Plateaux du Vercors : implications pour la gestion conservatoire

Philippe Choler

RN Hauts plateaux du Vercors

61 Evolution de la végétation du marais de Lavours (Ain, France) à quarante-cinq ans d'intervalle (1967-2012)

Alexis Mikolajczak

RN Marais de Lavours

77 Reconstitution dendrogéomorphologique de la dynamique récente d'un cône torrentiel : le torrent des Glacières (RN des Hauts de Chartreuse)

Laurent Astrade

RN Hauts de Chartreuse

91 La Réserve Naturelle du Luitel, ou l'autobiographie de la Nature

Frédéric Guiter

RN lac Luitel

113 Conclusion

Nouveaux regards sur le vivant : de la protection à la gestion

Jacques Blondel

5

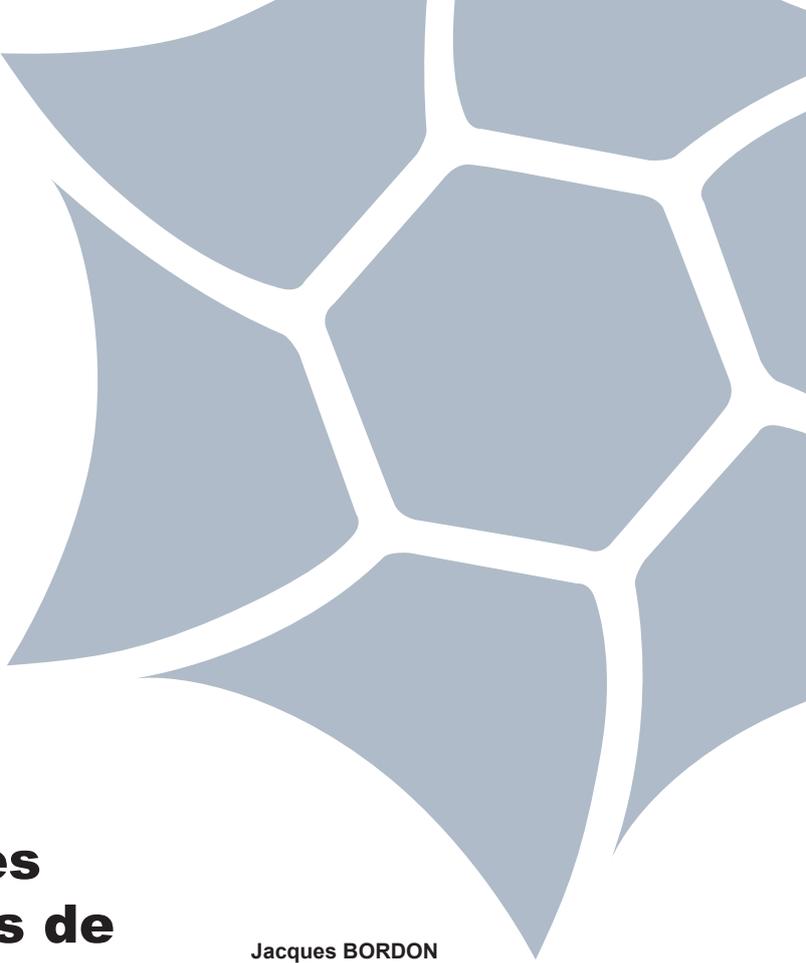
MAI 2015

cahier rnf

Remerciements

Cet ouvrage n'aurait pu voir le jour sans la ténacité de Carole Birck (Asters), la proposition et le soutien technique de RNF qui a souhaité valoriser le travail présenté lors de ces 1ères journées de rencontres scientifiques.

Que tous les contributeurs de cet ouvrage soient remerciés et trouvent dans la publication de ce numéro des cahiers de RNF l'occasion d'une valorisation et d'un partage de connaissances trop souvent méconnues des gestionnaires d'espaces protégés.



Introduction aux 1^{res} Rencontres scientifiques des Réserves Naturelles de Rhône-Alpes

Jacques BORDON
Président du Conseil Scientifique
de la RNN de la Haute-Chaîne du Jura

L'idée de ces rencontres est issue,

- D'une part, de la constatation que les résultats des travaux de recherches réalisés sous l'égide des conseils scientifiques des RN restent, trop souvent, confinés dans des rapports internes (littérature grise) ou sont publiés dans des revues scientifiques d'accès restreint.
- D'autre part, de l'opportunité de la mise en œuvre d'une étude pluridisciplinaire sur la Haute-Chaîne du Jura, réunissant des chercheurs de plusieurs universités et centres de recherches régionaux. Ce travail est consacré à l'étude des modifications environnementales constatées depuis 50 ans sur la partie sommitale de la Haute-Chaîne jurassienne.

A partir de là, il nous a semblé intéressant de promouvoir une confrontation des travaux réalisés sur le même thème dans les différents espaces protégés Rhône-Alpins, à savoir : ***Comment l'analyse des archives environnementales permettent-elles de comprendre l'évolution des écosystèmes jusqu'au présent et comment peut-on envisager leur avenir ?***

Les communications de cette journée s'inscrivent toutes dans cette problématique.

Ces 1^{res} Rencontres se placent également, comme une première initiative visant à rapprocher les conseils scientifiques des réserves naturelles de Rhône-Alpes, dans le but de permettre des échanges d'expériences, de protocoles et de résultats, afin que chacun profite au mieux des acquis obtenus par d'autres sur d'autres sites. Nous souhaitons que cette démarche initiale soit suivie par d'autres dans l'avenir, sous des modalités à définir.

Enfin, la date, 19 novembre 2013, et le lieu, Divonne-les-Bains, au pied

de la Haute-Chaîne du Jura, ont été choisis pour s'inscrire dans les manifestations qui ont entouré le 20^e anniversaire de la RNN de la Haute-Chaîne du Jura.

Quant à la forme qu'ont pris ces rencontres, nous avons souhaité qu'aux communications orales soient associées des présentations plus techniques ou méthodologiques sous forme d'ateliers :

- Dendrochronologie
- Palynologie
- Observatoire climatique

Ou de films relatant des expériences particulières.

Nous avons laissé à Jacques Blondel, notre grand témoin, le soin de conclure cette journée, avec le brio que nous lui connaissons.

Cette journée a été filmée et a fait l'objet d'un DVD proposant l'intégralité des différentes conférences et ateliers.



© Julien Heuret - garde Asters



Préambule

Il peut sembler paradoxal que les comités scientifiques de deux Réserves Naturelles, comités dont l'objet est de traiter de problèmes de gestion, d'espèces protégés, de pressions humaines, de sur-fréquentation, voire de pollution... choisissent comme thème de réflexion de leur premier séminaire commun : la reconstitution des paléo-environnements régionaux. La surprise face à ce choix est légitime : en effet, on peut se demander ce qu'apportent ces reconstitutions à « l'écologie » ? L'étude historique des écosystèmes se justifie d'emblée par le fait que les écosystèmes actuels résultent d'écosystèmes plus anciens dont ils sont parfois une prolongation. La continuité peut incorporer un héritage dont il faut identifier le contenu et l'éventuel effet sur les fonctionnements actuels. Cet héritage fait de biodiversités et d'états de milieux (stocks d'éléments nutritifs ou de composés écotoxiques conservatifs, par exemple) est assez durable. Dambrine *et al.*, (2007) montrent que 1500 ans de forêts et de sylviculture n'ont pas effacé le signal agricole gallo-romain antérieur au développement de Chênaies : les sols, dans leur structure et leur fertilité, la diversité floristique et entomologique, se distinguent encore en fonction des anciens parcellaires. Bien entendu les pressions anthropiques les plus récentes, si elles dépassent en intensité les précédentes, peuvent effacer ou atténuer cette mémoire.

Dans nos régions alpines, l'histoire des écosystèmes ne commence qu'à la fonte de glaciers, soit au maximum il y a 10-12000 ans (évidemment celle des espèces qui les constituent commencent bien avant !). Nos plus vieux écosystèmes sont des jeunots à l'échelle de l'histoire de la biosphère. Les pressions humaines qui ne les affectent sérieusement que depuis 2 à 3000 ans, se sont généralisées et intensifiées dans les deux derniers siècles voire au cours des dernières décennies. Il convient donc de porter une attention particulière à ce passé récent mais sans pour autant négliger des événements plus anciens tels que les grands défrichements (pour la mise en valeur agricole et pastorale des terres), les périodes climatiques exceptionnelles et contrastées (petit âge glaciaire, optimum médiéval), les catastrophes naturelles à impacts puissants mais localisés ou encore les périodes

Jean-Marcel Dorioz
(INRA)

Président du Comité Scientifique des Réserves naturelles de Haute-Savoie

particulièrement troublées de l'histoire humaine (guerres et pestes médiévales modifient temporairement le milieu et le paysage au point d'être identifiables dans les diagrammes polliniques, Gauthier et Richard, 2008). Le passé est aussi marqué par les premiers impacts humains globaux comme la dissémination environnementale du plomb en relation avec son exploitation à l'époque romaine (une « paléo-pollution » repérable dans les sédiments de nos lacs de haute montagne, Arnaud *et al*, 2010).

L'objectif et la portée générale des travaux de recherche en paléo-environnement va au-delà de la simple description des événements historiques tels que ceux cités ci-dessus. Il s'agit aussi de :

- 1) comprendre la réponse des écosystèmes à divers types d'évènements et de pressions, de nature, de durée et d'intensité différentes,
- 2) caractériser la trajectoire générale des milieux soumis à cette variabilité des facteurs environnementaux ce qui peut aider à expliquer les distributions de biodiversité observées dans nos milieux et à mieux cadrer des éventuels états de références,
- 3) identifier des processus écologiques ne se développant que sur des temps longs, (des temps plus longs que les programmes de recherche ou de suivis actuels !!). Les progrès de la connaissance en écologie sont donc partiellement tributaires de ces analyses historiques.

Trois grandes idées se rattachant à ce contexte général ressortent, me semble-t-il, des conférences présentées dans ce séminaire :

- 1) La forte variabilité des paysages du passé, y compris du passé récent, avec des dynamiques faites d'extension et de rétraction des habitats, notamment en espace pastoral.
- 2) Les répercussions actuelles, sur des habitats à sauvegarder, de transformations ayant lieu avant et ailleurs dans le paysage (cas des marais qui subissent les aménagements hydrologiques antérieurs de leurs bassins versants).
- 3) La grande extension spatiale des pressions humaines anciennes, y compris en haute montagne (alpage) et en forêt : malgré les apparences, dans des milieux perçus comme quasi naturels, l'état actuel résulte en partie des impacts de pratiques d'exploitation anciennes et/ou récurrentes, ceci parfois pour le pire mais parfois aussi pour le meilleur en terme d'habitat et de biodiversité.
- 4) La lenteur relative de certains processus écologiques comme la recolonisation forestière en montagne ; leur étude nécessite un recul historique que peu de travaux en écologie intègrent.

Alors concrètement ?

Faire l'histoire des écosystèmes ne sert donc surtout pas à définir un passé qui serait, en première analyse, un âge d'or et une référence d'avant l'anthropisation actuelle. Comprendre le passé, au delà du simple plaisir de la connaissance, donne accès à des connaissances inédites sur les réponses de nos écosystèmes à toute une gamme de contraintes et de variabilités, sur leurs dynamiques. De telles informations sont une contribution précieuse à la réflexion sur les conséquences des changements environnementaux actuels (mais

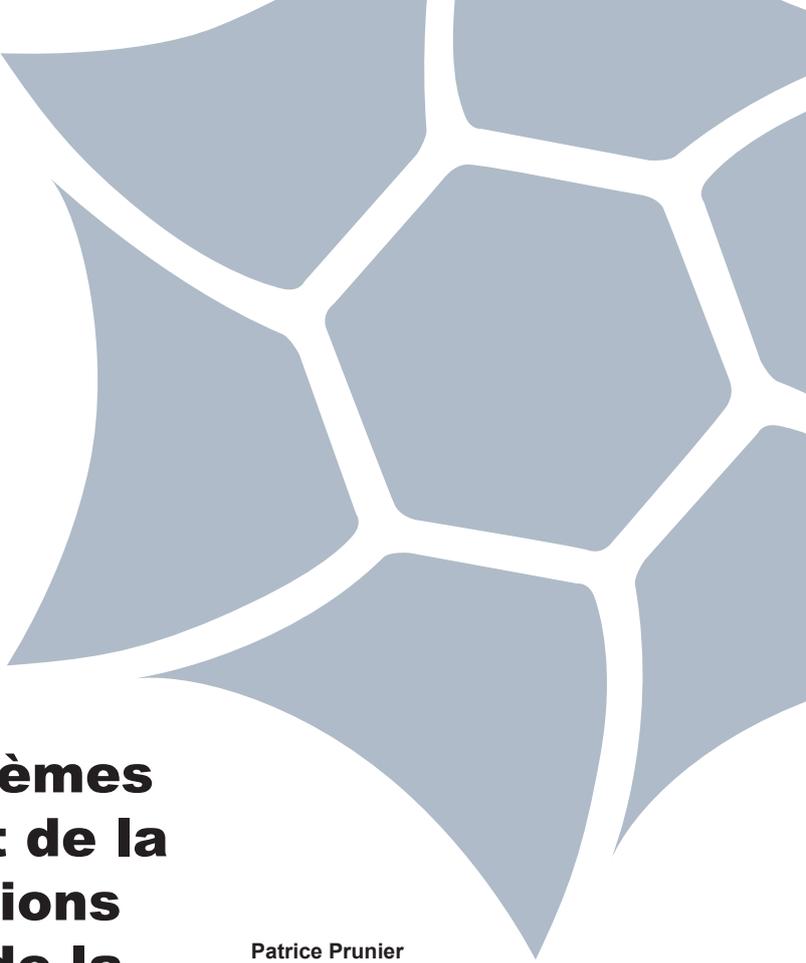
sans jamais oublier que les changements en cours sont sans commune mesure avec ceux du passé, en terme d'intensité et surtout de rapidité, voir Blondel, 2012).

ARNAUD F. *et al*, 2010. « Une pollution métallique antique en haute vallée de l'Arve », *ArcheoSciences*, 34, 197-201.

BLONDEL J., 2012. *L'archipel de la vie*. Buchet Chastel edit. Paris 256p.

DAMBRINE E., DUPOUEY J.L., LAÛT L. HUMBERT L., THINON M., BEAUFILS T, RICHARD H., 2007. Biodiversity patterns in present French forests related to former Roman agriculture. *Ecology* 88, 1430-1439.

GAUTHIER E. ET RICHARD H., 2008. L'anthropisation du massif jurassien bilan des données palynologiques. Collection EDYTEM - n 6 - Cahiers de Paléoenvironnement.



L'évolution des écosystèmes du secteur Reculet-Crêt de la Neige : quelles implications pour la gestion à venir de la Réserve ?

Patrice Prunier
Daniel Béguin
Fanny Greulich
Jane O'Rourke

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève, Suisse

Charles Tercier

Laboratoire romand de dendrochronologie de Moudon, Suisse

INTRODUCTION

Les récents travaux menés sur le secteur du Reculet-Crêt de la Neige ont eu principalement pour objectif d'actualiser la cartographie de la végétation. Une première analyse comparée de deux états du tapis végétal à près de 40 années d'intervalle (1972 / 2008) a montré une évolution significative de plusieurs unités végétales. Cette évolution semble a priori fortement liée aux modifications des pratiques pastorales et marquée de l'empreinte des ongulés sauvages (Prunier *et al.*, 2009). Dans ce contexte évolutif, ces investigations ont également soulevé plusieurs interrogations concrètes : les effectifs des espèces les plus rares et vulnérables se maintiennent-ils ? Quelle a été l'évolution du cheptel estivé et son influence sur les milieux ? Quels sont les effets de la faune sauvage sur le tapis végétal ? Le taux de boisement des crêtes a-t-il également évolué ? Comment évaluer l'état de conservation et l'évolution future de ces milieux naturels au regard de ces différents aspects ? En définitive quels indicateurs de l'état de conservation prendre en compte lors de la mise en place d'un système de suivi intégré de la biodiversité écosystémique (composition spécifique, structure et fonctions) (Maclaurin & Sterelny, 2008) ?

Consécutivement à l'analyse du comité scientifique de la Réserve Naturelle il est apparu que seul un projet ambitieux, global et interdisciplinaire, mobilisant plusieurs compétences scientifiques, permettrait de répondre à ces interrogations. Ainsi, le projet Reculet-Crêt de la Neige a pour but, outre de cerner les causes et les modalités d'évolution des écosystèmes pastoraux du secteur, de tester la faisabilité de la mise en place d'un système de suivi global de ces écosystèmes.

1. L'évolution de la végétation

L'étude comparative préliminaire de la végétation réalisée en 2008 a montré une évolution significative de la nature du tapis végétal dans certains secteurs du site du Reculet-Crêt de la Neige (Prunier *et al.*, 2009). Ce sous-projet a pour objectif de quantifier cette évolution en répondant aux questions suivantes :

- La composition en espèces des associations végétales herbacées a-t-elle évolué ?
- Ces associations sont-elles colonisées par les arbres et arbustes ?
- Quelle est la nature de l'évolution du climat et ses éventuelles répercussions sur la microbiologie des sols et du tapis végétal ?

2. Les espèces à valeurs patrimoniales

Dans la mesure où chaque population d'espèce menacée est liée à l'association de caractéristiques physiques et biologiques au sein d'un écosystème spécialisé, il s'agit, dans ce sous-projet, d'utiliser les espèces remarquables comme des indicateurs pertinents de l'évolution de l'état de conservation de ces écosystèmes. Le choix de ces indicateurs, qui éclaireront la démarche conservatoire à venir, permettra de mettre en évidence un éventuel lien entre nature des communautés végétales et intérêt conservatoire des espèces, à l'échelon éco régional. Il s'appuiera sur l'inventaire des espèces remarquables de la réserve (Prunier, 2001 ; 2003 & 2004). Une stratégie de conservation de ces espèces pourra ensuite être élaborée en s'appuyant sur l'analyse de la biologie et de l'écologie ces espèces remarquables comme par exemple l'orobanche du seséli (Duvoisin, non publ.) ou la grassette de Reuter.

Les taxons rares et vulnérables pour lesquels la Réserve Naturelle de la Haute-Chaine du Jura a un rôle important de conservation sont-ils en phase de régression ? Nécessitent-ils une démarche active de conservation et une adaptation du plan de gestion ?

3. L'évolution des pratiques pastorales

Les alpages de la Réserve Naturelle occupent principalement les sommets déboisés de la Haute Chaîne et s'étendent entre 1'150 et 1700 m d'altitude. Afin d'analyser les influences soupçonnées des pratiques pastorales sur l'évolution de la végétation, il apparaît nécessaire de caractériser les modifications des pratiques pastorales survenues lors de ces 40 dernières années. Quelle a été l'évolution de la charge pastorale moyenne depuis 1972 ? Quelle a été l'importance du cheptel ovin sur cet espace ? Quels ont été les modes de conduites des troupeaux durant cette époque et les secteurs pâturés ? Cette approche s'inscrit dans une démarche d'élaboration d'un plan de gestion intégrée avec, dans ce cas, un volet « historique » très important. Une connaissance précise des pratiques passées et de leur impact sur la végétation doit permettre d'atteindre les buts fixés par le plan de gestion de la Réserve.

4. L'influence des ongulés sauvages

L'influence des ongulés sauvages sur les écosystèmes herbacés est de nature et d'importance variable. Elle peut être directe, en favorisant par exemple la dispersion des graines ou en consommant certaines parties de la plante (feuilles, tiges ou écorçage des ligneux), mais aussi indirecte, en modifiant les caractéristiques physico-chimiques des sols parcourus. L'analyse de la présence des ongulés sur le site du

Reculer-Crêt de la Neige est envisagée ici comme une contribution à la compréhension de l'utilisation de l'espace et du régime alimentaire du sanglier et du chamois. En effet, cet axe permettra de mieux comprendre les effets des boutis de sanglier sur le tapis végétal : quels sont les types de végétation et les surfaces concernés ? Quelle est la durée de cicatrisation du tapis végétal ? Comment les ongulés sauvages et domestiques se partagent-ils ces espaces ? Implicitement, cet objectif est indissociable d'une connaissance plus approfondie de la biologie des espèces qui les génèrent. L'utilisation de colliers émetteurs ou l'observation comparée sur des secteurs de référence pourrait être mise en œuvre.

5. L'évolution du paysage ancien

L'étude de l'évolution du paysage ancien (- 15 000 B.P. à 1960) a pour but d'identifier les changements affectant les paysages au cours du temps sous l'influence de facteurs naturels (climat, hydrologie) et anthropiques (agriculture, foresterie, habitat, utilisation de l'eau).

Les thèmes abordés en Haute-Chaîne sont plus spécifiquement ceux de la végétation, de la faune vertébrée, des pratiques pastorales et forestières et de l'habitat. Pour cela deux méthodes sont mises en œuvre.

1 - L'analyse des pollens piégés dans les couches du sol permet d'identifier les paysages végétaux jusqu'à une période très ancienne comme la dernière glaciation de Würm (-15 000 BP.) - un seul sondage palynologique a actuellement été effectué sur la Haute-Chaîne (Wegmüller, 1966).

2 - L'évolution de l'habitat au travers des matériaux utilisés permettrait également de mieux cerner l'impact sur les écosystèmes contemporains, mais également d'identifier aussi précisément que possible les modes de vies et les pratiques depuis les premiers défrichements.

L'évolution de l'habitat est à mettre en relation avec celles des pratiques : le pastoralisme et la foresterie sont évidemment les deux usages qui ont le plus modifié le paysage. Ces deux thèmes sont à compléter par une approche ethnobotanique et cynégétique historique dans la mesure où le prélèvement des végétaux comme celui du gibier, est susceptible d'influencer le paysage.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Dans le cadre de ce vaste projet, les auteurs ne présentent ici à titre d'exemple que deux démarches conduites dans le cadre du volet 1 relatif à l'évolution de la végétation. Il s'agit de :

- l'évolution de la végétation ligneuse ;
- le suivi de l'évolution du microclimat et ses répercussions sur le tapis végétal.

1. L'évolution de la végétation ligneuse

L'objectif de ce volet est d'analyser la nature de l'évolution de la végétation ligneuse des crêtes du Crêt de la Neige, et plus particulièrement la vitesse de croissance et la distribution spatiale du pin à crochets (essence forestière dominante du secteur d'étude). Afin d'atteindre cet objectif, trois parcelles de 100 m², représentatives de situations contrastées (orientation du versant et lien avec le pâturage) dans lesquelles une régénération du pin est présente, ont été étudiées. Leur localisation est précisée dans le Tableau 1.

Tableau 1 : référencement géographique des 3 parcelles de pins à crochets étudiées.

Code station	Nom station	Air	Sol	Point GPS 31 T UTM	Point GPS 31 T UTM	Altitude (m)
Log 6	Crêt de la Neige, sommet - Nord	+	+	0726599	5128416	1695
Log 9	Crêt de la Neige – Sud-Est	+	+	0726213	5127685	1646
Log 7	Crêt de la Neige, couloir - Nord-Ouest	+	++	0726453	5128527	1591

+ : présence de loggers, si ++, 2 loggers posés sur cette station.

Dans chacune de ces parcelles, tous les arbres visibles à partir du stade de plantule ont été cartographiés et mesurés afin d'évaluer leur âge et leur croissance annuelle (sur la base des accroissements annuels observés pour ces dernières années à partir de la morphologie des branches et de leurs ramifications). Six pins d'une hauteur de 100 à 150 cm ont ensuite été prélevés avec l'aide des gardes de la Réserve afin de procéder à leur analyse détaillée en laboratoire. Le comptage du nombre de cernes à la base a notamment permis d'en connaître l'âge exact, et par là même leur accroissement annuel moyen. Pour compléter ces données sur les pins de taille moyenne, nous avons procédé au carottage dendrologique de cinq pins représentatifs du peuplement adulte dans chacun des sites, afin d'en connaître l'âge moyen sur la base d'un comptage de cernes. Des mesures effectuées avec l'appui du Laboratoire romand de dendrochronologie de Moudon ont par ailleurs permis de documenter les variations de croissance de ces arbres au fil des ans. Les premiers résultats ont pu être présentés dans le cadre des premières rencontres scientifiques des Réserves naturelles Rhône-Alpes à Divonne.

2. Le suivi de l'évolution du climat et ses répercussions sur le tapis végétal

Le but de ce volet est de suivre l'évolution stationnelle de la température de l'ensemble des unités de végétation analysées dans le cadre de ce projet, et, plus globalement de contribuer à identifier les conditions écologiques de l'ensemble des stations suivies dans les différents volets du projet. Des capteurs thermiques (HOBO data logger U22-001, Onset, Mass., USA) enregistrant toutes les demi-heures les températures de l'air et du sol, ont été posés sur les sites d'étude. Ces capteurs sont protégés dans un boîtier blanc à l'air libre (afin d'éviter l'échauffement par l'insolation directe) et noir dans le sol. Plus précisément, l'évolution de la température de l'air et du sol a pu être enregistrée sur les sites suivants:

- des placettes de jeunes forêts de pins à crochets afin d'évaluer l'incidence de la température sur la vitesse de croissance de cet arbre (voir Tableau 1).
- des écosystèmes herbacés de référence (associations végétales types pour la plupart décrites du haut Jura) afin d'évaluer dans quelle mesure l'évolution thermique est différenciée ou non, selon la nature même de ces écosystèmes (voir Tableau 2) :

Tableau 2 : référencement géographique des associations végétales types du Haut Jura

Code station	Nom station	Air	Sol	Point GPS 31 T UTM	Point GPS 31 T UTM	Altitude (m)
Log 2	Crêt de la Neige, canyon, pelouse - Caricetum ferrugineae	+	+	0726714	5128417	1681
Log 3	Crêt de la Neige, canyon, falaise – Sileno-Cystopteridetum	+		0726713	5128411	1682
Log 5	Crêt de la Neige, canyon, adret – Seslerio-Arctostaphyletum	+	+	0726700	5128414	1686
Log 6	Crêt de la Neige, sommet – Pulsatillo-Anemonetum	+	+	0726599	5128416	1695
Log 11	Reulet, col Thoiry – Plantagini-Caricetum	+	+	925'831	6'577'589	1650
Log 12	Reulet, Thoiry derrière – Veratro-Cirsietum	+	+	925'641	6'577'581	1600
Log 10	Crêt de la Neige, sud – Alchemillo-Deschampsietum		++	0726161	5127856	1671

– de stations de combe à neige riche en espèces arctico-alpines à très faible extension surfacique, qui apparaissent comme des communautés sentinelles dans un contexte de réchauffement climatique (Tableau 3) :

Tableau 3 : référencement géographique des combes à neige du Haut Jura

Code station	Nom station	Air	Sol	Point GPS 31 T UTM	Point GPS 31 T UTM	Altitude (m)
Log 1	Grand Crêt, combe à Sibbldia procumbens	+	+	0726846	5129192	1653
Log 4	Crêt de la Neige, canyon nord	+	+	0726697	5128408	1678
Log 7	Crêt de la Neige, couloir nord-ouest	+	++	0726453	5128527	1591
Log 10	Crêt de la Neige, sud		++	0726161	5127856	1671

RÉSULTATS

1. L'évolution de la végétation ligneuse

La surprise fut de taille en découvrant les âges des pins dans les différents secteurs et les variations observées en fonction des conditions stationnelles. Dans le cas des pinèdes à lycopes (station 3), ce sont des pins à croissance très lente (hauteur de +0,4 cm en moyenne/an) qui nous ont révélé des âges très importants (max. 102 ans) pour des tailles restant modestes (1,30 m). Dans ces mêmes conditions, les arbres adultes carottés à 1,30 m de hauteur ont révélés des âges pouvant aller jusqu'à 249 ans. Ainsi, si l'on rajoute la centaine d'années

nécessaire pour gagner ce premier 1,30 m de hauteur, ces arbres ont sans doute un âge avoisinant les 350 ans. Dans ce contexte, l'essentiel des arbres mesure moins de 1,50 m de haut avec une densité proche de 1 pin/m²; ceci toutes classes d'âge confondues.

Par contraste, en versant Sud-Est (station 2), on observe une densité de pins deux fois moins grandes (0,4 pin/m²), qui se démarquent en revanche par des croissances fortes (hauteur +10 cm en moyenne/an). Dans ces conditions, bien que la plupart des arbres se trouvent entre 0,50 m et 2 m de hauteur, ils ne sont guère âgés (âge maximum de 22 ans) et traduisent une dynamique pré-forestière forte. La relative homogénéité dans les âges des arbres de ce secteur laisse à penser que leur installation aurait fait suite à un changement de pratique pastorale (arrêt de l'exploitation par les ovins en 1973 ? ultérieurement ?). Les pins auraient ainsi trouvé, dans ce secteur non loin de la crête, des conditions soudainement favorables pour germer au sein d'une strate herbacée peu ou pas impactée par l'activité du bétail, puis rapidement prendre le dessus et se développer en l'absence de concurrence. Dans ces secteurs-là, il est ainsi fort possible que l'image paysagère évolue de façon significative au cours des prochaines décennies ; des différences étant déjà nettement visibles entre 2008 et 2013. L'âge des arbres adultes mesurés ici atteint un maximum de 218 ans à 1,30 m de hauteur. Dans les conditions intermédiaires du haut de versant Nord (station 1), hors pinède à lycopes, nous constatons l'apparition de quelques épicéas au stade de plantules, alors que les valeurs observées pour l'accroissement annuel des pins est relativement important (hauteur +7 cm en moyenne/an), dans des densités somme toute moindre (0,3 pin/m²) par rapport aux deux autres parcelles.

L'ensemble de ces résultats sont synthétisés dans le tableau 4.

Tableau 4 : croissance des pins à crochets - premiers résultats.

Référence station	Adultes : âge (min.-max.) (hmes = 1 m)	Adultes : croissance radiale (mm/an)	Recrû : âge (min.- max.)	Recrû : croissance en hauteur (cm/an)	Recrû : croissance radiale 2013 état fin juin
Station 1 (som.-N) Log 6	48-227 ans	0,73 mm	19-31 ans	10,8 cm/an	en cours
Station 2 (S.-E.) Log 9	78-218 ans	0,91 mm	15-22 ans	8,7 cm/an	en cours
Station 3 (N.-O.) Log 7	117-249 ans	0,58 mm	56-102 ans	1,1 cm/an	non débuté

2. Le suivi de l'évolution du climat et ses répercussions sur le tapis herbacé

Le recueil des données 2013 représente 344 jours d'enregistrement de la température toutes les 30 minutes sur 10 stations. Si quelques déconvenues sont apparues : perte de deux enregistreurs liée à des phénomènes de reptation de la neige et du sol (log 5 sol et log 8 sol), le réseau de capteurs est suffisamment dense pour présenter des premiers résultats sur une année. Les données de base ont été compilées et sont présentées dans les Tableaux 5 et 6.

L'évolution des températures moyennes journalière est représentée dans les Figures 1 à 4.

Tableau 5 : Synthèse des données des enregistreurs de la température de l'air

	Nb de jours mesurés	Nb jours >4.00	Nb jours >0.00	Min	Max	Moy. T° pendant 344 jours	Date de déneigement	Date du 1 ^{er} gel	Période de végétation (en jours)	Moy. T° pendant période de végétation	Amplitude pendant période de végétation
Grand Crêt station Sibbaldia. Log 1	344	111	123	-12.35	16.72	2.37	02.07.2013	10.10.2013	101	8.28	15.21
Canyon nord - station P. reuteri. Log 2	344	109	125	-9.30	18.51	3.22	02.07.2013	10.10.2013	101	10.79	17.77
Canyon nord – falaise ubac. Log 3	344	145	202	-3.05	16.33	4.20	28.04.2013	10.10.2013	166	8.19	17.42
Canyon nord – Creux aval. Log 4	344	119	316	-8.34	20.50	3.74	18.06.2013	10.10.2013	115	10.46	20.42
Canyon nord - adret amont station P. reuteri. Log 5	344	163	250	-10.26	23.17	4.97	19.04.2013	10.10.2013	175	9.96	23.92
Crêt de la Neige-station 1 pin. Log 6	344	147	179	-9.05	20.28	4.35	06.05.2013	10.10.2013	158	9.86	20.98
Crêt de la Neige, N.-O. - station 3 pin. Log 7	346	131	155	-8.50	20.16	3.31	04.06.2013	10.10.2013	129	10.52	20.11
Crêt de la Neige falaise sommet. Log 8	344	146	193	-7.88	19.54	3.81	29.04.2013	10.10.2013	165	8.63	20.26
Crêt de la Neige, sud – station 2 pin. Log 9	344	143	234	-9.07	20.18	4.70	14.05.2013	10.10.2013	150	10.39	21.62

Tableau 6 : Synthèse des données des enregistreurs de la température du sol

	Nb de jours mesurés	Nb jours >4.00	Nb jours >0.00	Min	Max	Moy. T° pendant 344 jours	Date de déneigement	Date du 1 ^{er} gel	Période de végétation (en jours)	Moy. T° pendant période de végétation	Amplitude pendant période de végétation
Grand Crêt station Sibbaldia. Log 1	344	85	119	-5.68	10.16	1.56	10.07.2013	10.10.2013	93	4.94	9.96
Canyon nord - station P. reuteri. Log 2	344	111	325	0.00	14.45	3.25	03.07.2013	10.10.2013	100	9.74	14.32
Canyon nord – Creux aval P. reuteri. Log 4	344	114	321	-1.83	14.41	3.07	21.06.2013	10.10.2013	112	8.30	14.26
Crêt de la Neige-Station 1 pin. Log 6	344	152	344	0.26	15.14	5.18	05.05.2013	10.10.2013	159	9.01	14.81
Crêt de la Neige N.O. - station pin 3 sol. log 7	346	118	147	-2.36	8.45	2.07	12.06.2013	10.10.2013	119	5.72	7.86
Crêt de la Neige, N.-O - station pin 3 humus. log 7	346	112	152	-2.72	8.66	1.92	10.06.2013	10.10.2013	121	5.32	8.39
Crêt de la Neige, sud-est – station 2 pin. Log 9	344	149	344	0.20	15.98	5.36	15.05.2013	10.10.2013	149	10.00	15.47
Crêt de la Neige sud – Combe à neige. Log 10	344	92	291	-2.64	11.40	2.31	13.07.2013	10.10.2013	90	7.66	11.35
Crêt de la Neige sud – Scillo-Poetum. Log 10	344	143	344	0.02	13.47	4.13	04.06.2013	10.10.2013	129	9.45	13.45

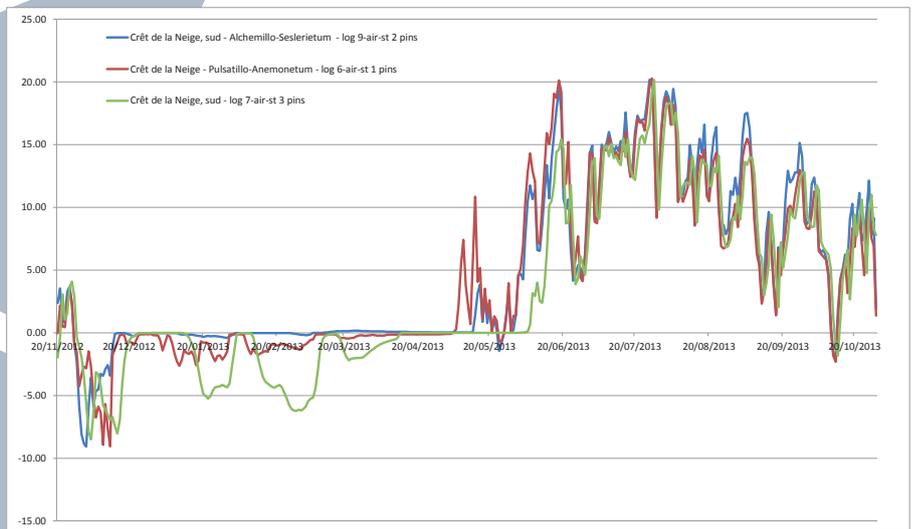


Figure 1 : évolution de la température de l'air (moyenne journalière) sur les stations de pins étudiés

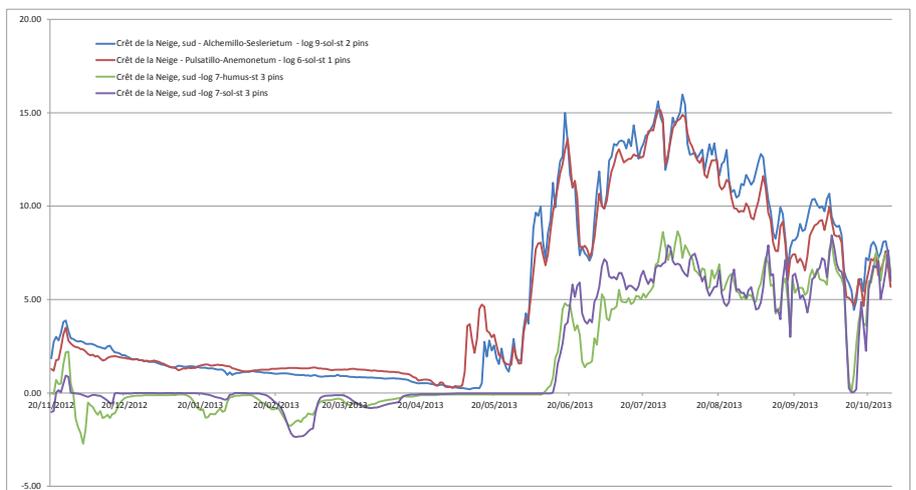


Figure 2 : évolution de la température du sol (moyenne journalière) sur les stations de pins étudiés

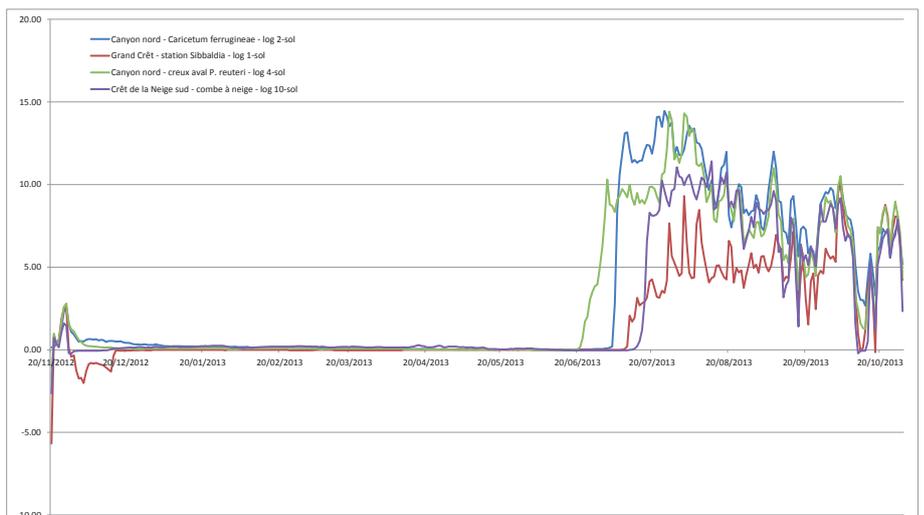


Figure 3 : évolution de la température du sol (moyenne journalière) dans les combes à neige

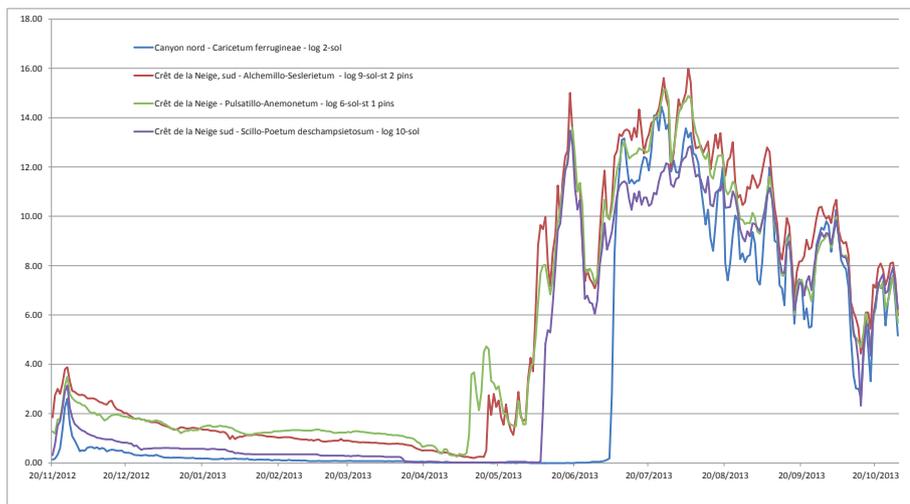


Figure 4 : évolution de la température du sol (moyenne journalière) de 4 écosystèmes herbacés

Les résultats pour l'année 2013 montrent des dates de déneigement entre mi- et fin avril (19 au 29 avril) pour la plupart des écosystèmes herbacés. Marqués par des accumulations importantes, les dépressions ont été dégagées beaucoup plus tardivement entre la mi-juin et début juillet (18 juin – 2 juillet). Seule la profonde dépression située au sud du canyon du Crêt-de-la-Neige a été marquée par un déneigement début aout (site non suivi thermiquement).

La période de végétation oscille entre 100 et 175 jours, soit plus de deux mois d'écart à la même altitude pour des écosystèmes situés à 20 mètres de distance (par exemple au sein du canyon du Crêt de la Neige).

La température moyenne de l'air est présentée ici à titre indicatif dans la mesure où à 1 m du sol la neige est présente une longue partie de l'hiver et du printemps. Elle permet néanmoins de hiérarchiser les exigences thermiques des différents écosystèmes. Elle varie de 2,3°C à 3,7°C pour les combes à neige et se situe entre 4 et 5°C pour les autres écosystèmes.

Les minima absolus doivent également être considérés avec circonspection (cf. paragraphe ci-dessus). Il est à noter que peu de températures ont été enregistrées en-dessous de - 10°C lors de l'hiver 2012-13, ce qui représente des minima élevés au regard des minima enregistrés lors de ces quarante dernières années (la température de - 15 °C est régulièrement atteinte à la station de la Dôle) (Données MétéoSuisse).

Les maxima absolus atteignent dans la plupart des écosystèmes 20°C. Le seuil de 23°C est atteint en adret ce qui est conforme aux maxima absolus de la Dôle (Données MétéoSuisse). Dans les secteurs ombragés et les dépressions, ces maxima demeurent en deçà de 20°C.

Conclusion

Présentés ici à titre préliminaire, les résultats exposés ci-dessus ne constituent qu'un premier état des lieux disciplinaire d'un seul des volets développé dans le cadre de ce projet. S'ils exposent des données inédites dans leur domaine, l'importante plus-value de ce travail résultera dans les regards croisés entre les différentes approches conduites. L'année 2014 étant encore consacrée à la collecte de données, c'est en 2015 que les principaux enseignements de ce vaste travail pourront être tirés.

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été effectués dans le cadre du projet Reculet. Nous remercions vivement Jeremie Cholet, Hervé Tournier et Simon Pauvert de la Réserve naturelle de la Haute-Chaîne du Jura, ainsi que Cécilia Gonzalez, étudiante hepia, pour toute leur aide durant les nombreuses campagnes de terrain.

Bibliographie

- MACLAURIN & STERELNY, 2008. What is Biodiversity?, University of Chicago Press
- PRUNIER, P., F. MOMBRIAL, P.-Y. COTTU ET O. TRAVAGLINI,. 2009. Réactualisation de la carte phytosociologique du secteur Reculet-Crêt de la Neige. Medad, hepia. 31 p. + cartes
- PRUNIER P., 2001. Inventaire des espèces végétales rares de la Haute-Chaîne du Jura. Conservatoire Botanique National Alpin & Réserve naturelle de la Haute-Chaîne du Jura. 66 p. + annexes + cartes.
- PRUNIER P. & SCHNEIDER C., 2004. Catalogue floristique du Pays de Gex - Poaceae. Bull. Ass. Conn. Fl. Jur., 6 : 30-46.
- PRUNIER P., 2003. Données nouvelles sur quelques éléments remarquables de la Réserve Naturelle de la Haute-Chaîne du Jura. Nouv. Arch. Fl. Jur., 1 : 45-58.
- PRUNIER P., 2003. A propos de la présence de *Luzula sudetica* (Willd.) Schult. sur la Haute-Chaîne du Jura. Saussurea, 33, 101-107.
- WEGMÜLLER S., 1966. Über die Spät-und postglaziale Vegetationsgeschichte des Südwestlichen Jura Beitr. Geobot. Landesaufn. Schweiz, 48 (1966), p. 144



Archéologie et paléo- environnement dans la Réserve des Hauts de Chartreuse : le site de l'Aulp du Seuil à Saint- Bernard-du-Touvet (Isère)

Résumé

Situé à 1 700 m d'altitude, au fond d'un vallon creusé dans un synclinal perché urgonien, isolé et difficile d'accès, le site de l'Aulp du Seuil a livré quatre abris sous bloc et une station de plein air archéologiques. Nous présentons ici les résultats préliminaires des fouilles de l'abri n° 1 qui se sont déroulées entre 1993 et 2005. La stratigraphie a permis de reconnaître quatre couches bien individualisées et calées chronologiquement correspondant à l'Holocène. L'abri a connu différentes occupations humaines datant du Mésolithique, du Néolithique, de l'Age du Fer et de l'Antiquité (de 8000 à 50 ans av. J.-C.). La transition entre les derniers chasseurs-prédateurs (Mésolithique) et les premiers pasteurs- agriculteurs (Néolithique) a pu être observée. Cette évolution culturelle a été mise en relation avec les données du paléo-environnement. Ainsi les espèces chassées les mieux représentées sont le Bouquetin, le Chamois et le Cerf. Les données de la végétation indiquent un environnement caractéristique de l'étage montagnard, un paysage boisé mais ouvert avec au Mésolithique une représentation des feuillus, aujourd'hui rares, indiquant des conditions climatiques plus tempérées et globalement plus humides. A partir du Néolithique le climat se rapproche des conditions actuelles. Les résultats des études sur les matières premières minérales utilisées, exploitées par l'homme pour la confection de ses outillages, mettent en évidence des zones d'approvisionnement plus ou moins éloignées et témoignent de la mobilité des groupes humains et de leur connaissance du milieu montagnard.

Mots clés - Alpes du Nord, Chartreuse, abri sous bloc, site stratifié d'altitude, Mésolithique, Néolithique, protohistoire, Antiquité, archéozoologie, paléobotanique, industries lithiques, céramique, pastoralisme.

Pierre Bintz

*Association de Valorisation et de Diffusion de la
Préhistoire Alpine (AVDPA)
13, allée des Cottages, 38240-Meylan
LAMPEA-UMR 7269 du CNRS*

Avec les contributions de :

Jacqueline Argant, Louis Chaix, Céline Bressy,
Sylvie Cousseran, Marcel Jeannet,
Lucie Martin, Alexandre Morin, Henri-Georges
Naton, Jean-Claude Ozanne, David Pelletier,
Stéphanie Thiébaud

ABSTRACT

Situated at the bottom of a small valley dug into an urgonian perched syncline, isolated and difficult of access, this site has yielded 4 bloc shelters and 1 open-air settlement. We present in this paper the preliminary results regarding the excavation of shelter. The stratigraphical survey, well developed, has allowed recognizing four well distinct layers. Layer A correspond to historic period, layer B to first Iron Age and the late Neolithic, layer C1 to the early Neolithic and the late Mesolithic levels although layers C2, C3 and D1 are connected to medium Mesolithic. Ibex, Chamois and Deer are the most frequently hunted species. The fundamental idea paleobotany shows the characteristic environment of a mountain level, a wooded but open landscape with in the Mesolithic a broad-leaved trees representation, today absent in the site, that indicates a most temperate climate. Preliminary results on lithic raw materials studies indicate a wide catchment area. They highlight the mobility of Mesolithic hunters, the deep knowledge of environmental sitting and the capability to exploit the resources of mountain environment.

Key Words – Northern Alps, Chartreuse, bloc shelter, stratified site, Mesolithic, Neolithic, proto-history, antiquity, mountain, environment, fauna, pale botany, lithic industry, ceramics, pastoralism.

INTRODUCTION :

cadre général et contexte géomorphologique

Les recherches menées sur la Réserve des Hauts de Chartreuse s'inscrivent dans un cadre thématique et géographique beaucoup plus large qui est l'étude des peuplements en relation avec l'évolution des paléo-milieus depuis le Tardiglaciaire jusqu'au début de l'Holocène (entre 16 000 et 4 000 av. J.-C. en dates réelles) dans les Alpes du Nord françaises. C'est une période sensible de la Préhistoire car elle concerne le passage des derniers chasseurs-collecteurs aux premiers pasteurs-agriculteurs qui ont eu un impact sur le milieu naturel.

Dans la partie nord-est de la Chartreuse, la Réserve Naturelle des Hauts de Chartreuse correspond à un synclinal perché bordé de hautes falaises de calcaire, uniquement accessible à pied, qui s'allonge de la Dent de Crolles au sud au sommet du Granier au nord (fig. 1).

C'est la partie médiane de ce vallon, dénommée Aulp du Seuil et située entre 1500 et 1800 m d'altitude, qui nous intéresse ici pour avoir livré plusieurs sites archéologiques exceptionnels. Sur ses bords est et ouest le synclinal est limité par des falaises de calcaire urgonien qui culminent à l'ouest avec les Lances de Malissard à 2045 m d'altitude et à l'est au Dôme de Bellefond et au Pas de l'Aulp du Seuil (fig. 2). Au sud le vallon est fermé par un cirque qui peut être franchi par le col de Bellefond à 1902 m d'altitude et au nord la limite est marquée par le vallon de Pratcel qui débouche sur la cuvette de Saint-Pierre-d'Entremont au niveau du cirque de Saint-Même.

De nombreuses traces confirment la présence durant la dernière glaciation d'un glacier local qui débute à l'extrémité sud du vallon, au pied du col de Bellefond, qui affecte la forme d'un cirque glaciaire, se prolongeant par une série de moraines frontales de retrait. En aval un chaos de blocs erratiques, métriques à pluri-décamétriques, noyés dans une moraine de fond, s'étale sur près de 2 kilomètres. Ces blocs proviennent d'écroulements des falaises urgoniennes bordant le vallon.

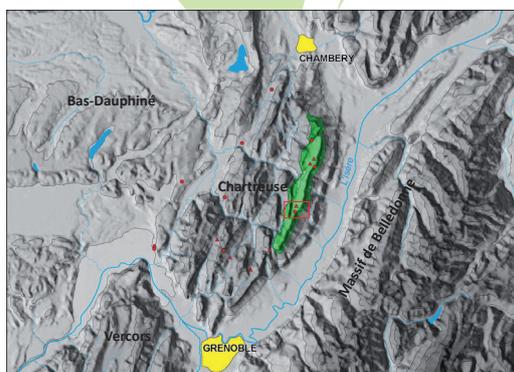


Fig. 1 Localisation du site de l'Aulp du Seuil, encadré en rouge, dans la Réserve des Hauts de Chartreuse, en vert. (Cliché AVDPA).



Fig. 2 Sud du vallon synclinal de l'Aulp du Seuil encadré par les Lances de Malissard à droite et le Dôme de Bellefond à gauche. Au fond le col de Bellefond. On distingue bien la zone boisée correspondant à la moraine glaciaire à blocs. (Cliché AVDPA).

Certains de ces blocs ont servi durant la préhistoire d'abris à des groupes de nomades parcourant le vallon après le retrait du glacier. Quant au placage morainique, il constitue un aquifère précieux à l'origine des émergences de sources, rares dans ce milieu calcaire karstifié.

La partie basse de l'Aulp du Seuil abrite une forêt montagnarde essentiellement composée de sapins. La partie haute, où se trouvent les sites archéologiques et qui correspond à l'étage subalpin, a été déforestée pour l'établissement de pâturages. La zone de blocs erratiques est aujourd'hui occupée par les pins à crochet avec de rares feuillus.

L'Aulp du Seuil a livré 4 sites stratifiés en abri sous bloc et un site de plein air situés vers 1700m d'altitude et installés à proximité d'émergences de sources. Ils ont fait l'objet de sondages et de fouilles partielles entre 1993 et 2005 sous la direction de Pierre Bintz (1993-98) et David Pelletier (1999-2005). Seul l'abri sous bloc n° 1 (ALP 1 en abrégé) a fait l'objet de plusieurs campagnes de fouille programmée et de recherches pluridisciplinaires dont les résultats sont présentés dans le présent article (fig. 3). Une campagne de fermeture et de remblaiement du site, qui est désormais protégé, a été conduite en 2013.

La variété, l'abondance (plusieurs milliers d'objets) et la bonne conservation des vestiges, tant archéologiques que naturels, recueillis dans un contexte stratigraphique, font de ce site d'altitude un site unique dans les Alpes occidentales, les seuls équivalents se trouvant dans les Dolomites italiennes (Angelucci et al., 1999).

Stratigraphie de l'abri sous bloc n° 1 (P.B. et H.-G.N.)

Epais de 1,50 m, le remplissage sédimentaire est essentiellement constitué de fragments de calcaire anguleux, provenant de la désagrégation cryoclastique du bloc-abri, emballés par une matrice limoneuse plus ou moins abondante, issue d'apports colluvionnaires déposés par ruissellement à partir des dépôts glaciaires. A ces constituants s'ajoutent les apports anthropiques formés de fragments de charbons de bois, de nombreuses esquilles osseuses et autres matières organiques. Le remplissage est divisé en quatre unités stratigraphiques (US) individualisées sur des critères sédimentologiques, couleur, nature des composants, structures. On distingue de bas en haut (fig. 4) :

L'unité D est formée d'un sédiment argilo-silteux emballant un cailloutis hétérométrique. Il est probablement issu du colluvionnement remaniant les dépôts glaciaires. Riche en composante argileuse ce sédiment a dû se déposer sous climat humide dans un environnement peu végétalisé. Il pourrait se rapporter à la fin du Tardiglaciaire car immédiatement sous-jacent à l'unité C datée du début du Boréal. Le sommet de cette unité a livré trois lentilles charbonneuses représentant des foyers, qui témoignent d'installations ponctuelles de groupes humains. En l'absence de matériel archéologique ces niveaux n'ont pas pu être datés.

L'unité C de 35 à 50 cm d'épaisseur, est constituée d'un sédiment noir très charbonneux. Les sous-unités C3 et C2 sont composées d'un cailloutis à matrice limono-argileuse abondante, très charbonneuse. Ces niveaux ont livré un abondant matériel archéologique, industrie lithique, restes osseux, nombreux fragments de charbons de bois. La base de C2 se rapporte à une occupation du Mésolithique moyen de type sauveterrien, datée de 8740 ±60 BP soit 7920 à 7592 av. J.-C. et son sommet au Mésolithique récent de type Castelnavien.



Fig. 3 Abri sous bloc n° 1 de l'Aulp du Seuil, site archéologique en cours de fouille. (Cliché AVDPA).

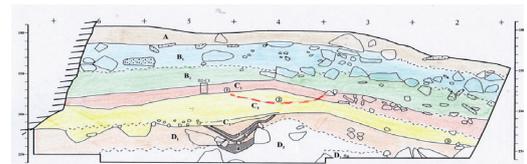


Fig. 4 Abri sous bloc n° 1 de l'Aulp du Seuil, coupe stratigraphique. (Levé P. Bintz).

La sous-unité C1 se caractérise par un sédiment plus clair et plus grossier. La base de cette sous-unité, a livré du matériel archéologique témoignant d'occupations du Mésolithique récent et le sommet, daté de 5590±115 BP soit 4699 à 4178 av. J.-C., se rapporte au Néolithique ancien et en partie au Néolithique moyen.

L'unité B, d'une puissance variant entre 40 et 60 cm, est formée essentiellement d'un cailloutis terreux à blocs. B2 qui est formé par un cailloutis très hétérométrique avec peu de matrice, a connu des occupations du Néolithique moyen et final alors que B1, caractérisé par une matrice fine abondante, se rapporte à la période protohistorique (Age du Fer) et au gallo-romain.

L'unité A, riche en blocs et cailloutis hétérométrique à matrice lâche riche en débris organiques, termine le remplissage sédimentaire. Elle a livré des vestiges des périodes historiques.

Données de l'analyse pollinique (J.A.).

Les prélèvements ont été effectués le long de la coupe stratigraphique de référence sur 2 colonnes. Un échantillon de mousse a été pris contre la paroi au niveau du sol actuel pour l'étude de la végétation actuelle. L'analyse pollinique des mousses actuelles donne un spectre où les arbres occupent 60% du pollen total (Pin, Sapin, Epicéa, Genévrier et quelques feuillus). Le reste correspond aux herbacées. Ce spectre traduit assez bien le paysage actuel : pelouse avec arbres épars, proximité de la forêt de l'étage montagnard et même collinéen (noisetier par exemple). Par contre les fougères ne sont pas du tout représentées. Ces remarques seront utiles pour l'interprétation des spectres archéologiques.

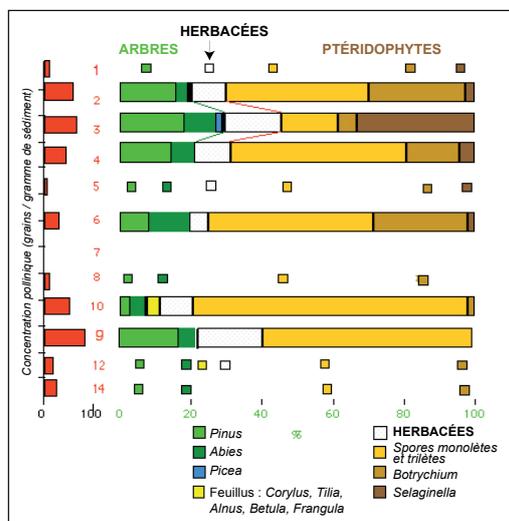


Fig. 5 Abri sous bloc n° 1 de l'Aulp du Seuil, diagramme pollinique. De 8 à 14 : US C2 ; 8 et 7 : US C1 ; de 6 à 3 : US B2 ; 2 et 1 : US B1. (Analyses J. Argant).

Résultats des analyses

Le diagramme pollinique (Fig. 5) montre que sur l'ensemble des échantillons archéologiques traités (31 au total) 11 niveaux seulement fournissent un nombre de grains satisfaisant par suite de la conservation inégale des spores et pollens. Ces éléments doivent être pris en compte pour l'interprétation des résultats dont l'aspect quantitatif doit être considéré avec prudence. Cependant pour faciliter leur lecture, le calcul des pourcentages a été effectué sur les échantillons les plus riches (Bintz et al., 1999).

Les arbres se remarquent par la présence de *Pinus* et *Abies* à tous les niveaux, l'apparition de *Picea* dans deux échantillons des niveaux B1 et B2, la présence discrète des feuillus (Noisetier surtout) dans les niveaux C2, B2, B1 et A. A noter leur plus grande importance en C2 où figure nettement le Tilleul.

Les herbacées sont représentés par une vingtaine de taxons : Graminées, Cypéracées, Renonculacées, Composées et quelques rudérales typiques.

Les fougères sont largement représentées. Cette forte représentation archéologique peut être liée à des phénomènes de ruissellement qui sont variables selon les secteurs de la paroi. On peut également proposer l'hypothèse d'apports anthropiques (litières) liés à la fréquentation humaine.

Parmi les autres microfossiles, les échantillons 9 et 10 appartenant tous à l'US C2 se montrent riches en tests identifiés par les spécialistes du Muséum d'Histoire Naturelle de Genève comme étant des restes de Thécamoebiens du sol et des eaux douces. Ils indiquent sans doute une phase de forte humidité.

A partir de ces éléments il est possible d'évoquer un paysage en mosaïque avec une présence forestière parfois bien affirmée. A noter une humidité marquée dans une ambiance nettement tempérée en C2 (niveau mésolithique) et une relative péjoration climatique à partir de B2 (Néolithique final et protohistoire). La figure n° 6 donne un résumé des résultats des analyses polliniques et de leur interprétation.

Analyse des charbons de bois (S.T.)

L'analyse préliminaire a porté sur l'identification de plus de 1800 fragments.

Une douzaine de taxons a pu être observé. Il s'agit d'espèces caractéristiques de la flore subalpine comme le Pin à crochet (*Pinus cf. uncinata*), ou appartenant à la flore montagnarde comme le Nerprun des Alpes (*Rhamnus alpina*), le Bouleau (*Betula sp.*), l'Erable sycomore (*Acer pseudoplatanus*), ou typique de l'étage collinéen comme les Rosacées (*Pomoïdées*, type *Sorbus/Crataegus*) ou encore le lierre (*Hedera helix*), et enfin de la ripisylve comme le Frêne et Saule/Peuplier (*Fraxinus* et *Salix/Populus*).

Les résultats soulignent l'importance des Pins dont les pourcentages fluctuent, tout au long de la séquence, entre 99% et 79% (Bintz *et al.*, 1999). On observe toutefois quelques fluctuations dans la représentation des différents taxons. La couche C2 (Mésolithique) montre la présence de nombreuses essences : Pomoïdées, Bouleau, Nerprun, Erable, Lierre, Saule/Peuplier et Frêne. Ce niveau pourrait correspondre à un climat tempéré humide permettant le développement d'espèces hygrophiles et collinéennes. Par la suite, au Néolithique, (US B1 et B2), les conditions plus rigoureuses s'installent si l'on en juge par le recul du nombre d'essences identifiées et par la présence des taxons montagnards froids (Fig. 7).

L'environnement suggéré par cette analyse anthracologique semble bien caractériser l'étage montagnard pour les niveaux inférieurs de la séquence (Mésolithique) et subalpin inférieur pour les niveaux supérieurs (Néolithique et protohistoire) et indique globalement un paysage boisé mais très ouvert tout au long de la séquence.

Etudes des macrorestes végétaux (L.M.)

Le corpus des restes végétaux se compose principalement de graines, mais aussi d'aiguilles, de fruits, de bourgeons, de fragments de tiges. L'analyse a uniquement porté sur les niveaux du Néolithique moyen. La méthode consiste à prélever les sédiments par quart de carrés, à éliminer la fraction grossière par tamisage à sec et à tamiser à l'eau la fraction fine. Les restes végétaux sont séparés du reste du sédiment par flottaison. Tous les restes ont été conservés par carbonisation. Les restes sont identifiés et comptés à l'œil nu et à la loupe binoculaire.

Résultats

Près de 600 litres de sédiment ont fourni 509 restes botaniques. Le spectre se compose de 38 taxons que l'on peut répartir entre les plantes cultivées, les arbres et arbustes, les herbacées sauvages. Parmi les plantes cultivées on a pu identifier de l'engrain, du blé nu, de l'orge, une graine de lin qui pourrait être du lin cultivé. Le groupe des arbres comporte des espèces de la forêt montagnarde et subalpine comme le Sapin, l'Épicéa, le Pin à crochet et quelques espèces

	Couche	Arbres dominants	Autres arbres	Autres indicateurs	Tendance
Néolithique	B1	<i>Pinus + Abies</i>	<i>Picea</i>	<i>Botrychium</i>	milieu plus ouvert, pelouses
	B2 sup.	<i>Pinus + Abies</i>	<i>Picea</i> Feuillus	<i>Selaginella</i>	plus frais, plus humide
	B2	<i>Pinus + Abies</i>		<i>Botrychium + Selaginella</i> puis <i>Botrychium</i> seul	ouverture du milieu
	C1	?			
Mésolithique	C2	<i>Pinus + Abies</i>	<i>Picea</i>	plus grande diversité taxonomique ; herbacées rudérales ; Thécamoebiens abondants	activité humaine ? humidité marquée
	C3	?			
	D1	<i>Pinus + (Abies)</i>	Feuillus	plus grande diversité taxonomique (arbres en particulier) ; taxons tempérés	caractère tempéré

Fig. 6 Abri sous bloc n°1 de l'Aulp du Seuil, synthèse des résultats polliniques et leur interprétation. (Analyses J. Argant).

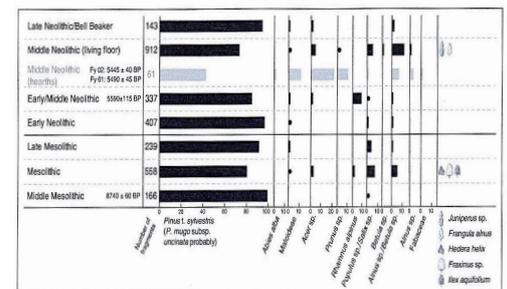


Fig. 7 Abri sous bloc n° 1 de l'Aulp du Seuil, Diagramme anthracologique préliminaire des résultats. (Analyses S. Thiébault).

des fourrés arbustifs collinéens comme le Noisetier et le Sureau. Parmi les arbustes on note la présence des formes naines et rampantes de la famille des Ericacées, le Raisin d'ours et la Myrtille ou l'Airelle rouge. Les herbacées sauvages sont représentées par quelques plantes typiques des friches et commensales des cultures, des taxons de clairières et de lisières et des taxons de pelouse.

Quelques éléments de synthèse et d'interprétations

L'alimentation végétale est assurée à la fois par les céréales et les produits de la cueillette. Les céréales sont apportées sur le site et leur présence évoque une relation avec des populations agro-pastorales en plaine. Cet apport est complété par des taxons sauvages récoltés sur un vaste territoire. Parmi les plantes sauvages comestibles, les occupants ont collecté des Noisettes et du Sureau entre l'étage montagnard et collinéen, ainsi que du Raisin d'Ours, des Myrtilles et des Airelles aux alentours de l'abri à l'étage subalpin.

L'étude carpologique (paléo-semence) va dans le sens d'une utilisation saisonnière du site notamment en raison de la présence de céréales apportés sur le site (Martin *et al.* 2012). L'abri, qui occupa une place stratégique dans l'exploitation du territoire montagnard, a un statut qui pourrait s'inscrire dans un système qui inclut des habitats permanents à basse altitude et des camps saisonniers secondaires comme l'Aulp du Seuil (fig. 8).

Données sur la faune des grands vertébrés (L.C.)

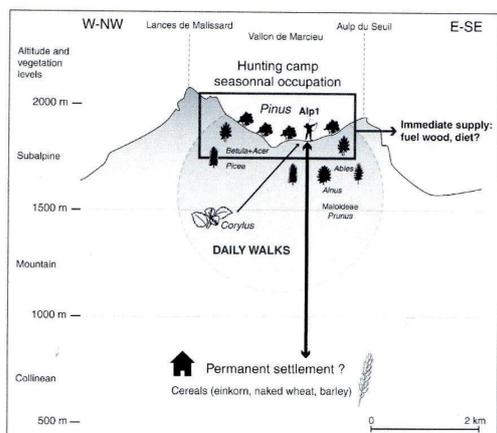


Fig. 8 Aulp du Seuil, modèle d'exploitation du territoire durant le Néolithique moyen d'après les résultats des macrorestes végétaux. (Analyses L. Martin).

L'échantillon étudié représente 1665 restes osseux parmi lesquels 1108 ont été attribués à une espèce ou à une famille. Les 557 fragments restant consistent essentiellement en morceaux de diaphyses d'os longs (partie médiane de l'os). On peut noter l'absence presque totale d'éléments épiphysaires. La plupart des diaphyses montrent une fragmentation sur place probablement dans le but de récupérer la moëlle.

Les spectres fauniques (fig.9) des unités stratigraphiques C1 et C2 sont relativement pauvres en espèces et l'on peut remarquer l'absence presque complète des petits carnivores ainsi que des rongeurs et des lagomorphes de montagne (Marmotte et Lièvre variable). Cependant ils montrent tous les deux l'abondance des Caprinés sauvages (*Capra ibex L.*) et Chamois (*Rupicapra rupicapra L.*) et la représentation plus faible du Cerf (*Cervus elaphus L.*), du sanglier (*Sus scrofa L.*) et de l'Ours brun (*Ursus arctos*).

Les indices sur le nombre minimal d'individus indiquent 8 Bouquetins, 5 Chamois, 4 Cerfs, 2 sangliers et 1 Ours brun dans les unités stratigraphiques D et C2 (Mésolithique) et 4 Bouquetins, 3 Chamois, 2 cerfs, 3 sangliers et 2 Ours dans les US C1. L'activité anthropique est attestée par la présence de traces de décarnisation et de désarticulation sur certains os.

L'étude de cet assemblage osseux et notamment la présence d'individus juvéniles (on détermine leur âge et en connaissant les périodes de mise bas on en déduit les périodes d'abattage), indique une occupation de l'abri entre fin août et la mi-janvier pour les niveaux du Mésolithique moyen et de juin à octobre pour les niveaux du Mésolithique récent et Néolithique ancien (Bintz *et al.*, 1999).

Dans les US B1 et B2 les Caprinés sauvages sont toujours dominants mais la fréquence du Sanglier monte nettement. A noter au sommet de B1(Protohistoire) la présence du Cheval et d'un os de *Bos sp.* qui témoigne probablement d'une activité pastorale.

Données sur la faune des petits vertébrés (M.J.)

Les pièces osseuses provenant de toutes les parties du squelette ont été prélevées par tamisage des sédiments au fur et à mesure de l'avancement de la fouille. Etroitement inféodés à leur habitat les petits vertébrés présentent le grand avantage par rapport aux grands vertébrés de pouvoir être étudiés de façon qualitative et quantitative et de refléter les conditions environnementales à une période donnée sans passer par le biais humain.

Trois cents pièces ont pu faire l'objet d'une détermination qui se fonde essentiellement sur les dents. Quinze espèces ont pu être déterminées dont la liste s'établit comme

suit : *Microtus cf. arvalis* (le Campagnol des champs), *M. Agrestis cf. Arvalis*, (le Campagnol agreste), *M. nivalis*, (le Campagnol des neiges), *Pitymys multiplex*, (le Campagnol souterrain des Alpes), *Clethrionomys glareolus*, (le Campagnol roussâtre), *Arvicola terrestris*, (le Rat taupier), *Eliomys quercinus*, (le Léroty), *Apodemus sylvaticus*, (le Mulot gris), *A. flavicollis*, (le Mulot à collier fauve), *Sciurus vulgaris*, (l'Ecureuil commun), *Sorex araneus*, (la Musaraigne carrelet), *S. Minutus*, (la Musaraigne pygmée), *Salamandra cf. atra*, (la Salamandre noire), *Natrix natrix*, (la Couleuvre à collier), Un Anoure, un Léporidé (une M/3), un poisson (une vertèbre), et des os d'oiseaux restent à déterminer.

Résultats

Comparées aux données actuelles on constate peu de différence quant aux températures qui par ailleurs restent relativement stables d'un niveau à l'autre. Les informations sur l'hygrométrie par contre indiquent des variations assez marquées d'un niveau à l'autre : elle est nettement plus forte dans les US C2 et C1 (Mésolithique), moindre en B2 et B1 et accuse une nette diminution en A (niveau historique).

Les outillages et les évolutions culturelles

On parle couramment de « culture matérielle » pour distinguer des peuplements différents à partir des objets non périssables fabriqués par l'homme. Il s'agit essentiellement de silex pour les périodes de la préhistoire et de céramiques pour les époques suivantes.

Etude des matières premières siliceuses et leur circulation. (C.B. et S.C.)

Les recherches en préhistoire amènent à s'interroger sur l'extension des territoires exploités et parcourus par les groupes humains. A ces questions l'étude du silex peut apporter des éléments de réponse car il existe une grande variété de types se rapportant à des sources géographiquement distinctes. Il suffit alors de savoir quels types sont présents dans une région donnée pour permettre leur identification au sein des séries archéologiques et déterminer les sources d'approvisionnement en silex et de là les circulations.

Le silex naturel est totalement absent sur le site de l'Aulp du Seuil. Les

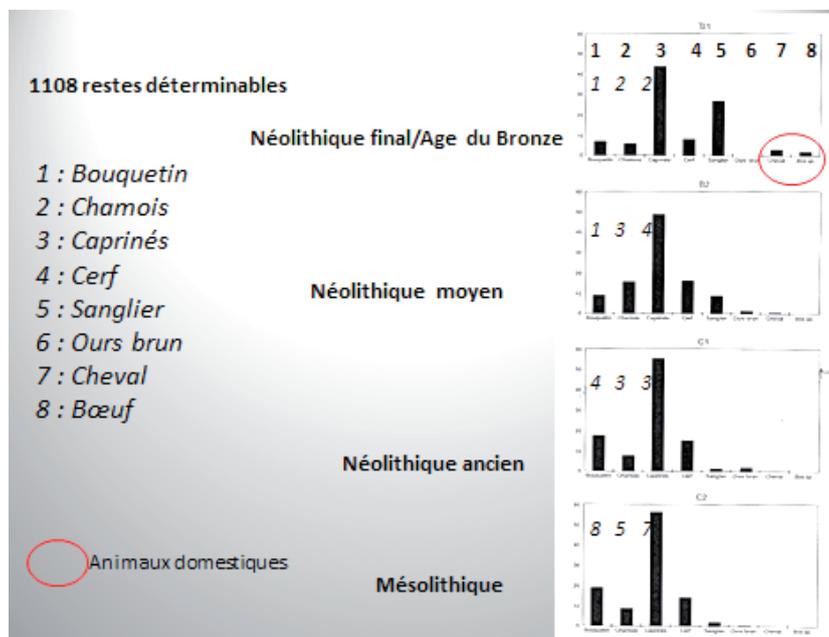


Fig. 9 Abri sous bloc n° 1 de l'Aulp du Seuil, résultats de l'archéozoologie. (Analyses L. Chaix).

silex utilisés sont d'origine régionale, Chartreuse et Vercors. Il s'agit du silex valanginien qui affleure sur le pourtour de la Réserve et qui peut être récolté sur les voies d'accès du site et du silex sénonien, d'origine plus lointaine, qui se rencontre essentiellement dans des gîtes secondaires (molasse ou poches de décalcification tertiaire). La présence de quelques silex affleurant dans les niveaux barrémo-bédouliens du Sud-Vercors indique des circulations sur de plus longues distances. Quelques quartz hyalins ou laiteux dont un exemplaire associé à de la sidérite, ont été trouvés (moins de 1% de l'industrie lithique). Ces quartz qui proviennent du massif de Belledonne (secteur du massif d'Allevard) témoignent de déplacements sur de plus longues distances au cœur même du massif cristallin externe. Le quartz enchâssé dans la sidérite est brut de débitage ce qui induit que sa récolte était sans doute destinée à la production d'ocre très utilisé probablement dans la confection des flèches.

Le Mésolithique (8000 à 6500 av. J.C.) et le Néolithique ancien (5500 à 4500 av. J.C.) (P.B. et D.P.)

Pour ces périodes on a privilégié, pour caractériser les cultures, les armatures de flèches, généralement de très petite dimension dénommées microlithes pouvant affecter des formes géométriques, qui ont fait l'objet d'une fabrication particulièrement soignée. Elles servaient à la fabrication de flèches lancées à l'aide des arcs qui constituent à partir du Mésolithique l'arme de chasse dont l'utilisation s'est généralisée. Mais il faut savoir que les hommes, qui vivaient dans un milieu boisé, devaient utiliser une grande variété d'outils en bois qui n'ont pas été conservés.

Les industries lithiques (près de 4000 pièces en C1 et 6000 pièces en C2) (fig. 10) sont très nettement dominées par des produits bruts de débitage (nombreux éclats, nucleus, lamelles et quelques lames). Les outils (silex qui ont subi des retouches d'aménagement) représentent 6% du total dans le niveau C1 et 8% dans le niveau C2 (Pelletier et al. 2000).

Les outils microlithiques dominant toujours (autour de 90%). Les outils du fond commun (autres que les armatures de flèches) sont caractérisés par les grattoirs simples et des pièces à enlèvements irréguliers.

Dans l'US C2 les armatures sont dominées par les triangles variés et des lamelles retouchées variées qui faisaient fonction de barbules, et des pointes de Sauveterre, armature perçante insérée à l'extrémité des flèches (Fig.10). Cette industrie est caractéristique de la phase moyenne du Mésolithique des Alpes du Nord, datée vers 8000 av. J.-C., se rattachant à la culture du Sauveterrien qui se diffuse dans tout le sud de l'Europe.

Le Mésolithique a également livré 5 coquilles du genre *Columbella* percées de manière à pouvoir être enfilées dans un lien ou directement fixées sur un habit. C'est une espèce qui vit sur le littoral méditerranéen. Elles témoignent probablement de contacts le long du couloir rhodanien avec des groupes installées dans les régions méditerranéennes.

L'US C1 se distingue de la précédente par l'apparition d'armatures trapézoïdales ou triangulaires destinées à être insérées à l'extrémité des flèches, la partie fonctionnelle étant non plus perçante mais tranchante. Deux ensembles typologiques peuvent être distingués. Le premier est composé de microlithes triangulaires ou trapézoïdaux à troncatures (retouches abruptes) obliques et lames ou lamelles avec denticulations latérales (type Montbani). Cet ensemble se réfère à un Mésolithique récent de type castelnovien d'affinité nettement méridionale (fig.10). Le

Les premiers occupants du site : les chasseurs cueilleurs Mésolithique, 8 000 à 6 500 av. J.C.

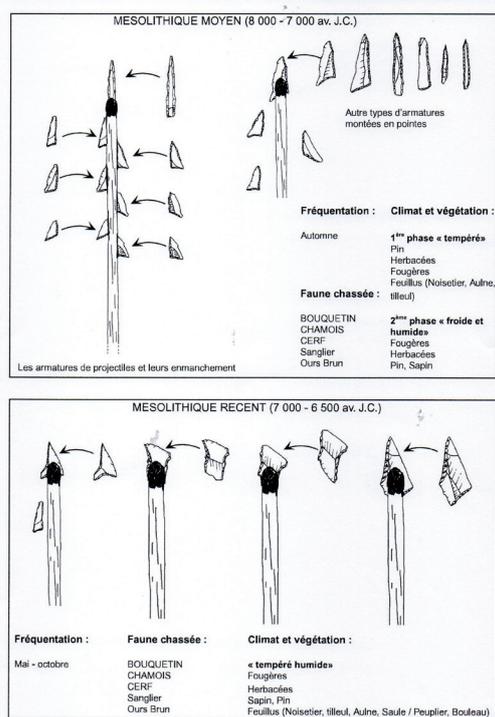


Fig. 10 Aulp du Seuil, outillages du Mésolithique. (Réalisation AVDPA).

second est composé des géométriques triangulaires ou trapézoïdaux à troncatures inverses et retouches directes rasantes ensemble qui caractérise le Néolithique ancien (fig. 11). Dans ce même horizon ont été découverts six céramiques dont trois décorées qui ont comme trait commun d'être peu travaillées à la préparation (hétérogénéité de la structure) avec un dégraissant irrégulier et grossier. Ils entrent dans la variabilité de la céramique du Néolithique ancien de la vallée du Rhône et prennent place dans la problématique de la néolithisation des Alpes (Beeching, 1998).

Egalement daté du Néolithique ancien un foyer en cuvette, garni de blocs calcaires chauffés mêlés à des charbons de bois, a été mis au jour. Sa bonne conservation et l'absence de perturbations importantes attestent d'un usage ponctuel.

Le Néolithique moyen (4500 à 3500 av. J.C.) (D.P.)

Une quarantaine de tessons de céramiques appartiennent à cet horizon culturel qui correspond à l'US B2. Ils s'apparentent très clairement à la production de céramique lisse du Néolithique moyen 1. La pâte est fine et compacte. La morphologie des tessons, bien que très fragmentés, évoquent exclusivement des formes non carénées à fond bombé.

L'industrie lithique (fig. 12) comprend comme éléments diagnostiques une dizaine de fragments de lamelles, très régulières et au gabarit standardisé, évoquant un débitage par pression, caractéristique de cette culture. Six d'entre elles ont subi une chauffe intentionnelle des matériaux utilisés. L'absence sur le site des pièces issues de la mise en forme de ces lamelles laisse supposer une chauffe et un débitage antérieurs et en dehors du site. Ces lamelles ont pu servir de support à la fabrication d'armatures de flèches ou ont pu être directement utilisés pour la fabrication des couteaux ou des faucilles. Trois armatures tranchantes à retouches rasantes directes, caractéristiques de cette période, complètent la série lithique.

Quatre structures de type foyer, à pierres chauffées, représentant des aménagements anthropiques, ont été découverts dans cet horizon (fig. 12). L'absence de brassages et de remaniements de ces structures qui auraient été occasionnés par des réutilisations, milite en faveur d'un usage unique. Nous obtenons ainsi un minimum de quatre occupations distinctes qui correspondent à des séjours de courte durée. Ceux-ci sont à mettre en relation avec des groupes d'identité culturelle différente compte tenu des types d'armatures. On peut ainsi individualiser un Néolithique moyen rhodanien type St. Uze ou chasséen, avec la série de lamelles régulières chauffées et les armatures tranchantes et un groupe néolithique moyen « d'affinité suisse », type Cortailod, avec notamment la présence de pointe foliacée.

Le Néolithique final (3500 à 2200 av. J.C.) (A.M.)

L'US B2 supérieur a livré près de 400 tessons de céramique dont la fragmentation est importante. On distingue deux grandes catégories : la céramique décorée campaniforme avec plus de 140 tessons et la céramique non décorée (Morin *et al.*, 2003).

La céramique campaniforme (nom tirée de la forme en cloche des gobelets souvent richement décorés) offre trois types de décors :

- les tessons décorés au peigne, à bandes horizontales multiples,
- les tessons décorés au peigne à simple ou double rangs de cordelette,
- des tessons décorés par estampillage d'un tube cylindrique creux.

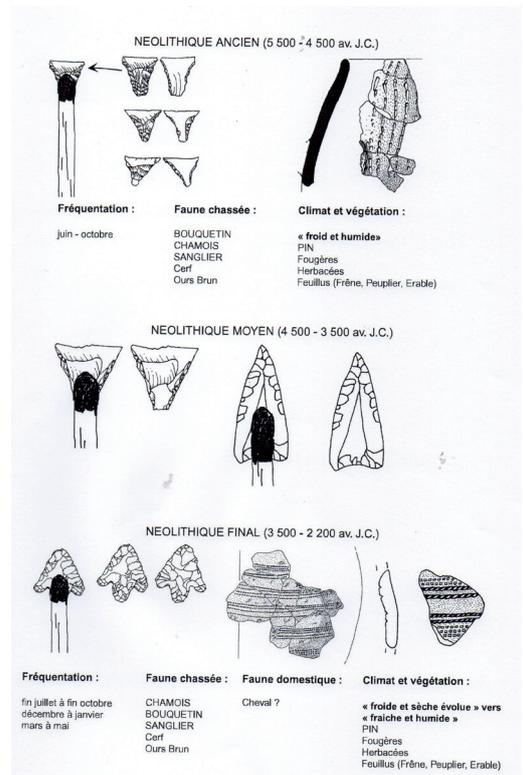


Fig. 11 Aulp du Seuil, outillages du Néolithique. (Réalisation AVDPA).



Fig. 12 Abri sous bloc n° 1 de l'Aulp du Seuil, foyer aménagé du Néolithique moyen. (Cliché AVDPA).

Ces céramiques (fig. 11) caractérisent la culture de la phase ancienne du Campaniforme, rarement représentée en milieu d'altitude. Il est difficile de se prononcer sur le nombre de vases faute de remontages suffisants, mais par l'examen des pâtes et des décors un chiffre provisoire de 3 à 6 gobelets peut être avancé. Il semble bien que cette céramique soit à rattacher à un Campaniforme septentrional de l'aire rhodano-rhénane.

L'industrie lithique est représentée par de nombreux petits éclats, souvent minces, obtenus par percussion directe dure. L'outillage est représenté par quelques pointes de flèches à pédoncule et ailerons, à retouches bifaciales, et par des éclats retouchés et des pièces denticulées. Les matières premières siliceuses sont d'origine locale. Ces caractéristiques correspondent aux tendances communes rencontrées dans les industries des sites campaniformes.

Signalons la découverte d'un petit éclat détaché du tranchant d'une lame de hache polie. Cet éclat provient d'une fracture liée à un usage en percussion de type travail du bois. L'analyse de cet éclat par diffraction aux RX montre qu'on a affaire à une omphacite (variété de pyroxène) dont la provenance est à rechercher sur le versant italien des Alpes occidentales (Thirault, 1998). Ce modeste fragment est remarquable à deux titres :

- il s'agit d'un éclat résultant d'un accident de travail détaché sur le site même témoignant d'une utilisation pour un usage inconnu,
- par sa composition cet objet est à relier aux circuits de diffusion transalpins.

Les fouilles ont livrés plusieurs structures. Il s'agit d'un ensemble de plaquettes, certaines en connexion, qui pourraient correspondre à un dallage et d'une structure de combustion en excellent état de conservation. Ces deux ensembles, associés à la céramique décorée, attestent de l'existence d'activités domestiques et place l'occupation du Néolithique final campaniforme dans un contexte d'habitat, cas rarissime pour le Sud-Est de la France où il est presque exclusivement en contexte funéraire (Lemerrier, 1998).

Les données archéo-zoologiques témoignent d'une fréquentation saisonnière qui semble liée à la chasse, mais il n'est pas exclu que cette activité de prédation soit complémentaire d'une autre activité principale comme le pastoralisme.

Périodes protohistoriques (1000 à 52 av. J.C.)

L'Unité stratigraphique B1 contient un horizon protohistorique homogène représenté par près d'un millier de tessons. L'étude typologique et technologique des pâtes et des décors ont permis de l'attribuer au 1^{er} Age du Fer (Hallstatt/la Tène I) et pour un petit ensemble au 2^e Age du Fer (La Tène I/II). Cette série de céramiques comprend plus d'une soixantaine de récipients différents. Les formes les mieux représentées correspondent à des pots ou jarres, rares sont les coupes et les gobelets (Ozanne, 2002).

A cet ensemble il faut ajouter la découverte de fragments de meules et de nombreuses pièces en fer. Parmi ces dernières on peut répertorier quelques clous, un fragment de fibule et comme élément de parure une épingle dont la tige est torsadée (fig. 13). Il faut également signaler des morceaux de fer non transformés qui posent un problème d'identification et d'interprétation. Il pourrait s'agir de scories de fonderie. Si cette hypothèse était confirmée on serait en présence d'une pratique de la métallurgie en milieu d'altitude.

PROTOHISTOIRE (1 000 - 52 av. J.C.) et HISTOIRE

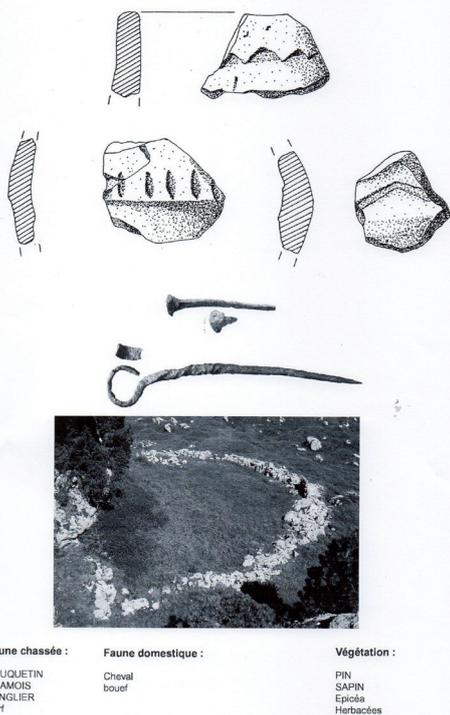


Fig. 13 Aulp du Seuil, outillages protohistorique et historique. En bas, enclos de bergerie historique (Réalisation AVDPA).

On a également observé un ensemble de blocs urgoniens et de plaquettes de lumachelle, récoltés dans les environs immédiats, que nous interprétons comme un appareillage écroulé, de forme courbe, en contact avec la paroi, probablement un mur.

Pour compléter les données obtenues à ALP 1, il est intéressant de signaler les découvertes réalisées dans les niveaux de l'Age du Fer d'un site voisin, l'abri sous bloc n° 2 (Fig. 13). Ce site a livré de nombreux tessons de céramique dont le dégraissant fin et composite indique une fabrication en dehors du site et une importation (Bintz et Serrières. 2008). Trois datations par le radiocarbone situent cette occupation entre 980 et 800 ans av. J.-C. Elles sont tout à fait cohérentes et conformes avec le style de la céramique qui se rapporte au début du 1^{er} Age du Fer. Les restes osseux appartiennent majoritairement à une faune chassée (Bouquetin, Chamois, Cerf, Sanglier) mais la présence d'animaux domestiques est attestée par quelques ossements de bœuf et de cheval.

Les fouilles de cet abri ont révélé l'existence d'aménagements divers : dallage formé de plaquettes de lumachelle, coffre en pierre ayant pu servir pour le stockage des aliments, cuvettes remplies de charbons de bois (peut-être pour la conservation des braises) (fig. 14).

Toutes ces données témoignent d'occupations des sites par des groupes de bergers se déplaçant avec quelques bagages sur ces alpages d'altitude pour des séjours saisonniers de longue durée, nécessitant un minimum d'installation (Bintz *et al.*, 2008).

On peut s'étonner de l'absence à l'Aulp du Seuil d'occupations humaines à l'Age du Bronze, notamment au Bronze final par ailleurs bien représenté dans de nombreux sites alpins. Ainsi la grotte de Balme-Rousse, s'ouvrant au pied de la falaise urgonienne, sur le versant est de la Réserve des Hauts de Chartreuse, sur la commune de Sainte-Marie-du-Mont, a livré un dépôt de sept vases entiers provenant du nord de la Lombardie.

Périodes historiques

L'Antiquité est représentée dans les deux abris par quelques céramiques tournées communes correspondant à une demi-douzaine de vases. Il s'agit de récipients à pâte grise fine, du gallo-romain de tradition laténienne. Ces objets peuvent être mis en relation avec le domaine pastoral d'une famille romaine d'origine gauloise, les Avei, qui firent délimiter leur propriété dans le vallon de l'Aulp du Seuil à la fin du 1^{er} siècle av. J.-C. par une série d'inscriptions (Jospin et Venditelli, 2008) (fig. 15).

Le Moyen âge est représenté par quelques tessons à pâte grise provenant de récipients fabriqués au tour. Enfin une monnaie à l'effigie de Louis XVI témoigne d'une fréquentation du site au 18^e siècle : berger ou simple randonneur ?

Les périodes pré-contemporaines sont représentées à l'Aulp du Seuil et dans l'ensemble de la Réserve par de nombreuses structures pastorales ruinées, enclos, bâtiments (fig. 13), difficilement datables, mais qui témoignent d'une exploitation importante des alpages de l'Aulp du Seuil, de l'Alpe et de l'Alpette (Morin *et al.*, 2007).

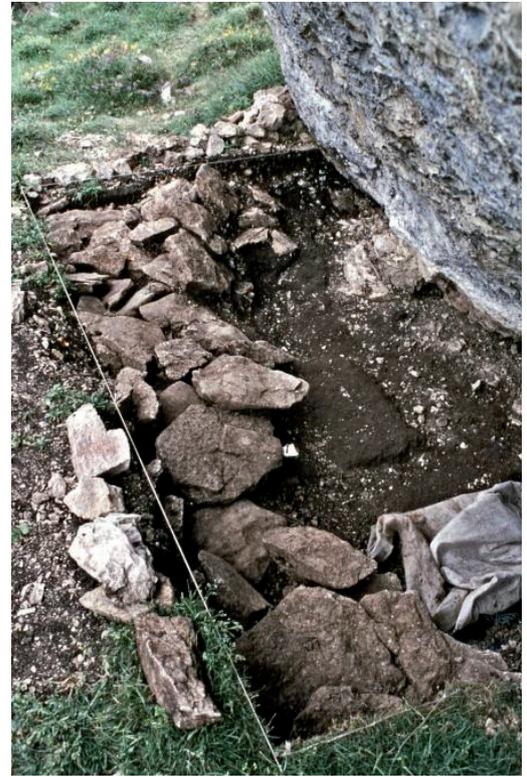


Fig. 14 Abri n° 2 de l'Aulp du Seuil, structure de l'Age du Fer en cours de fouille. (Cliché AVDPA).



Fig. 15 Inscription gravée sur une roche aux lances de Malissard : HOCUSQUI AVIIORVM.

Traduction : Ici (sont) les limites (de la propriété) des Avei. (Cliché AVDPA).

En guise de conclusion : bilan provisoire et contexte régional

Cette première approche, imbriquant étroitement données environnementales et occupations humaines, constitue un bilan encore provisoire en attendant la poursuite des recherches, nécessairement pluridisciplinaires. Mais cette présentation n'en constitue pas moins un enseignement fondamental et sans précédent concernant les modalités d'occupation de la montagne alpine en relation avec l'évolution du milieu naturel et notamment en zone d'altitude. Ces premiers résultats permettent d'esquisser des grandes phases de l'appropriation progressive du milieu montagnard et les modalités de passage des derniers groupes de chasseurs –collecteurs aux premiers bergers s'échelonnant sur près de 8 millénaires.

Les premières occupations humaines en milieu d'altitude datent du Mésolithique. Elles ont été bien mises en évidence dans les Alpes du Nord, notamment en Chartreuse et en Vercors, grâce à des programmes de prospections intensives qui ont permis de révéler de nombreux sites de plein air non stratifiés (Bintz *et al.*, 2013, 135-141) n'autorisant malheureusement pas une approche chronologique et paléo-environnementale. L'Aulp du Seuil constitue un cas unique dans les Alpes du Nord d'un site stratifié d'altitude ayant livré, dans un contexte chronologique bien établi, des données sur le milieu naturel, les fréquentations humaines, les cultures et les modalités d'exploitation d'un territoire de montagne.

Le Mésolithique de type sauveterrien, se diffuse dans tout le sud de l'Europe. Il se développe au cours d'une phase de réchauffement climatique du début de l'Holocène qui voit se développer en plaine une forêt tempérée dense et hostile et en altitude un milieu ouvert favorable à la prolifération du gibier de montagne. Un système logistique d'occupation du territoire se met en place basée sur la présence de camps de base à basse altitude pour l'hivernage, des camps intermédiaires et des sites d'altitude. L'ensemble s'inscrit dans un système d'exploitation raisonné des ressources saisonnières animales, végétales et minérales, compartimentées sur les différents étages de la montagne alpine.

Le Mésolithique récent, qui se met en place au début de l'Atlantique, correspond à une profonde transformation du Sauveterrien en Castelnovien par suite de l'arrivée de groupes humains porteurs d'une nouvelle armature de forme trapézoïdale bien présente à l'Aulp du Seuil. Il précède et peut-être accompagne la néolithisation qui émergera en différents points dans la seconde moitié du VI^e millénaire av. J.-C. A l'Aulp du Seuil comme dans les autres sites de montagne, le Néolithique ancien est en continuité avec le Mésolithique. On peut parler d'un Néolithique montagnard car il ne présente pas encore les attributs caractéristiques d'un Néolithique ancien affirmé. Le Néolithique ancien montagnard mélange les traditions mésolithiques (notamment la chasse) avec des éléments empruntés au Néolithique ancien comme quelques tessons de céramique et armatures de flèches.

Avec le Néolithique moyen, qui se met en place à partir du V^e millénaire av. J.-C. vers le milieu de la période atlantique, commence la véritable colonisation des Alpes du Nord avec l'implantation de communautés d'agriculteurs-éleveurs arrivés de deux horizons différents : des rivages méditerranéens pour la culture du Chasséen et du plateau suisse pour la culture du Cortaillod. Les groupes humains qui fréquentent l'Aulp du Seuil se rattachent à ces deux courants. Au cours de brefs séjours ils

s'adonnent essentiellement à la chasse et à la collecte de végétaux qui leur apportent un complément de ressources. La pratique du pastoralisme n'est pas encore attestée sur le site.

Dans la zone préalpine, l'abri n° 1 est un des rares sites à avoir livré des céramiques campaniformes du Néolithique final. Il s'agit d'une céramique domestique, bien calée stratigraphiquement, dont les traits paléo-environnementaux évoquent le Subboréal régional. Les analyses réalisées sur la technologie des céramiques semblent indiquer que les productions ont été importées à partir de camps de base. Les résultats archéo-zoologiques témoignent d'une fréquentation saisonnière du site liée à la chasse. Mais il n'est pas exclu que cette activité de prédation soit complémentaire d'une autre, principale, comme le pastoralisme. Implanté à 1700 m d'altitude et isolé des grands axes de circulation, ce site s'insère certainement dans l'exploitation organisée d'un territoire.

Les pratiques du pastoralisme de montagne ne sont véritablement attestées à l'Aulp du Seuil qu'à partir de la protohistoire, bien représentée à l'Aulp du Seuil par l'Age du Fer. Des aménagements divers, la présence d'animaux domestiques et d'un matériel archéologique à fonction domestique indiquent des occupations de plus longue durée qui sont le fait d'activités pastorales.

Enfin l'emprise humaine sur le site semble s'affirmer à partir de l'Antiquité. On peut penser en effet que si la famille des Avei a pris la peine de marquer les limites de son domaine en pleine montagne alpine c'est que les alpages occupaient une place importante dans l'économie pastorale.

Au total l'Aulp du Seuil se situe du point de vue culturel au point de rencontre entre les influences méditerranéennes et rhodano-rhénales.

Remerciements

Nous tenons à remercier tout particulièrement la Réserve Naturelle des Hauts de Chartreuse pour l'intérêt et l'aide financière apportés à nos recherches, ainsi que M. Bruno de Quinsonnas, propriétaire et M. Bandet, exploitant, pour nous avoir facilité l'accès au site. Remerciements également à tous les nombreux bénévoles qui ont participé aux 13 campagnes de fouille, souvent dans des conditions météorologiques difficiles.

Bibliographie

- ANGELUCCI D.E., BARTOLOMEI G., BROGLIO A., CASSOLI P.F., IMPROTA S., MASPERO A., TAGLIACOZZO A., 1999. Plan de Frea, site 4 (Dolomites) : mobility, seasonality and the exploitation of the mountain environment during the Mesolithic, in A. Thévenin (éd.), L'Europe des derniers chasseurs, 5e colloque international UISPP, Commission XII, Grenoble, septembre 1995 : 443-448.
- BINTZ P. (dir.), ARGANT J., BEECHING A., BRENARD C., BRESSY C., BRISOTTO V., COUSSERAN S., CHAIX L., JEANNET M., MORIN A., NATON H.-G., PELLETIER D., THIÉBAULT S., THIRAUT E., 1998. Les sites archéologiques de l'Aulp du Seuil à St Bernard du Touvet (Chartreuse Isère), L'abri sous bloc n°1 rapport scientifique 1998, L'abri sous bloc n°2 rapport scientifique 1998, 113 p, éd. AVDPA.
- BINTZ, P., ARGANT, J., CHAIX, L., PELLETIER, D., THIÉBAULT, S., 1999. L'Aulp-du-Seuil, un site d'altitude du Mésolithique et du Néolithique ancien (Saint-Bernard-du-Touvet, Isère): études préliminaires, in A. Thévenin, (éd), L'Europe des derniers chasseurs: Epipaléolithique et Mésolithique. : Proceeding of the World Congress UISPP, Commission XII, Grenoble, septembre 1995. CTHS, Paris : 611-616.
- BINTZ, P., PELLETIER, D., 2000. Le site d'altitude du Mésolithique et du Néolithique de l'Aulp du Seuil (St-Bernard-du-Touvet, Isère, France). Premiers résultats, in Crotti, P. (éd.), Meso'97, Lausanne, novembre 1997: Cahiers d'Archéologie Romande 81 : 189-195.
- BINTZ P., MORIN A., PELLETIER D., 2004. Un site mésolithique et néolithique : l'abri n°1 de l'Aulp du Seuil à Saint Bernard du Touvet, Atlas culturel des Alpes occidentales de la Préhistoire à la fin du Moyen Age, dir. Colette Annequin, éd. Picard : 37.
- BINTZ P., SERRIÈRES L., 2008. L'Aulp du Seuil en Chartreuse, in J.-P. Jospin et F. Tassadite, Premiers bergers des Alpes, de la Préhistoire à l'Antiquité, éd. Musée Dauphinois de Grenoble : 102-103.
- BINTZ P., MILLET J.J., 2013. Vercors, terre de Préhistoire, Parc Naturel Régional du Vercors, éd. Glénat, Grenoble, 191 p.
- JOSPIN J.-P. ET VENDITELLI L., 2008. Un domaine pastoral en Chartreuse : celui des Avei. Premiers bergers des Alpes, de la Préhistoire à l'Antiquité, éd. Musée Dauphinois de Grenoble : 137-138.
- LEMERCIER O., 1998. Phénomène, culture et tradition : statuts et rôles du Campaniforme dans le IIIe millénaire. Actes de la séance S.P.F. du 8 novembre 1997, Musée des Antiquités Nationales, Saint-Germain-en-Laye. Bulletin de la Société Préhistorique Française, 1998, 3 : 365-382.
- MARTIN L, DELHON C, THIÉBAULT S, PELLETIER D., 2012. Plant exploitation and diet in altitude during Mesolithic and Neolithic: Archaeobotanical analysis from a hunting camp in the Chartreuse massif (l'Aulp-du-Seuil, Isère, France) in Review of Palaeobotany and Palynology 185 : 26-34
- MORIN A. 2000. Etat documentaire sur le Néolithique final dans le zone préalpine : massifs et piedmonts de la Chartreuse, du Vercors et pays du Buech: in Tillet (dir.) Les Paléoalpins, Hommage à Pierre Bintz, Revue de Géologie alpine, Grenoble, mémoire hors-série n° 31, 2000 : 211-229.
- MORIN A. 2007. Structures pastorales sur les Hauts de Chartreuse (Sainte-Marie-du-Mont-Chapareillan, Isère) rapport d'opération 2007 éd. AVDPA, Grenoble.

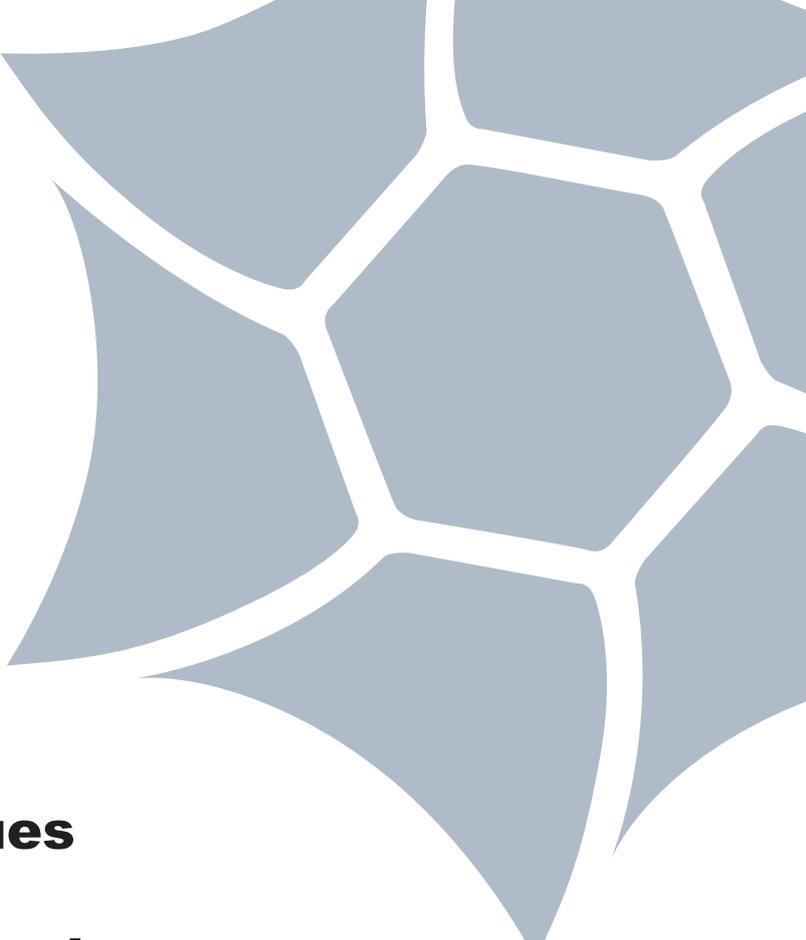
MORIN A., PELLETIER D., 2003. L'abri n° 1 de l'Aulp du Seuil (Saint-Bernard-du-Touvet, 1700 m, Chartreuse, Isère): résultats préliminaires sur le Néolithique final campaniforme d'un site d'altitude, Actes des quatrièmes rencontres méridionales de Préhistoire récente, Nîmes, novembre 2000.

OZANNE J.-C. ET PELLETIER D., 2002. Le mobilier en fer protohistorique in D. PELLETIER (2002), Labri sous bloc n°1 de l'Aulp du Seuil à St Bernard du Touvet (Chartreuse- Isère), Rapport scientifique fouille programmée pluriannuelle. 2000-2002, éd. AVDPA, Grenoble.

PELLETIER D., NATON H.-G., ARGANT J., CHAIX L., THIÉBAULT S., BRESSY C., COUSSERAN S., BRISOTO V., 2000. L'Abri n° 1 de l'Aulp du Seuil (Isère, Chartreuse, Saint-Bernard-du-Touvet) : synthèse des résultats préliminaires et discussion sur les modalités d'exploitation territoriale au Mésolithique et au Néolithique ancien: in Tillet (dir.), Les Paléoalpins, Hommage à Pierre BINTZ, Revue de Géologie alpine, Grenoble, mémoire hors-série n° 31, 2000 : 165-177.



Le lac d'Anterne (2 063 m), dans la réserve naturelle nationale de Sixt-Passy. Ce paysage, analysé par deux chercheurs, a révélé des éléments permettant d'éclairer les derniers 10 000 ans d'évolution du bassin versant. On voit sur cette photo certains des cours d'eau apportant des sédiments dans le lac



Evolution du paysage, du climat et des pratiques pastorales autour de la montagne d'Anterne depuis 10 000 ans

Cet article présente comment deux approches scientifiques de deux disciplines a priori très éloignées, la sédimentologie et l'archéologie, ont été réunies autour d'un même projet de recherche : PYGMALION.

Au sein de ce projet, plusieurs sites-ateliers ont été retenus, parmi lesquels le bassin versant du lac d'Anterne, dans la réserve naturelle nationale de Sixt-Passy, intégrant pour la partie archéologie celle de Passy, qui lui est mitoyenne. La complémentarité des résultats permet de proposer un scénario d'évolution des paysages, individualisant 5 étapes successives.

Pourquoi s'intéresser à l'évolution passée des paysages alpins ?

Les paysages alpins, caractérisés par le couvert végétal, les glaciers, la faune, etc., sont en grande partie modelés par les fluctuations du climat. Reconstituer l'histoire des paysages apporte donc des indications sur les modifications climatiques passées. Cette thématique présente d'autant plus d'intérêt qu'aujourd'hui nous vivons dans un contexte de changement du climat dont l'évolution future reste encore incertaine, notamment en ce qui concerne l'activité hydrologique.

La question des fluctuations du cycle hydrologique est cruciale pour la gestion des territoires de montagne (ressource en eau, risque de crues, enneigement des stations). En contribuant à une meilleure compréhension de la variabilité climatique naturelle, l'étude des changements passés permet de mieux prévoir l'évolution future du climat et ainsi d'appréhender ses répercussions sur notre société.

Charline Giguet-Covex
Sédimentologue-géochimiste
Laboratoire LECA, CNRS,
Université de Grenoble

Pierre-Jérôme Rey
Archéologue,
Laboratoire EDYTEM, CNRS
Université de Savoie

Cet article a fait l'objet d'une publication dans Nature et Patrimoine en pays de Savoie

Les activités humaines liées au pastoralisme⁽¹⁾ et parfois à l'activité minière ont également contribué à façonner les paysages alpins. Les pelouses alpines que nous observons aujourd'hui en constituent l'exemple le plus frappant, puisqu'elles ont entièrement été créées par l'homme. Un problème se pose alors : comment distinguer les impacts anthropiques sur le paysage de ceux du climat ?

La rareté des connaissances actuelles sur les premiers peuplements des Alpes du nord françaises ne facilite pas la résolution de cette question. Il ne s'agit pas de la conséquence d'une absence de peuplement, ni d'un soi-disant effet de l'érosion. En effet, l'archéologie des Alpes est tout aussi riche et tout aussi complexe que celle des régions de plaine, pour peu que l'on décide de s'y intéresser par des opérations de prospections, de sondages et de fouilles.

Comment reconstituer les paysages et distinguer les changements d'origines climatique et anthropique ?

Pour aborder le problème dans son ensemble, il est nécessaire d'adopter une approche pluridisciplinaire croisant des informations à la fois sur l'occupation humaine, l'érosion des sols, le couvert végétal et le climat. C'est dans ce contexte que le programme de recherche PYGMALION a vu le jour.

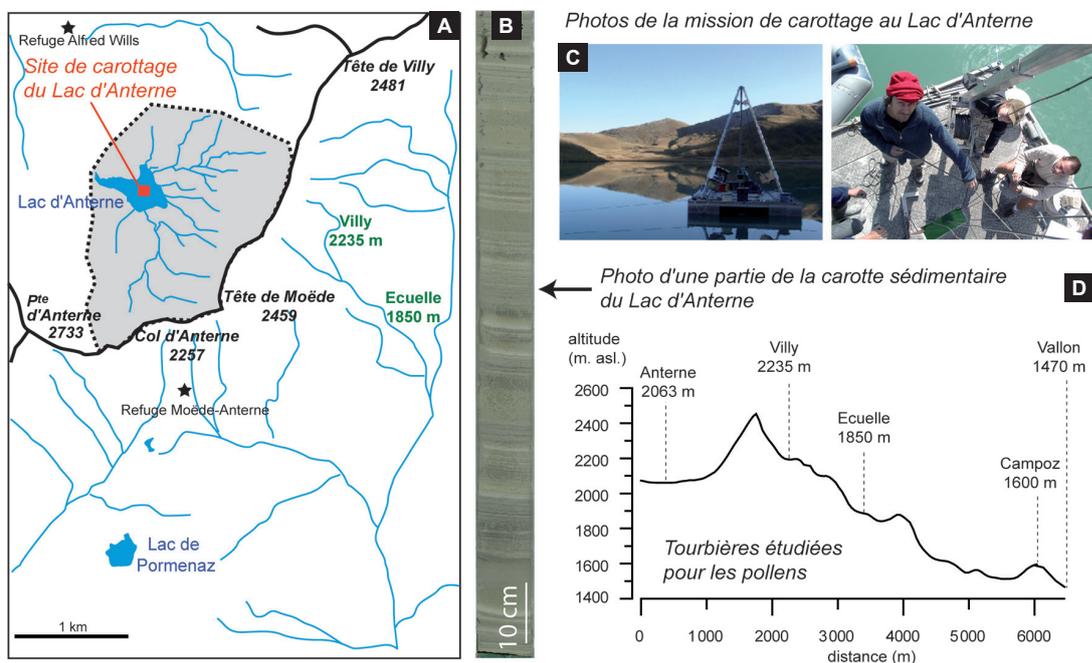
Son objectif général était de mieux comprendre l'évolution passée de l'activité hydrologique dans les Alpes et les interactions entre l'homme, le climat et son environnement. Il réunit des paléoécologues travaillant sur les pollens, les restes de bois fossilisés et sur les fossiles d'organismes vivants dans les lacs, mais aussi des sédimentologues-géochimistes travaillant sur les sédiments lacustres et enfin des archéologues et historiens.

Dans le cadre de ce programme de recherche, trois gros chantiers ont été entrepris autour du lac d'Anterne et de la montagne de Pormenaz : l'un portant sur l'étude d'une carotte de sédiments prélevée dans le lac d'Anterne, un autre sur l'étude de plusieurs carottes provenant de tourbières situées à différentes altitudes (fig. 1-A) et le dernier sur des prospections et sondages archéologiques.

(1) afin d'accroître les surfaces de pâtures, les Hommes ont abondamment défriché, notamment à la limite supérieure de la forêt. De plus, l'abrutissement des buissons et des jeunes plants par les bêtes a empêché la régénération de la forêt

(2) la datation des carottes de sédiments est basée sur la mesure de l'activité radiologique du carbone 14 (¹⁴C) contenu dans les végétaux terrestres déposés dans les sédiments. Cette activité dépend du temps écoulé depuis la mort des végétaux prélevés. Cette méthode permet de dater des sédiments sur une période de temps allant de quelques siècles à 35 000 ans

Fig. 1 - Localisation du lac d'Anterne et du site de carottage dans le lac. Photos de la mission de carottage et de la carotte de sédiments prélevée. Profil topographique situant les tourbières carottées pour l'étude des pollens



En septembre 2007, une carotte de sédiments de plus de 20 mètres de long a été prélevée dans le Lac d'Anterne (fig. 1-B et C). La datation⁽²⁾ de cette carotte a révélé un enregistrement de la sédimentation sur plus de 10 000 ans. Pour extraire les informations contenues dans cette archive, les caractéristiques physiques (principalement la taille des grains et la couleur du sédiment) ainsi que la composition chimique des sédiments ont été analysées. Les données obtenues nous renseignent sur l'évolution des sols, l'érosion du bassin versant et de manière indirecte sur la couverture végétale en relation avec les changements du climat et/ou les activités humaines. L'étude de la taille des grains du sédiment notamment, nous a permis de repérer des dépôts associés à des événements de crues. La fréquence de ces dépôts depuis 10 000 ans, ainsi que leur épaisseur traduisent l'intensité de l'érosion du bassin versant (fig. 2).



Fig. 3 - Le travail de sondage a impliqué de nombreux participants bénévoles

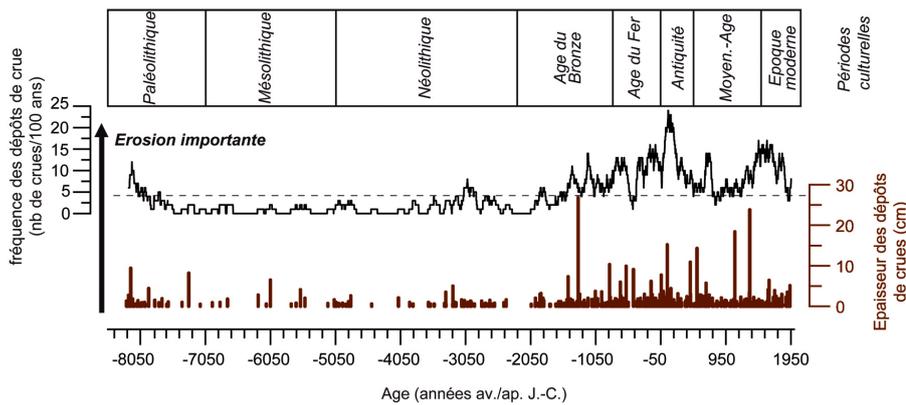


Fig. 2 - Evolution de l'érosion depuis 10 000 ans, déduite de l'analyse sédimentologique de la carotte

Plusieurs tourbières, situées le long d'un transect altitudinal, ont également été carottées entre 2006 et 2008 (fig. 1-D). L'analyse des pollens contenus dans ces tourbières constitue un enregistrement de l'évolution de la végétation et donc du paysage autour de la montagne d'Anterne, couvrant la période entre 10 000 ans et 2000 ans avant aujourd'hui.

De 2008 à 2011, une opération de sondages archéologiques a été conduite entre Sixt et Servoz pour documenter les premières occupations humaines des alpages et des versants. Si les travaux réalisés dans les versants ont eu peu de résultats, les découvertes ont été plus nombreuses en altitude. Après de rapides repérages préalables, près de 160 petits sondages manuels ont été réalisés sur le plateau d'Anterne et la montagne de Pormenaz, avec l'autorisation des Réserves Naturelles de Haute-Savoie et sous l'étroite surveillance des gardes, afin de ne pas porter atteinte à des plantes protégées. Ces sondages ont été implantés sur les zones planes et abritées, propices à une installation humaine (fig 3 et 4), et sur les quelques ruines en pierres repérées au cours des prospections : enclos, cabanes, abris (fig. 5).

Assez nombreux, les résultats sont principalement constitués de structures et de niveaux d'occupations fréquemment dépourvus de mobiliers archéologiques (foyers, empierrements, couches ...).

La réalisation de datations par le carbone 14 à partir de charbons de bois ou de fragments d'os est donc bien souvent la seule manière de préciser la chronologie des sites découverts. Parfois cependant, il a

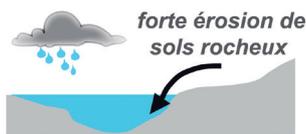


Fig. 4 - Vue d'une tranchée de sondage archéologique

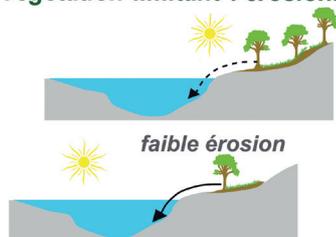


Fig. 5 - Vue d'une petite structure en pierres proche des pertes du lac d'Anterne, qui n'a pas pu être datée

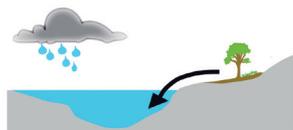
- 1** 8250 à 7850 av. J.-C.:
*peu de temps après le retrait
des glaciers ...*



- 2** 7850 à 3600 av. J.-C.:
*Réchauffement du climat
favorisant la mise en place
progressive des sols et de la
végétation limitant l'érosion.*



- 3** 3600 à 2850 av. J.-C.:
*Climat plus humide permettant
l'érosion de sols développés et
de sols rocheux et baisse de la
limite supérieure de la forêt.*



- 4** 1450 av. J.-C.:
*Climat plus humide et phase
d'activités humaines favorisant
l'érosion de sols développés.
changement majeur dans la
dynamique d'érosion.*



- 5** 450 av. J.-C.-150 ap. J.-C.:
*Nouvelle phase d'activités
humaines favorisant
l'érosion de sols développés.
Crise érosive la plus forte des
derniers 10000 ans.*



- 6** 1400-1900 ap. J.-C.:
*Péjoration climatique entraînant
la dégradation du couvert végétal
et l'érosion des sols développés.
L'activité pastorale est toujours
présente.*



été possible de découvrir quelques vestiges (silex taillés, os d'animaux consommés, fragments de poterie...) qui permettent d'approcher les activités réalisées sur le site.

L'ensemble des données recueillies permet une première restitution des évolutions du paysage et du peuplement depuis la déglaciation, autour de la montagne d'Anterne. L'analyse de ces résultats fournit aussi une première évaluation du rôle respectif des activités humaines et du climat dans les changements environnementaux observés.

10 000 ans d'histoire autour du lac d'Anterne

La carotte de sédiment du lac d'Anterne étant notre unique archive continue dans le temps depuis 10 000 ans, elle constitue le fil conducteur de notre histoire. Les pollens des tourbières et les données archéologiques complètent l'image du paysage et des occupations humaines durant certaines périodes de cette histoire.

Avant 7 850 ans av. J.-C., les dépôts de crues dans le lac d'Anterne sont assez fréquents, ce qui traduit une érosion importante liée à l'absence ou la quasi-absence de végétation dans le bassin versant (fig. 6, vignette 1).

Des indicateurs géochimiques, marquant la présence de sols peu développés, ainsi que les données sur les pollens confirment cette interprétation. A partir de 7 850 ans av. J.-C., 5 grandes étapes ont pu être définies à partir des données environnementales et archéologiques.

Etape 1 : de 7 850 à 3 600 av. J.-C. (du Mésolithique à la fin du Néolithique moyen)

Durant cette période, la fréquence des dépôts de crue diminue dans le lac d'Anterne. Ceci traduit une baisse de l'érosion, vraisemblablement due à la mise en place de la végétation et donc de sols développés dans le bassin versant (fig. 6, vignette 2). Selon les données géochimiques du sédiment, un maximum d'extension de la végétation est atteint entre 5 850 et 3 600 ans av. J.-C. autour du lac d'Anterne. Un morceau de pin cembro, daté vers 3 950 av. J.-C., a été retrouvé dans une des tourbières près du lac. Il faut alors imaginer une forêt clairsemée de pins cembro. Cette phase est connue comme la période la plus chaude de l'Holocène⁽³⁾, durant laquelle la plupart des glaciers étaient absents des Alpes et la limite supérieure de la forêt était la plus haute (2 400 m).

Des indices de fréquentations épisodiques (quartz et silex taillés, traces de foyers) ont été retrouvés sur une petite butte morainique en contrebas du Petit Col d'Anterne, vers 1 930 m d'altitude. Bien que le site soit mal conservé, plusieurs datations échelonnées dans le temps montrent un usage récurrent du site par les dernières populations de chasseurs du Mésolithique, à partir de 5 900 avant notre ère, puis par les premières populations du Néolithique. La rareté des vestiges indique qu'il s'agit vraisemblablement d'une succession de bivouacs ou de haltes de courte durée.

Fig. 6 - Synthèse de l'évolution du paysage autour du lac d'Anterne (basée sur les sédiments).

Les chiffres renvoient aux vignettes citées dans le texte

Etape 2 : de 3 600 à 1 600 av. J.-C. (du Néolithique final à la fin du Bronze ancien)

A partir de 3 600 av. J.-C., le climat devient plus froid et plus humide. Ce renversement climatique est généralement appelé « Néoglacière ». Dans le bassin versant d'Anterne, ce changement se traduit par une augmentation de la fréquence des dépôts associés à des crues et donc de l'érosion (fig. 2). De tels changements dans la sédimentation s'expliquent à la fois par une dégradation du couvert végétal liée à un climat plus froid mais aussi par une augmentation des précipitations entraînant l'érosion des pentes du bassin versant (fig.6, vignette 3).

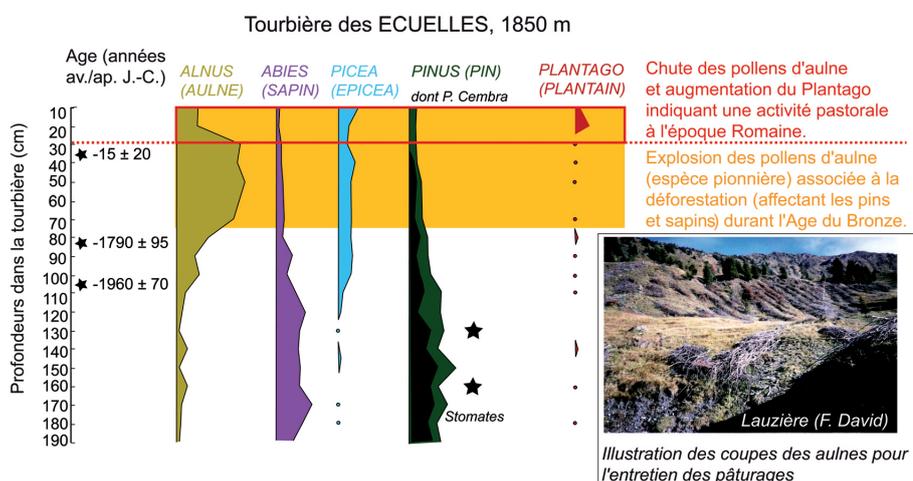
Cette dégradation du couvert végétal se traduit notamment par une baisse de la limite supérieure de la forêt révélée par les pollens. Le site Sous le Petit Col reste fréquenté très épisodiquement. La continuité que l'on observe dans l'occupation de ce site suggère que la chasse pourrait encore jouer un rôle important.

Etape 3. de 1 600 à 400 av. J.-C. (du Bronze moyen à la fin du Premier Âge du Fer)

Une nouvelle phase d'augmentation des processus d'érosion intervient autour de 1 450 ans av. J.-C., et correspond à une période de changement majeur dans le bassin versant (fig. 6, vignette 4). En effet, à partir de ce moment la fréquence et l'épaisseur des dépôts de crues atteignent des valeurs quasiment jamais vues auparavant (fig. 2).

Nos analyses géochimiques indiquent une érosion importante des couches profondes des sols développés.

Une telle incision dans les sols suggère une phase de déforestation.



Celle-ci est par ailleurs confirmée par l'étude des pollens. Sur le site des Ecuelles notamment, à 1850 m d'altitude (fig. 7), on peut voir la chute des pollens de sapin et surtout l'augmentation de l'aulne, une espèce pionnière favorisée par le déboisement. L'Homme semble donc à l'origine des modifications des processus d'érosion observés. Cependant, une influence conjointe du climat ne peut être totalement écartée. En effet, les études menées sur les glaciers, la limite supérieure de la forêt et les fluctuations du niveau des lacs alpins suggèrent que le climat devient aussi plus froid et plus humide entre 1 550 et 1 150 av. J.-C.



Les bovins aussi s'intéressent à l'archéologie...

Figure 7 : Evolution des pollens retrouvés dans la tourbière des Ecuelles (d'après les travaux de Fernand David). La présence des stomates de pin indique leur présence sur le site



Fig. 8 - Vue générale du sud de la tourbière du Laouchet

l'Holocène est la période interglaciaire (chaude) dans laquelle nous vivons aujourd'hui et qui a débuté il y a 11 600 ans

Fig. 9 - Sondage sur la cabane en pierre du sud de la tourbière du Laouchet (site Laouchet 15)



Fig. 10 - Vue des sites de la rive sud du lac d'Anterne



Fig. 11 - Relevé topographique des cabanes et de l'enclos installés sur la rive sud du lac d'Anterne

Au même moment, les données archéologiques confirment une présence humaine en croissance. Des foyers isolés se rencontrent en plusieurs endroits (secteurs de Moëde et du Plane en particulier) durant l'âge du Bronze et le premier âge du Fer. Le sommet d'une petite éminence morainique au sud de la tourbière du Laouchet est occupé dès le Bronze moyen vers 1 500 av. J.-C. (fig. 8). Les observations suggèrent la présence à cette époque d'une cabane en bois sur poteaux plantés. Au premier âge du Fer, vers 700 av. J.-C., le site est réutilisé par une cabane en pierre, qui constitue la plus ancienne construction de ce type découverte dans la zone étudiée (fig. 9). Au même moment des traces d'une autre construction en bois ont été observées au sud des chalets d'Anterne, au pied d'une pente d'éboulis, sur un petit promontoire qui domine la tourbière.

Etape 4 : de 400 av. J.-C. à l'an mil (du Second âge du Fer à la fin du Haut Moyen Âge)

La troisième phase d'augmentation des apports de sédiments dans le lac est enregistrée entre 450 ans av. J.-C. et 150 ans ap. J.-C. (c'est-à-dire entre le second âge du Fer et la période romaine). Hors, cette période est connue comme étant chaude et sèche, c'est-à-dire des conditions non favorables à une forte érosion (fig. 6, vignette 5).

Une activité pastorale intense pourrait alors expliquer cette crise érosive. L'étude des pollens de la tourbière des Ecuelles nous montre qu'à cette époque les aulnes disparaissent quasiment du paysage. Dans un extrait de juillet 1817 d'une délibération du conseil communal de Sixt-Fer-à-Cheval, des coupes d'aulnes brûlés sur place pour l'entretien des pâturages sont mentionnées. Il est précisé que cette pratique existait déjà auparavant. Elle est encore utilisée aujourd'hui à certains endroits comme le montre la photo prise dans le massif de la Lauzière en Maurienne (fig. 7).

La présence de pollens de plantain, un marqueur d'activité pastorale, appuie l'hypothèse d'une crise érosive liée aux activités humaines.

Les données archéologiques sont inégales durant cette période. Sur la rive sud du lac d'Anterne (fig. 10 et 11), deux petites cabanes accolées installées à l'aval d'un gros rocher, ont livré une couche épaisse, riche en charbons de bois (fig. 12), contenant des fragments de poterie et des ossements d'animaux (fig. 13). Deux datations par le radiocarbone

indiquent une occupation du site à partir du Second âge du Fer et surtout durant les deux premiers siècles de notre ère (385-205 ans av. J.-C. et 85-245 ans ap. J.-C.). Les quelques fragments de céramiques découverts confirment ces résultats car ils sont caractéristiques de l'époque romaine. La détermination des ossements découverts dans le niveau d'occupation montre la présence importante du mouton et confirme l'utilisation des lieux dans le cadre de pratiques pastorales.

Un peu en amont de cette cabane, un enclos rectangulaire très altéré est recoupé par le sentier actuel. Il n'a malheureusement pas pu être daté malgré plusieurs sondages. On remarquera cependant qu'aucun enclos n'a été observé à proximité des cabanes antérieures au Second âge du Fer.

Dans le reste de la zone étudiée, les traces de l'époque romaine sont beaucoup plus discrètes, vraisemblablement car les sites ont été réoccupés et réaménagés par la suite. La découverte d'un bâtiment romain, enfoui juste à côté des chalets d'Ecuelles montre bien ce phénomène. Une petite cabane de la fin de l'Antiquité a également été découverte au nord de la tourbière du Laouchet. Sur ce même site, les sondages ont aussi révélé la présence d'un grand enclos ovale (fig. 14) et de plusieurs cabanes occupées durant le haut Moyen Âge, du VI^e au X^e siècle.

Enfin, à l'autre extrémité du secteur étudié une cabane en pierre est édifée durant la même période sur le promontoire qui domine le sud de la tourbière des chalets d'Anterne (près du refuge Alfred Wills). Le début du Moyen Âge (période burgonde) ne montre donc aucun recul dans l'exploitation des alpages, à l'échelle des montagnes d'Anterne et Pormenaz.

L'étude des pollens et les données archéologiques confirment que l'érosion des sols développés, enregistrée dans les sédiments du lac d'Anterne, est liée à une forte activité pastorale dans le bassin versant pendant l'Antiquité. Par la suite, la diminution de l'érosion suggère une déprise dans le bassin versant du lac d'Anterne. Cette évolution ne se retrouve pas dans le secteur de Pormenaz qui reste intensément occupé.

Etape 5 : de l'an mil à l'actuel

La dernière phase d'augmentation des processus d'érosion débute en 1 400 ap. J.-C. et se termine en l'an 1 820 (fig. 2). Cette phase s'explique probablement par une dégradation climatique connue sous le nom de « Petit Âge Glaciaire » (PAG), qui correspond à la phase d'avancée maximale des glaciers enregistrée au cours de l'Holocène. Durant le PAG, le climat était beaucoup plus froid et humide, ce qui aurait favorisé la dégradation des sols développés ; le froid et la présence de neige durant une grande partie de l'année limitant la croissance de la végétation.

Une phase d'érosion plus modérée précède le PAG (1 050-1 250 ap. J.-C.). Elle est caractérisée par l'érosion préférentielle des horizons de surface des sols développés, tout comme durant le PAG. Cette phase pourrait s'expliquer par la présence d'une activité pastorale dans le bassin versant.

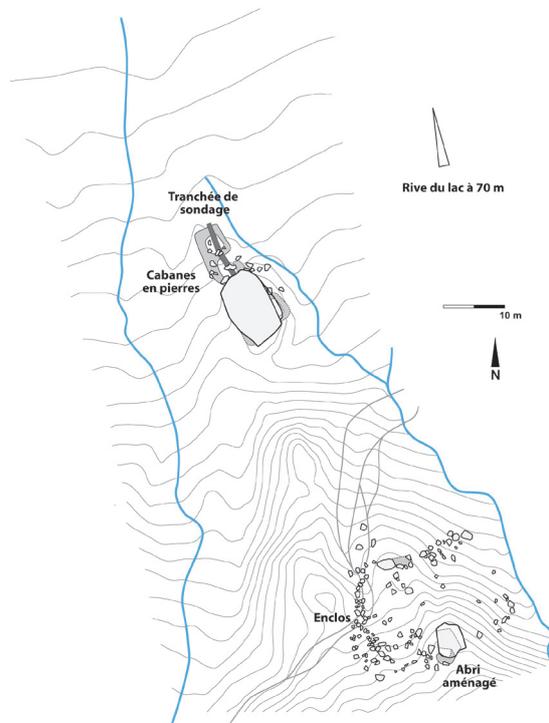


Fig. 12 - Vue en coupe des niveaux romains dans les cabanes de la rive sud du lac d'Anterne (tranchée de sondage de la fig. 11)



Fig. 13 - Fragments de céramiques romaines découverts dans les cabanes de la rive sud du lac d'Anterne



Fig. 14 - Vue générale des tranchées réalisées sur le grand enclos ovale du Laouchet

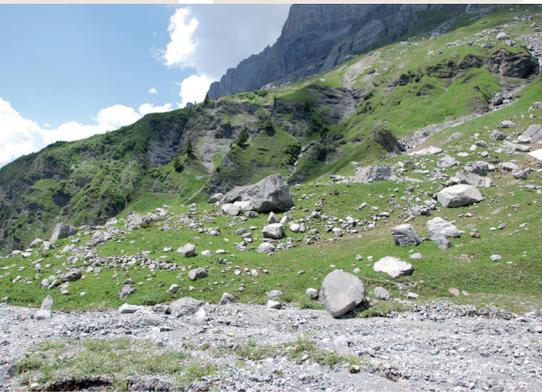


Fig. 15 - Vue générale des cabanes et des enclos d'Entrevie dans le ravin du Souay



Fig. 16 - Fouilles sur le site de l'enclos sud du Plane



Fig. 17 - Les chalets de Moëde sont un exemple de chalets groupés encore utilisés

Les données archéologiques soutiennent bien cette hypothèse. A Entrevie dans le ravin du Souay (fig. 15) et au Plane sur le revers de la montagne de Pormenaz (fig. 16), nous avons sondé deux sites complexes, constitués d'enclos et de cabanes accolés de tailles variables. S'il est difficile de penser que les quelques datations disponibles reflètent la totalité de la durée d'utilisation de ces structures, les résultats situent pour l'instant l'occupation des lieux au milieu du Moyen Âge entre le XI^e et le XIV^e siècle.

Par la suite, durant les XV^e et XVI^e siècles, et même si les données historiques doivent encore être précisées, les sites à cabanes et enclos bas en pierres semblent perdre de leur importance au profit des chalets couverts et groupés en petits hameaux. La construction de ces chalets groupés correspond à la diffusion de nouveaux modes d'exploitation des alpages. Ils resteront utilisés jusqu'au début du XX^e siècle (fig. 17). L'érosion importante enregistrée dans les sédiments du lac d'Anterne durant le PAG pourrait donc être causée non seulement par le climat plus froid et plus humide, mais aussi par les activités humaines.

La carte des sites archéologiques découverts montre clairement que les sites anciens à enclos et cabanes ont été conservés dans les zones qui n'ont pas été réaménagées par la suite (fig. 18). Les groupes de chalets construits depuis le XVI^e siècle sont donc vraisemblablement installés sur des sites plus anciens. Des recherches menées dans le hameau ruiné d'Ecuelle (fig. 19) confirment cette hypothèse avec la découverte d'un silex taillé du Néolithique et d'un bâtiment romain enfoui sous le sol des ruines sub-actuelles (fig. 20).

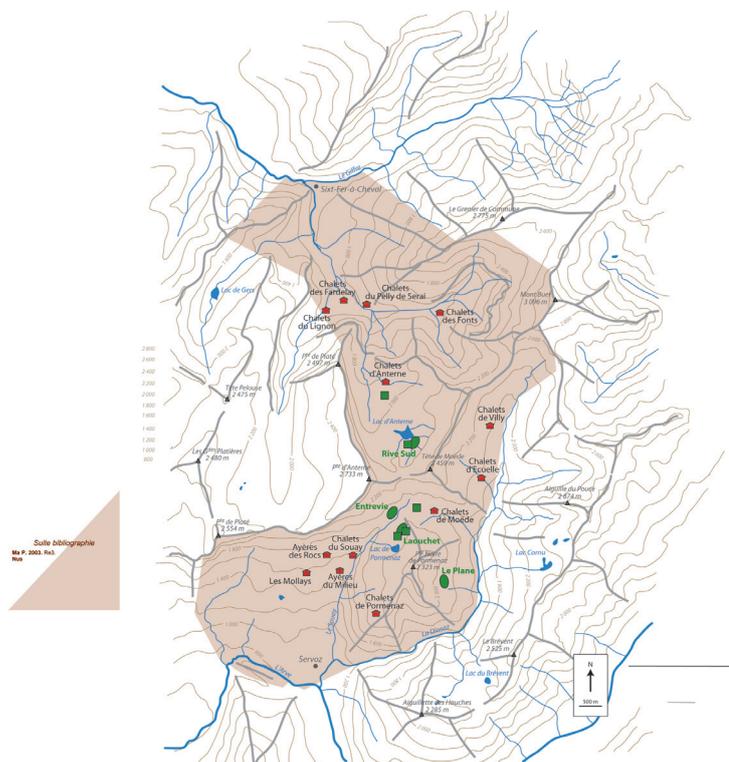


Fig. 18 - Carte des chalets groupés (en rouge) et des cabanes (carrés) et enclos anciens (ovales) étudiés (en vert), sur le territoire de travail

Conclusion

Depuis 10 000 ans, le changement majeur dans les processus d'érosion a eu lieu au milieu de l'âge du Bronze. A partir de ce moment, la fréquence des crues ne revient quasiment jamais aux conditions précédentes. La profonde modification du paysage, très vraisemblablement causée par les activités humaines et en particulier par le développement du pastoralisme, a eu pour effet d'augmenter la sensibilité du système aux processus d'érosion et donc à l'enregistrement des événements de précipitation.

A partir de cette période, nous avons pu mettre en évidence que les événements de crues archivés dans les sédiments sont plus fréquents en périodes froides et humides et plus rares mais de plus forte intensité en périodes chaudes. Cette augmentation de la sensibilité du bassin versant aux processus hydrologiques, en lien avec une activité humaine ancienne, montre qu'il existe une notion d'héritage des changements passés sur le fonctionnement actuel des écosystèmes.

Notre approche combinant sédimentologie, géochimie, palynologie et archéologie a permis non seulement de reconstruire les changements de paysage et la dynamique d'érosion, mais aussi de mieux en comprendre les origines climatiques et/ou humaines.

Au terme de cette étude, de nouvelles questions se posent sur l'évolution des modalités des pratiques pastorales de ce territoire. Notamment, quelles ont été les productions animalières recherchées (lait et/ou viande) ? Quelles sont les espèces privilégiées (mouton ou bovin). Le développement récent des analyses d'ADN préservé dans les sédiments offre une piste nouvelle et prometteuse pour aller plus loin sur ces questions.

Nos premiers résultats sur les sédiments du lac d'Anterne apportent déjà quelques réponses. Notamment, autour du XIII^e siècle, ils mettent en évidence le passage de troupeaux mixtes ovins-bovins à des troupeaux uniquement composés de bovins, suggérant alors une spécialisation dans l'exploitation laitière.

Perspectives

Pour mieux caractériser et comprendre l'évolution des pratiques humaines sur le territoire, il serait nécessaire d'étendre ce type d'analyse à d'autres sédiments de lacs, tel que le lac de Pormenaz, mais aussi aux sites archéologiques découverts lors des prospections et opérations de sondages. Les évolutions historiques des structures pastorales et les changements économiques et sociaux qui les expliquent mériteraient aussi d'être précisés par des études sur les archives historiques.

Enfin, sur le terrain, la fouille extensive d'un hameau de chalets groupés pourrait être très utile si les conditions de conservation le permettent pour mieux comprendre l'évolution des structures pastorales depuis la Protohistoire jusqu'à l'actuel.



Fig. 19 - Les chalets ruinés d'Ecuelle dans le vallon de Villy



Fig. 20 - Fragments de céramiques antiques découverts en sondage à Ecuelle

Bibliographie

DAVID F., 2010. Expansion of green alder (*Alnus alnobetula* [Ehrh] K. Koch) in the northern French Alps : A palaeoecological point of view. *Compte Rendu de l'Académie des sciences, Biologies* 333 : 424–428.

GIGUET-COVEX C., 2010. Contribution des sédiments laminés lacustres à l'étude des changements environnementaux holocènes. Thèse, Université de Savoie, 335 p.

HOLZHAUSER, H., MAGNY, M., ZUMBUHL, H.J., 2005. Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years. *The Holocene* 15, 789–801.

IVY-OCHS S., KERSCHNER H., MAISCH M., CHRISTL M., KUBIK P.-W. AND SCHLÜCHTER C., 2009. Latest Pleistocene and Holocene glacier variations in the European Alps. *Quaternary Science Review*.

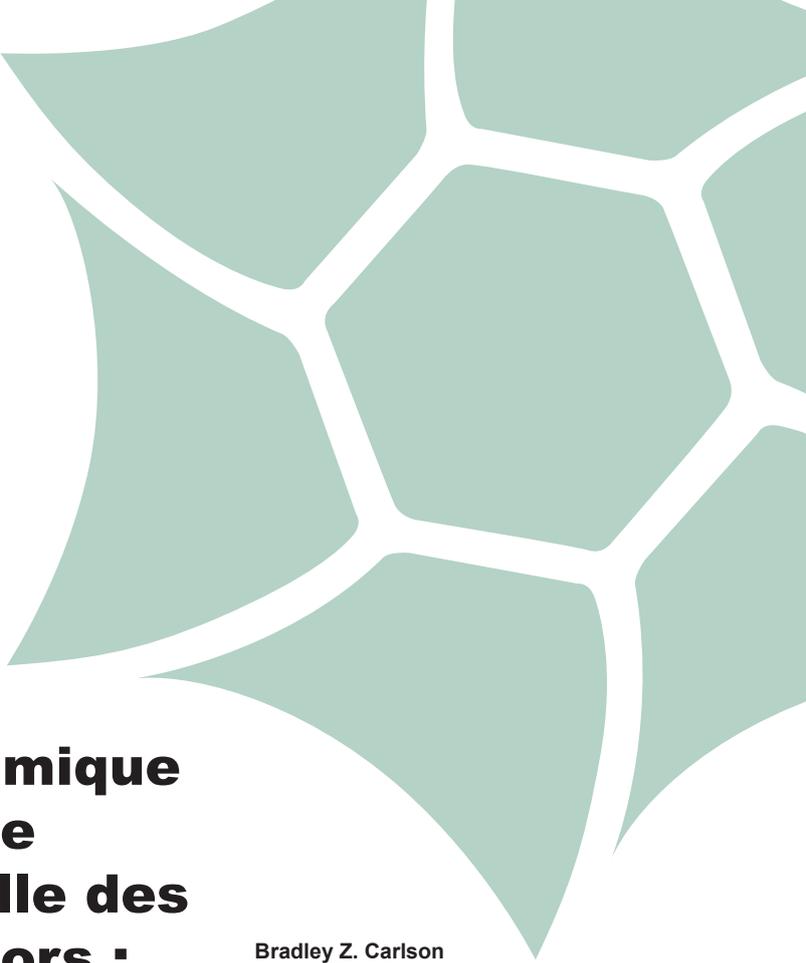
LEEMAN, A., NIESSEN, F., 1994. Holocene glacial activity and climatic variations in the Swiss Alps: reconstructing a continuous record from proglacial lake sediments. *The Holocene* 4, 259–268.

MAGNY M., HAAS J.N., 2004. A major widespread climatic change around 5300 cal. BP at the time of the Alpine Iceman. *Journal of Quaternary Science* 19 : 423-430.

NICOLUSSI K., KAUFMANN M., PATZELT G., VAN DER PLICHT J., THURNER A., 2005. Holocene tree-line variability in the Kauner Valley, Central Eastern Alps, indicated by dendrochronological analysis of living trees and subfossil logs. *Veget. Hist. Archaeobot.* 14 : 221-234.

REY P.-J. 2009. Programme de prospections-sondages sur les premières occupations humaines des versants du col d'Anterne. *Revue Savoisienne*, p. 39-43.

REY P.-J. 2010. Passy-Servoz. Les premières occupations humaines des versants du col d'Anterne. *Bilan scientifique de la Région Rhône-Alpes 2009*. Lyon : Service Régional de l'Archéologie. p. 198-200.



Modélisation de la dynamique de l'écotone forêt-prairie dans la Réserve Naturelle des Hauts Plateaux du Vercors : implications pour la gestion conservatoire

Bradley Z. Carlson
Julien Renaud

Laboratoire d'Ecologie Alpine, UMR CNRS-UJF
5553, Univ. Grenoble Alpes, F-38041 Grenoble

Philippe Choler

E-mail : philippe.choler@ujf-grenoble.fr Tel (33)
4 76 51 45 43. Fax (33) 4 76 51 44 63

Pierre-Eymard Biron

Réserve Naturelle des Hauts Plateaux du
Vercors, Parc Naturel Régional du Vercors,
F-38250 Lans-en-Vercors

Note: ce texte est une adaptation d'un article à paraître dans la revue Ecological Applications

B. Z. Carlson, J. Renaud, P.-E. Biron, P. Choler, Long-term modeling of the forest grassland ecotone in the French Alps: implications for pasture management and conservation. Ecological Applications, doi: <http://dx.doi.org/10.1890/13-0910.1>

Introduction

L'expansion des forêts d'altitude aux dépens des espaces agropastoraux constitue un phénomène global et bien documenté dans plusieurs zones de montagne d'Amérique du Nord (Briggs et al. 2005), d'Europe (Kullman 2002; Gellrich et Zimmermann 2007; Améztegui et al. 2010) et d'Australie (Wearne et Morgan 2001). Les dynamiques de l'écotone forêt-prairie posent des questions de gestion conservatoire d'espèces, d'écosystèmes et de paysages présentant souvent une forte valeur patrimoniale. (Barbaro et al. 2001, Dullinger et al. 2003a; Schweiger et al. 2011).

Les études portant sur cet écotone forêt-prairie sont confrontées au défi de dissocier ce qui, dans la dynamique observée, relève des changements climatiques et des changements d'utilisation des terres (Gehrig-Fasel et al. 2007). La limite supérieure des arbres en montagne est principalement une limite thermique (Körner et Paulsen 2004). À l'échelle mondiale, 52 % des limites supérieures des forêts se sont déplacées vers des altitudes plus élevées et ces déplacements



sont souvent mis en relation avec des hausses significatives des températures dans les zones de montagne (Harsch *et al.* 2009). Les montagnes européennes ont par exemple enregistré des augmentations d'environ 2° C au cours des dernières décennies ce qui est sensiblement plus élevé que l'augmentation de la température enregistrée dans les plaines (Beniston *et al.* 1997). Les changements climatiques en cours pourraient donc entraîner et/ou accélérer l'expansion des forêts dans les zones de montagne européennes (Theurillat et Guisan 2001; Dullinger *et al.* 2003b). Les modèles prédictifs de l'expansion forestière sont cependant compliqués à construire du fait de réponses non linéaires de la croissance des ligneux au forçage climatique, de la sensibilité des espèces aux événements extrêmes et des effets négatifs du réchauffement sur le bilan hydrique des sols, des interactions entre espèces etc. (Camarero et Gutiérrez 2007; Batllori *et al.* 2009).

En Europe, les paysages de montagne ont été façonnés par des milliers d'années d'activités humaines (Kaplan *et al.* 2009). Les changements d'utilisation des terres ont un effet très fort sur la dynamique de l'écotone forêt - prairie. La déprise agricole, la disparition des modes de gestion traditionnelles des espaces agro-pastoraux au cours du 20^e siècle ont été identifiées comme des causes majeures de l'expansion des forêts de montagne (Gellrich et Zimmermann 2007; Améztegui *et al.* 2010; Vicente Serrano *et al.* 2004; Tasser *et al.* 2007). Si la contribution réelle du pâturage aux modifications de la dynamique des ligneux reste un sujet très débattu (Cairns et Moen 2004; Dalen et Hofgaard 2005; Sankey *et al.* 2006), ce qui fait moins débat est le rôle central joué par les pratiques d'entretien des espaces agro-pastoraux, comme l'arrachage des arbustes, l'écobuage, sur la dynamique des paysages (Körner 2007). Il a été montré dans les Pyrénées que la destruction d'arbustes comme le Genévrier nain contribue très fortement à limiter la dynamique des arbres en zone de montagne dans la mesure où ces arbustes créent un microhabitat favorable à la survie et la croissance de ligneux dans des conditions climatiques difficiles (Castro *et al.* 2004). L'effet conjugué de la baisse de la pression de pâturage et de l'abandon des pratiques traditionnelles pourrait donc favoriser une expansion des forêts de montagne et ce indépendamment des changements climatiques.

Dans ce contexte, l'étude comparative de l'écotone forêt-prairie dans des zones soumises ou non à une gestion agro-pastorale permet de mieux distinguer la contribution des facteurs climatiques et des facteurs d'utilisation des terres dans les dynamiques observées. Nous avons récemment réalisé une telle étude dans la Réserve Naturelle des Hauts Plateaux du Vercors (RNHPV) avec l'objectif de quantifier, à haute résolution spatiale et temporelle, la distribution spatiale des ligneux et d'élaborer un modèle statistique spatialement explicite de la dynamique de l'écotone forêt-prairie dans les zones pâturées et dans des zones non pâturées. Cette étude sur l'évolution des paysages de la RNHPV depuis les années 1950 permet d'établir un diagnostic précis et quantifié devant servir d'élément de réflexion et d'outil de communication dans les débats portant sur la gestion de ce territoire.

MÉTHODES

Zone d'étude

La Réserve Naturelle des Hauts Plateaux du Vercors (RNHPV), située dans le Parc Naturel Régional du Vercors, a été créée en 1985. La zone d'étude considérée ici ne couvre que 150 des 170 km² de la réserve car certaines zones de topographie très abrupte ont été exclues en raison de difficultés techniques rencontrées lors du traitement des images aériennes anciennes (Fig. 1B). La RNHPV est principalement formée d'un plateau karstique développé sur calcaire Urgonien et couvrant une gamme d'altitude de 1050m à 2431m (Fig. 1B). Située dans la zone de transition entre les zones climatiques tempérées et méditerranéennes, l'extrémité sud de la RNHPV se caractérise par des températures plus élevées (moyenne annuelle de 10,9 ° C contre 7,2° C dans le nord) et une diminution des précipitations (somme annuelle de 1040 mm contre 1649 mm en nord). Dans sa partie basse, la végétation est constituée d'une mosaïque de forêts de feuillus et de forêt mixte (*Fagus sylvatica* et *Abies alba*); de forêts de conifères (principalement une pinède de Pin à crochets) et de prairies subalpines dans sa partie médiane, et enfin de pelouses écorchées à caractère alpin sur son rebord oriental le plus élevé (Fig. 1C) (voir Villaret *et al.* 2004 pour une cartographie détaillée de la végétation du secteur).

Le changement climatique des soixante dernières années (1958-2009) a été documenté à l'aide des séries chronologiques de la température et des précipitations du modèle météorologique SAFRAN-CROCUS développé par Météo-France. Les détails sur la méthodologie mise en œuvre pour les Alpes françaises sont fournis dans Durand *et al.* (2009). Il est à noter que les fluctuations de la densité du réseau de stations et du protocole de collecte de données peuvent introduire des biais dans les séries de données (voir Vidal *et al.* 2010 pour plus de détails). Nous avons extrait la somme des précipitations des mois de Juin et Juillet (mm) et la température moyenne des mois de Juillet et Août (°C) pour caractériser les grandes tendances bioclimatiques sur la réserve, des études dendroécologiques ayant montré que la croissance des principales essences de la RNHPV était sensible à ces deux variables (Rolland *et al.* 1995).

Les premiers documents historiques décrivant une utilisation des hauts plateaux du Vercors pour le pâturage ovin datent du 14^e siècle. Par contre, l'occupation humaine permanente de la zone comprenant actuellement le RNHPV n'est pas attestée par les textes connus (Billet 2004). La mise en place de la RNHPV a favorisé la conservation de la forêt de pins de montagne et tout spécialement la pinède de Pin à crochets, tout en encourageant la poursuite de la transhumance ovine. Dans un vaste secteur nord de la réserve, le pâturage des moutons a progressivement été abandonné au cours des années 1970 en raison de contraintes topographiques et de difficultés d'accès (Fig. 1B). Une grande partie de cette zone non pâturée a été achetée par l'Etat dans les années 1980 et a ensuite été classée réserve biologique intégrale (RBI) en 2011 (Fig. 1C). Depuis les années 1950, mis à part quelques restes de prélèvements de bois pour l'industrie du papier et la production de charbons de bois, on peut considérer qu'il n'y a pas eu de perturbation anthropique majeure dans ce secteur. Le reste de la zone d'étude est considérée dans cet article comme la zone pâturée

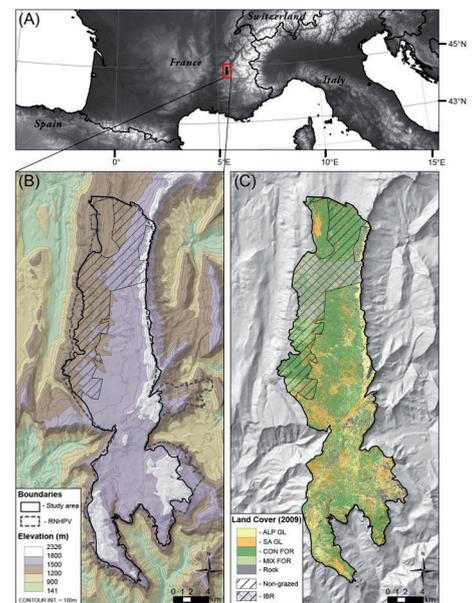


Figure 1. (A) Localisation de la zone d'étude. (B) Topographie de la RNHPV et délimitation de la zone d'étude. (C) Carte simplifiée de la végétation (ALP GL = pelouse alpine, SA GL = prairie subalpine, CON FOR = forêt de conifères, MIX FOR = forêt mixte). Les limites de la partie non pâturée (Non-grazed) et de la Réserve Biologique Intégrale (RBI) sont également indiquées.

(Fig. 1C), bien que très localement les pratiques de gestion puissent varier fortement entre pâturage intensif et quasi-abandon. Par la suite et par commodité, on englobera sous le terme pâturage non seulement les effets directs de la présence des moutons mais également toutes les autres actions entreprises pour entretenir les espaces agro-pastoraux.

Préparation des données

Les photographies aériennes couvrant la zone d'étude ont été obtenues pour quatre années (1948, 1978, 1993 et 2009). Les images de 2009 étaient des orthophotos infrarouge couleur avec une résolution spatiale de 50 cm. Les tirages papier des missions 1948, 1973 et 1993 ont été scannés à 1000 dpi et ortho-rectifiés en utilisant une transformation linéaire directe dans Erdas Imagine [version 9.2 (2011) Huntsville, AL, États-Unis]. Environ 25 points de contrôle au sol ont été utilisés par image afin de limiter l'erreur à moins de 5m. Pour chaque date, une mosaïque a été générée puis importée dans ArcGIS [version 10.1 (2010) Redlands, Californie, États-Unis] et orthorectifiée une seconde fois en utilisant 200 points de contrôle. Cette double opération assure une superposition optimale des images.

Une première classification supervisée a été appliquée à l'image 2009 afin d'obtenir une carte à trois classes (forêt, prairie et rocher). La classe rocher a été considérée comme identique pour les quatre dates. Des classifications supervisées pour les années 1948, 1973 et 1993 ont été réalisées en ajustant les seuils de gris pour une distinction optimale entre forêt et prairies. Toutes les classifications ont été réalisées à l'aide du logiciel eCognition Développeur [version 8.0 (2012) Munich, Allemagne]. Les images finales ont été ré-échantillonnées à une résolution de 5m, et 50 points de contrôle ont été choisis afin d'évaluer la précision de la classification. Ces images sont disponibles sur simple demande aux auteurs.

Les estimations des surfaces de forêts et de prairies ont été calculées à l'aide d'un réseau triangulaire irrégulier de 50m de côté créé à partir d'un modèle numérique de terrain à 25m (Jenness 2004). Pour faire la différence entre la densification de zones déjà boisées et la colonisation pionnière d'espaces prairiaux, nous avons considéré que les pixels avec plus de 40% de surface boisée en 1948 étaient des forêts susceptibles de se densifier (voir Améztegui *et al.* 2010).

Un indice de boisement normalisée (FI pour Forestation Index) a été calculé pour chaque pixel (i) et pour chaque date (j) selon la formule suivante :

$$(I) F_{lij} = (F_{ij} - NF_{ij}) / (F_{ij} + NF_{ij})$$

où F représente la surface de ligneux et NF la surface de prairies. Les valeurs de FI s'échelonnent de -1 (pixel entièrement prairial) à 1 (pixel entièrement boisé). Les pixels boisés ont été définis comme ceux ayant une valeur de FI supérieure à 0.

Modélisation

Nous avons développé un modèle mixte linéaire hiérarchique pour analyser les changements de FI au cours des 60 dernières années et pour comparer les effets de la topographie et du pâturage sur la direction et l'ampleur de ces changements. Les données analysées se présentent comme des données longitudinales avec N pixels pour lesquels nous avons quatre estimations de FI. Nous avons construit

deux modèles distincts: l'un pour les pixels situés dans la zone pâturée et l'autre pour les pixels de la zone non pâturée. Dans un premier temps, les tendances de FI ont été examinées pour chaque pixel. Le modèle de régression de FI sur l'année j pour le pixel i est donné par :

$$(II) F_{lij} = a_{0i} + A_{1i} \text{YEAR}_{ij} + e_{ij}$$

où a_{0i} est l'intercept du pixel i , A_{1i} est la pente du pixel i , et e_{ij} représente le terme d'erreur.

Sur la base de cette première analyse, nous avons supposé que a_{0i} et A_{1i} dépendaient de l'altitude du pixel et nous avons construit un modèle de type :

$$(III) a_{0i} = b_{00} + b_{01} \text{ELEV}_i + u_{0i}; A_{1i} = b_{10} + b_{11} \text{ELEV}_i + u_{1i}$$

En réorganisant (ii) et (iii) on obtient :

$$(IV) F_{lij} = b_{00} + b_{01} \text{ELEV}_i + b_{10} \text{YEAR}_{ij} + b_{11} \text{ELEV}_i \text{YEAR}_{ij} + u_{0i} + e_{ij}$$

où les coefficients b représentent les effets fixes 'année' (YEAR) et 'altitude' (ELEV) et leur interaction, u sont des effets aléatoires et e est une erreur au niveau du pixel. L'équation (IV) se présente sous la forme d'un modèle linéaire mixte (Pinheiro et Bates 2000). La normalité des données a été vérifiée sur les résidus du modèle 1. Parce que les erreurs de mesures successives peuvent être corrélées, nous avons également intégré différentes structures de co-variance dans le modèle (Wang *et al.* 2004). Par contre, nous n'avons pas inclus de terme d'autocorrélation spatiale dans le modèle, mais examiné a posteriori la structure spatiale des résidus en calculant un indice de Moran (Anselin 1995).

Comme base de référence, nous avons modélisé les changements de FI à une résolution de 1 hectare. Pour tester l'effet de l'agrégation spatiale de FI sur les performances du modèle, nous avons répété toutes les analyses statistiques pour des mailles plus fines (25m, 50m) et plus grossières (200m, 400m). La performance des modèles a été évaluée à l'aide de plusieurs métriques : r^2 , écart moyen absolu (MAE) et écart quadratique moyen (RMSE). En outre, nous avons partitionné l'erreur en ses composantes systématiques et non systématiques. Pour les modèles linéaires mixtes, nous avons utilisé la bibliothèque appelée 'nlme', pour 'linear and nonlinear mixed effects models' (Pinheiro *et al.* 2012).

Résultats

Analyse de télédétection

Les cartes générées pour 1948, 1978, 1993 et 2009 montrent une forte expansion des forêts au détriment des espaces agro-pastoraux (Fig. 1 et 2). La surface forestière est passée de 50,6 km² en 1948 à 85,5 km² en 2009, correspondant respectivement à 34% et 57% de la zone d'étude. Sur la même période, la superficie des espaces ouverts a diminué de 87,0 km² à 52,8 km². Sur les quelques 34,2 km² de nouvelles forêts établies, 16% correspond à une densification de forêts préexistantes, et 84% à une colonisation pionnière d'espaces prairiaux (*cf.* partie Méthodes pour cette distinction). La majorité (75%) de l'expansion des forêts se situe en dessous de 1700m. Entre 1948 et 2009, l'altitude médiane des pixels boisés est montée de 1481m à 1570m. Quant à la limite supérieure de pixels boisés, elle a augmenté de 1564m à 1682m (118 m) au cours de la même période.

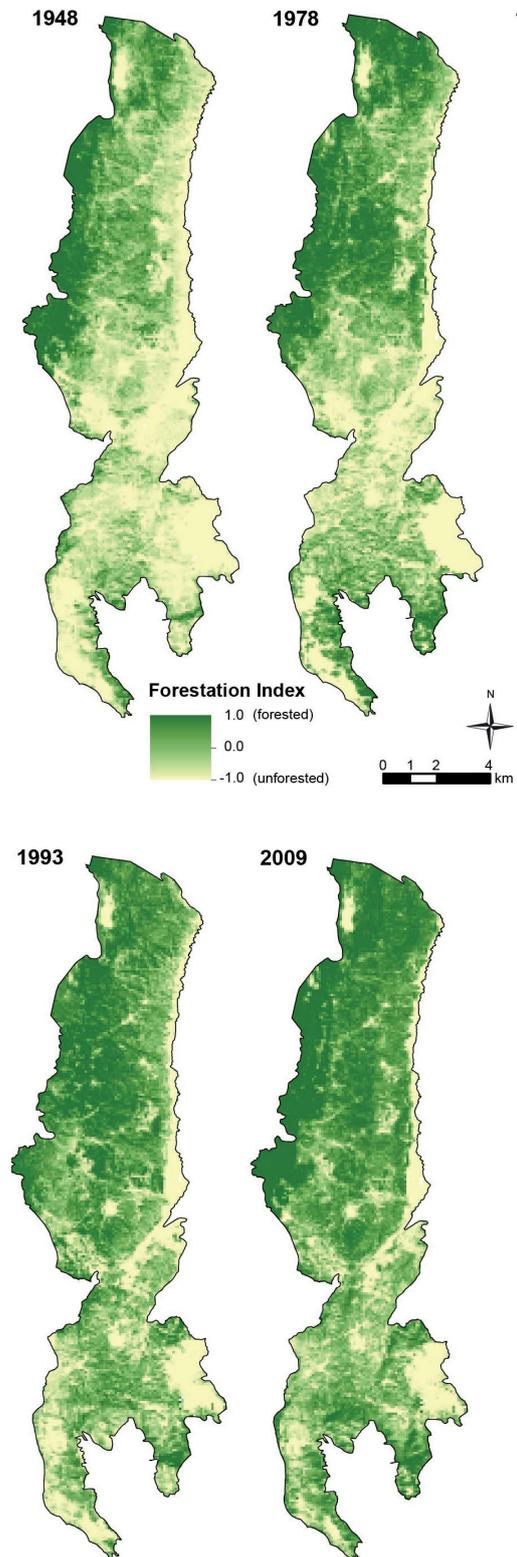


Figure 2. Cartes des indices de boisement (FI) pour les quatre années considérées (1948, 1978, 1993 et 2009).

Dans la zone non pâturée, il existe une très forte relation négative entre la vitesse du reboisement (pente de l'équation ii) et le FI de 1948 (ordonnée à l'origine de l'équation II) (Fig. 3A). En d'autres termes, le taux de boisement initial est un bon prédicteur de la vitesse de fermeture du milieu dans cette zone. Les pixels très boisés en 1948, et montrant peu de changement dans le FI, sont principalement situés entre 1200m et 1500m alors que les très fortes dynamiques de FI s'observent dans la classe moyenne d'altitude (1500m - 1800m). Enfin, au-dessus de 1800 m, les pixels initialement peu boisés présentent une dynamique plus lente (Fig. 3A).

Par comparaison, la relation entre FI initial et changement de FI est peu significative pour la zone pâturée (Fig. 3B). Cela est particulièrement vérifié pour les pixels de moyenne altitude où une grande variabilité de changements de FI est observée pour un même état initial. Cette classe d'altitude étant la plus représentée dans la zone d'étude (Fig. 1B), elle contribue donc à la forte variabilité observée dans le changement de FI à l'échelle de la RNHPV (Fig. 3C). Enfin, la diminution du FI entre 1948 et 2009 dans quelques zones s'explique par des feux survenus au cours des années 1970 et/ou par une exploitation forestière sporadique (dires d'expert; Fig. 3C).

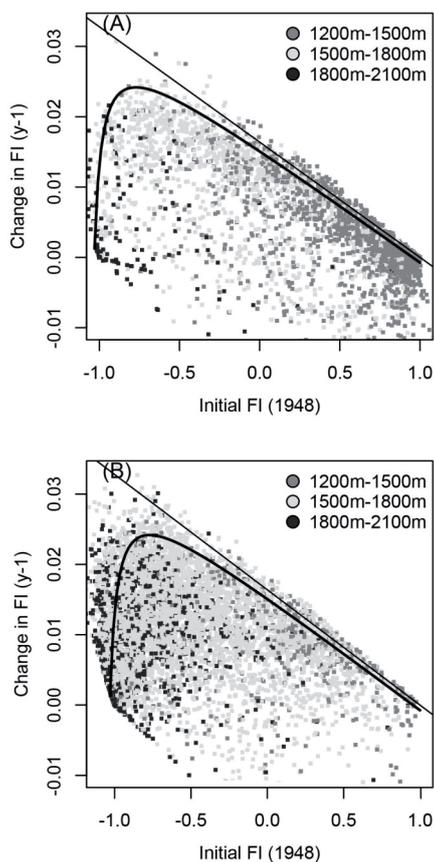


Figure 3. Relations entre le FI initial (1948) et la vitesse de reboisement (pente du FI) pour la zone non pâturée (A) et pâturée (B) à une échelle de 1 hectare. Les classes d'altitude sont indiquées en gris. (C) Carte des changements de FI entre 1948 et 2009. Les valeurs élevées indiquent un taux de boisement élevé.

Sélection de modèles

Le meilleur modèle mixte (performance estimée par l'AIC) comprend un effet d'interaction entre le temps et l'altitude, un effet aléatoire sur la pente et l'intercept, et aucun paramètre supplémentaire pour la structure de co-variance (tableau 1). Le pourcentage d'erreur systématique augmente à des résolutions spatiales plus fines que 1 ha, tandis que le pourcentage d'erreur non systématique augmente à des résolutions plus grossières (résultats non montrés, voir Carlson *et al.* 2014 pour les détails). L'examen des résidus montre une structure spatiale significative pour les quatre dates considérées et pour les zones pâturées et non pâturées. Toutefois, les configurations spatiales ne sont pas uniformes entre dates. Par exemple, un léger changement dans l'étendue de la forêt dans la partie centrale de la réserve de 1948 à 1978 (Fig. 2), suivie par l'expansion rapide de la forêt dans ce secteur entre 1978 et 1993, conduit le modèle à surestimer le FI en 1978 et par la suite à le sous-estimer en 1993. Les deux modèles pour les zones pâturées et non pâturées ont tendance à sous-estimer l'expansion des forêts en limite supérieure altitudinale en 2009.

Relation entre évolution du climat et dynamique de la végétation

Des étés secs sont observés en 1962, 1988, 1995 et 2003 (Fig. 4A) mais aucune tendance de long terme n'est apparente pour la somme des précipitations de Juin-Juillet entre 1958 et 2009. Sur la même période, la hausse d'environ 2° C des températures moyennes de Juillet / Août qui est notée (Fig. 4B) s'inscrit bien dans la tendance à l'échelle des Alpes (Beniston *et al.* 1997). La majeure partie de ce réchauffement semble avoir eu lieu sur une période de quinze ans entre 1980 et 1995, coïncidant avec une période d'expansion plus accélérée de la forêt (Fig. 4).

Prévision de FI en 2030

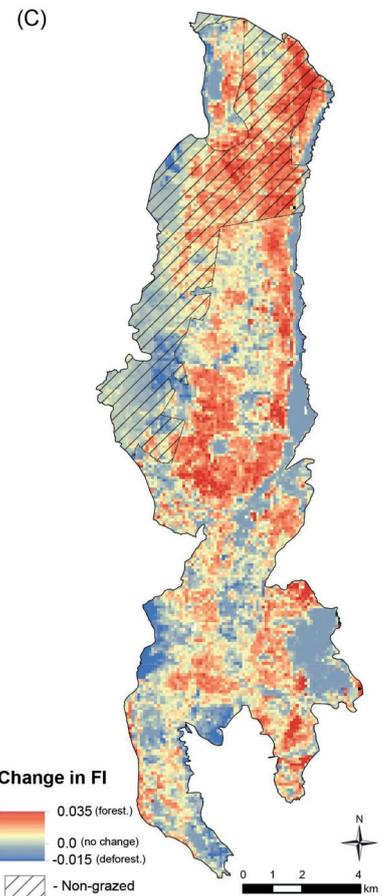
Une projection des valeurs de FI pour l'année 2030 a été réalisée en suivant un scénario tendanciel. Le FI moyen passe de 0,61 en 2009 à 0,65 en 2030. Dans la zone non pâturée, les changements sont faibles

car la couverture de forêt dans ce secteur est déjà maximale en 2009. Dans la zone pâturée, la densification et la colonisation pionnière conduisent à une augmentation moyenne de FI de 0,50 et 0,59. Le contraste entre les pâturages ouverts à proximité des aménagements de l'espace pastoral (cabanes de bergers, points d'eau) et les zones densément boisées est très fortement accru en 2030 (Fig. 5).

DISCUSSION

La forte dynamique d'expansion des forêts de montagne au détriment des espaces agro-pastoraux que nous avons noté sur la RNHPV présente des similitudes avec les résultats d'autres études réalisées dans les montagne européennes (notamment Kullman 2002; Gellrich et Zimmermann 2007; . Améztegui et al. 2010). Les améliorations apportées par notre travail sont de trois ordres : (1) l'application de techniques automatisées de classification d'image pour caractériser l'écotone forêt-prairie à une haute résolution spatiale (5m) et sur de vastes surfaces; (2) la prise en compte d'une série temporelle plus longue permettant la calibration et la validation d'un modèle de dynamique de l'écotone, et enfin (3) la tentative de dissocier les effets des changements d'usage de ceux liés aux changements climatiques sur les dynamiques de végétation par comparaison de zones pâturées et non pâturées.

Notre étude met à jour une concomitance entre hausse des températures estivales et expansion accélérée des forêts durant les années 1980. Des données dendrochronologiques recueillies dans les Alpes françaises ont effectivement montré que la croissance de *Pinus uncinata* répondait significativement aux températures estivales (Rolland et al. 1998). Cela étant, la réponse des forêts de montagne au changement climatique est plus complexe dans la mesure où le bilan hydrique joue également un rôle important sur cette dynamique (Vittoz et al. 2008). Ainsi, dans les Pyrénées et les Alpes suisses, plusieurs études pointent l'impact négatif d'une augmentation de l'évapotranspiration sur la croissance des pins (Rigling et al. 2002; Camarero et Gutiérrez 2007). Dans la RNHPV, les observations in situ indiquent que la vague de chaleur de l'été 2003 a entraîné une mortalité généralisée parmi les jeunes pins à crochets (données non publiées). La multiplication des épisodes de sécheresses estivales extrêmes pourrait aggraver ce phénomène dans un proche avenir.



Figures 3 C

		Grazed Area (N=3102)			Non Grazed Area (N=1499)		
		Value	Lower	Upper	Value	Lower	Upper
Fixed Effects	Intercept	2,42	2,23	2,6	5,92	5,64	6,2
	time	2.3 10 ²	1.96 10 ²	2.63 10 ²	4.37 10 ²	4.88 10 ²	3.87 10 ²
	elevation	-1.76 10 ³	-1.87 10 ³	-1.66 10 ³	-3.73 10 ³	-3.92 10 ³	-3.55 10 ³
	time x elevation	-7.8 10 ⁶	-9.74 10 ⁶	-5.77 10 ⁶	«3.28 10 ⁵	2.94 10 ⁵	3.61 10 ⁵
Random Effects	sd(Slope)	0,35	0,334	0,361	0,37	0.352-3	0,388
	sd(Intercept)	5.16 10 ⁻³	4.96 10 ⁻³	5.57 10 ⁻³	5.6 10 ⁻³	5.21 10 ⁻³	6.01 10 ⁻³

Tableau 1. Coefficients et intervalles de confiance des effets fixes et aléatoires du modèle linéaire mixte ajusté pour la zone pâturée (Grazed Area) et non pâturée (Non Grazed Area). N est le nombre de pixels de 1ha utilisés pour calibrer le modèle.

L'originalité de notre étude est de comparer l'évolution de la dynamique de l'écotone entre des zones pâturées et non pâturées. Dans la zone non pâturée, nous interprétons l'expansion forestière comme un phénomène de dynamique post-perturbation. Ici, l'exploitation de la forêt pour la production de charbon de bois, puis pour l'industrie du papier a persisté jusque dans les années 1950; la période suivie dans cette étude correspondant donc peu ou prou à une période de remise à l'équilibre d'un système perturbé (Fig. 2). Dans ce contexte, le réchauffement climatique au cours des années 1980 a pu accélérer un phénomène de reboisement qui reste principalement gouverné par l'histoire des régimes de perturbation passés et par la résilience de l'écosystème forestier (Fig. 4C).

Dans la zone pâturée, les taux très variables de changement de la végétation entre 1948 et 2009 peuvent s'expliquer par l'influence locale des activités de pâturage. Le fait qu'une partie importante de pixels pâturés entre 1500m et 1800m reste non boisée indique que le pâturage et l'aménagement de l'espace agro-pastoral contrecarrent les dynamiques naturelles et leur amplification possible par le climat (Cairns et Moen 2004). La concentration des troupeaux autour des aménagements pastoraux crée localement des zones ne montrant aucune dynamique sur 60 ans. En revanche, l'abandon progressif de l'entretien des pâturages à distance des aménagements (action sur les arbustes notamment) contribue à la densification et l'expansion du pin. Ces deux facteurs combinés créent au final de forts contrastes paysagers et une relative simplification de la structure spatiale de l'écotone. Notre projection pour 2030 donne ainsi à voir une image exacerbée de ces contrastes (fig. 5) avec des îlots de prairies au sein d'une matrice forestière. Il convient aussi de souligner que tous ces changements paysagers s'observent alors que le nombre total de moutons dans la RNHPV est resté relativement constant au cours de la période d'étude (environ 1.1 brebis / ha; Billet 2004).

L'expansion des forêts et la simplification de l'écotone forêt-prairie ont pour conséquence une érosion de la diversité biologique inféodée aux milieux ouverts et une perte de diversité d'habitats (Barbaro *et al.* 2001; Tasser et Tappeiner 2002). Des espèces animales emblématiques comme le Tétraz-lyre (*Tetrao tetrix*) et le grand Tétraz (*Tetrao urogallus*) nécessitent une mosaïque d'habitats ouverts et semi-boisés et sont donc vulnérables à ces changements (Imbert et Rousset, 1997; Schweiger *et al.* 2011). Ces dynamiques de paysage observées dans le Vercors s'inscrivent dans un contexte plus global : dans toute l'Europe, les pelouses calcaires de montagne sont en régression depuis au moins trois décennies, et constituent un enjeu de conservation de la directive Habitats de l'Union européenne (Toland *et al.* 2008; MacDonald *et al.* 2000). Dans le cas de RNHPV, la gestion conservatoire des espaces prairiaux doit être conciliée avec l'un des principaux objectifs à la création de la réserve qui était de protéger ce qui est connu pour être la plus grande pinède de Pin à crochets de France (Rolland 2001). Notre étude montre que la dynamique d'expansion du Pin était engagée avant la création de la RNHPV. Mais l'ampleur du phénomène a amené les gestionnaires à reconsidérer les objectifs initiaux de la RNHPV. Ainsi, l'entretien des pâturages par arrachage d'arbustes facilitant la progression des ligneux a-t-elle été récemment autorisée. Ces mesures sont accompagnées d'un programme de suivi scientifique pour évaluer leur impact sur la dynamique de la végétation

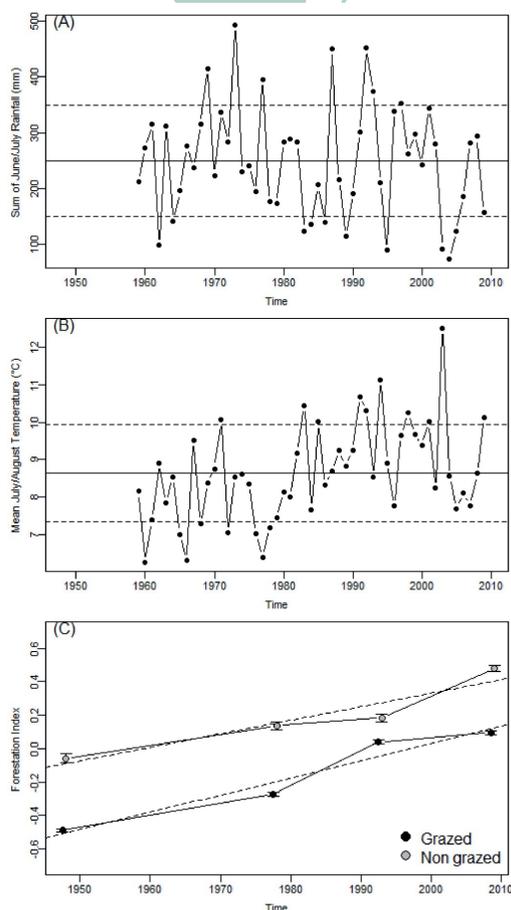


Figure 4. Evolution des sommes de précipitations de Juin-Juillet (A) et des températures moyennes de Juillet-Août (B) entre 1958 et 2009. (C) Valeurs moyennes de FI pour les quatre dates et pour les zones non pâturées (non grazed) et pâturées (grazed).

ligneuse. Autoriser le défrichement des arbustes dans les montagnes méditerranéennes espagnoles entre 1986 et 2005 a conduit à une augmentation de pâturages disponibles pour les ovins et a également servi à réduire la gravité des incendies d'origine naturelle (Lasanta et al. 2009). D'autres études ont montré tout l'intérêt d'une gestion contrôlée des feux pour maintenir l'hétérogénéité des paysages et la conservation des espaces ouverts (Fuhlendorf et Engel 2004) et pourraient inciter à la mise en place (ou au retour) d'un système contrôlé de brûlage (ou de gyrobroyage) des zones densément arbustives. Dans la mesure où le seul pâturage ovin est souvent insuffisant pour rétablir et maintenir les zones d'habitat de prairie (Bartolomé et al. 2000), la mise en œuvre d'un régime de perturbations spatialement hétérogène est désormais nécessaire si l'on souhaite préserver et/ou restaurer les habitats ouverts au-delà du voisinage immédiat des aménagements pastoraux.

Plusieurs autres facteurs concourent aux changements paysagers observés dans la RNHPV : (1) les sécheresses plus fréquentes dans le sud de la France peuvent réduire la productivité des pâturages méditerranéens et inciter les propriétaires de troupeaux transhumants à allonger les périodes d'estive augmentant ainsi le risque de surpâturage dans certaines zones; (2) la présence du loup dans le Vercors incite les bergers à privilégier les espaces ouverts de garde plus aisée, conduisant à une sous-exploitation des ressources fourragères de sous-bois ou de prébois (Espuno et al. 2004), (3) la demande croissante et légitime des bergers pour davantage de confort conduit à augmenter la proportion de temps passée au voisinage des aménagements pastoraux et enfin (4) l'évolution des races de mouton vers des animaux plus massifs mais également plus consommateurs en eau génèrent des demandes de nouvelles installations de points d'eau qui sont difficiles à satisfaire dans une région karstique. Tous ces facteurs ont tendance à concentrer l'activité pastorale sur des surfaces plus réduites avec les conséquences attendues sur l'eutrophisation des prairies et la banalisation des cortèges floristiques et faunistiques. Dans un tel contexte, la RNHPV doit favoriser toute mesure permettant de mieux répartir la charge pastorale sur l'ensemble des surfaces d'alpages, ce qui passe par un aménagement intégré et concerté de l'espace agro-pastoral (emplacement des points d'eau, définition de zones de ré-ouverture du milieu, calendrier de pâturage) et par un programme de suivi des activités pastorales et de leur impact sur les milieux.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre de CAMELEON un projet européen financé par réseau ERA-NET Circle-2 (Climate Impact Research and Response Coordination for a Larger Europe). Les auteurs remercient Yves Durand (Météo France), Yann Buthion (Parc Naturel Régional du Vercors), Guy Lempérière, Manar Hatem, Abderrahim Bouasria et Benoit Perrimond pour les échanges et discussions sur ce travail. La RNHPV est un site de la Zone Atelier Alpes (<http://www.za-alpes.org/>), qui est membre du réseau ILTER-Europe.

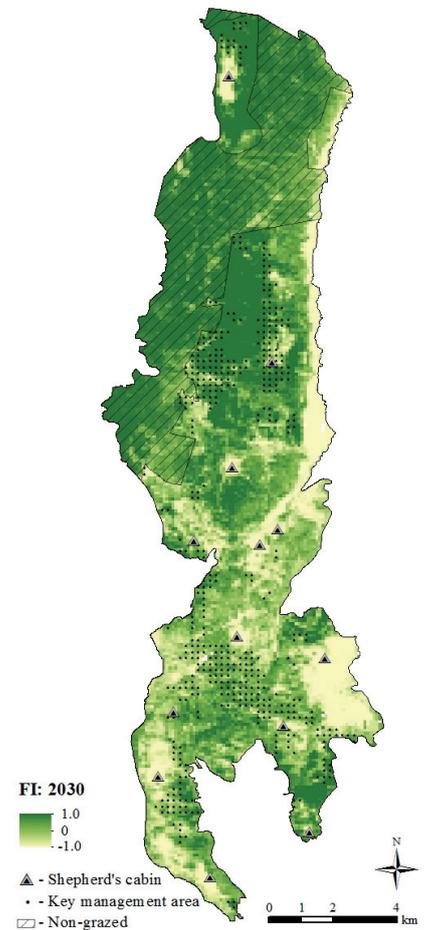


Figure 5. Simulation du FI en 2030 selon un scénario tendanciel basé sur le modèle linéaire mixte. L'emplacement des cabanes de bergers (sheperd's cabins) est indiqué. Les points indiquent des zones susceptibles de se reboiser dans les prochaines décennies et sur lesquelles des mesures de gestion conservatoire des milieux ouverts pourraient être prises en priorité.

Bibliographie

- AMÉZTEGUI, A., BROTONS, L. and COLL, L. 2010. Land use changes as major drivers of mountain pine (*Pinus uncinata*) expansion in the Pyrenees. *Global Ecology and Biogeography* 19: 632-641.
- ANSELIN, L. 1995. Local Indicators of Spatial Association – LISA. *Geographical Analysis* 27: 93-115.
- BARBARO, L., DUTOIT, T. and COZIC, P. 2001. A six-year experimental restoration of biodiversity by shrub-clearing and grazing in calcareous grasslands of the French Prealps. *Biodiversity and Conservation* 10: 119-135.
- BARTOLOMÉ, J., FRANCH, J., PLAIXATS, J. and SELIGMAN, N.G. 2000. Grazing alone is not enough to maintain landscape diversity in the Montseny Biosphere Reserve. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 77: 267-273.
- BATLLORI, E., CAMARERO, J.J., NINOT, J.M. and GUTIÉRREZ, E. 2009. Seedling recruitment, survival and facilitation in alpine *Pinus uncinata* tree line ecotones. Implications and potential responses to global warming. *Global Ecology and Biogeography* 18: 460-472.
- BILLET, S. 2004. Histoire, Pastoralisme Evolution du milieu naturel sur les Hauts Plateaux du Vercors. Report – U.R. Agricultures et Milieux Montagnards, Groupement de Grenoble (CEMAGREF), France.
- BENISTON, M., DIAZ, H.F. and BRADLEY, R.S. 1997. Climatic change at high elevation sites: An overview. *Climate Change* 36: 233-251.
- CAIRNS, D.M. and MOEN, J. 2004: Herbivory influences tree lines. *Journal of Ecology* 92: 1019-1024.
- CAMARERO, J.J. and GUTIÉRREZ, E. 2007. Response of *Pinus uncinata* Recruitment to Climate Warming and Changes in Grazing Pressure in an Isolated Population of the Iberian System (NE Spain). *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 39: 210-217.
- CARLSON, B. Z., J. RENAUD, P.-E. BIRON, and P. CHOLER. in press. Long-Term Modeling of the Forest-Grassland Ecotone in the French Alps: Implications for Pasture Management and Conservation. *Ecological Application*. doi: <http://dx.doi.org/10.1890/13-0910.1>
- CASTRO, J., ZAMORA, R., HÓDAR, J.A., GÓMEZ, J.M. and GÓMEZ-APARICIO 2004. Benefits of Using Shrubs as Nurse Plants for Reforestation in Mediterranean Mountains: A 4-year Study. *Restoration Ecology* 12: 352-358.
- DALEN, A. and HOFGAARD 2005. Differential regional tree line dynamics in the Scandes Mountains. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 37: 284-296.
- DULLINGER, S., DIRNBÖCK, T., GREIMIER, J. and GRABHERR, G. 2003a. A resampling approach for Evaluating the effects of pasture abandonment on subalpine plant diversity. *Journal of Vegetation Science* 14: 243-252.
- DULLINGER, S., DIRNBÖCK, T. and GRABHERR, G. 2003b. Patterns of shrub invasion into high Mountain grasslands of the Northern Calcareous Alps (Austria). *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 35: 434-441.
- DURAND, Y., LATERNER, M., GIRAUD, G., ETCHEVERS, P., LESAFFRE, B. and MERINDOL, L 2009. Reanalysis of 44 Yr of Climate in the French Alps (1958-2002): Methodology, Model Validation, Climatology, and Trends for Air Temperature and Precipitation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48: 429-449.

- ESPUNO, N., LEQUETTE, B., POULLE, M.L., MIGOT, P. and LEBRETON, J.D. 2004. Heterogenous response to preventive husbandry during wolf recolonization of the French Alps. *Wildlife Society Bulletin* 32: 1195-1208.
- FUHLENDORF, S.D. and ENGEL, D.M. 2004. Application of the fire-grazing interaction to restore a shifting mosaic of tallgrass prairie. *Journal of Applied Ecology* 41: 604-614.
- GEHRIG-FASEL, J., GUISAN, A. and ZIMMERMANN, N.E. 2007. Tree line shifts in the Swiss Alps: climate change or land abandonment? *Journal of Vegetation Science* 18: 572-582.
- GELLRICH, M. and ZIMMERMANN, N.E. 2007. Investigating the regional-scale pattern of agricultural land abandonment in the Swiss mountains: a spatial statistical modelling approach. *Landscape and Urban Planning* 79: 65-76.
- HARSCH, M.A., HULME, P.E., MCGLONE, M.S. and DUNCAN, R.P. 2009. Are tree line trees advancing? A global meta-analysis of tree line response to global warming. *Ecology Letters* 12, 1040-1049.
- IMBERT, M. and ROUSSET, E. 1997. Gestion des habitats naturels en faveur du tetrax lyre dans le département de la Drôme: démarche expérimentale. *Biodiversité*: 51-53.
- JENNESS, J.S. 2004. Calculating landscape surface area from digital elevation models. *Wildlife Society Bulletin* 32: 829-839.
- KAPLAN, J.O, KRUMHARDT, K.M. and ZIMMERMANN, N. 2009. The prehistoric and preindustrial deforestation of Europe. *Quaternary Science Reviews* 28: 3016-3034.
- KÖRNER, C. and PAULSEN, J. 2004. A world-wide study of high altitude tree line temperatures. *Journal of Biogeography* 31: 713-732.
- KÖRNER, C. 2007. Climate tree line patterns, causes. *Erdkunde* 61: 316-324.
- KULLMAN, L. 2002. Rapid recent range-margin rise of tree and shrub species in the Swedish Scandes. *Journal of Ecology* 90: 68-76.
- LASANTA, T., ARNÁEZ, J., ERREA, M.P., ORTIGOSA, L. and RUIZ-FLANO, P. 2009. Mountain pastures, environmental degradation, and landscape remediation: The example of a Mediterranean policy initiative. *Applied Geography* 29: 308-319.
- MACDONALD, D., CRABTREE, J.R., WIESINGER, G., DAX, T., STAMOU, N., FLEURY, P., GUTIERREZ LAZPITA, J. and GIBON, A. 2000. Agricultural abandonment in mountain areas of Europe: Environmental consequences and policy response. *Journal of Environmental Management* 59: 47-69.
- PINHEIRO, J.C. and BATES, D.M. 2000. *Mixed Effects Models in S and S-PLUS*. Springer-Verlag Inc, New York.
- PINHEIRO, J., BATES, D., DEBROY, S., SARKAR, D. and the R Development Core Team 2012. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-103.
- RIGLING, A., BRÄKER, O., SCHNEITER, G. and SCHWEINGRUBER, F. 2002. Intra-annual tree-ring parameters indicating differences in drought stress of *Pinus sylvestris* forests within the Erico-Pinion in the Valais (Switzerland). *Plant Ecology* 163: 105-121.
- ROLLAND, C., FLORENCE-SCHUELLER, J. and COOPER, J. 1995. A comparison of the growth of mountain pine and spruce (*Pinus uncinata* Ram. and *Picea abies* Karst.) on a karstified calcareous flag in a temperate, mid-altitude mountain area (Vercors, France). *Revue de Géographie Alpine* 83: 17-32.

- ROLLAND, C., PETITCOLAS, V. and MICHALET, R. 1998. Changes in radial tree growth for *Picea abies*, *Larix deciduas*, *Pinus cembra* and *Pinus uncinata* near the alpine timberline since 1750. *Trees* 13: 40-53.
- ROLLAND, C. 2001. Influence du pâturage sur la germination et la survie des semis à pin à crochets dans la Réserve Naturelle des Hauts Plateaux du Vercors. Centre d'Ecologie Alpine, Grenoble, France.
- SANKEY, T.T., MONTAGNE, C., GRAUMLICH, L., LAWRENCE, R. and NIELSEN, J. 2006. Twentieth century forest-grassland ecotone shift in Montana under differing livestock pressure. *Forest Ecology and Management* 234: 282-292.
- SCHWEIGER, A.K., NOPP-MAYR, U. and ZOHMANN M. 2011. Small-scale habitat use of black grouse (*Tetrao tetrix* L.) and rock ptarmigan (*Lagopus muta helvetica* Thienemann) in the Austrian Alps. *European Journal of Wildlife Research* 58: 35-45.
- TASSER, E. and TAPPENEIR, U. 2002. Impact of land use change on mountain vegetation. *Applied Vegetation Science* 5: 173-184.
- TASSER, E., WALDE, J., TAPPEINER, U., TEUTSCH, A. and NOGGLER, W. 2007. Land use changes and natural reforestation in the Eastern Central Alps. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118: 115-129.
- THEURILLAT, J.P. and GUISAN, A. 2001. Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: a review. *Climatic Change* 50: 77-109.
- TOLAND, J., JONES, W., ELDRIDGE, J., THORPE, E., et O'HARA, E. 2008. LIFE and Europe's grasslands: restoring a forgotten habitat. Office for Official Publications of the European Communities.
- VICENTE SERRANO, S.M., LASANTA, T. AND ROMO, A. 2004. Analysis of the spatial and temporal evolution of vegetation cover in the Spanish central Pyrenees: the role of human management. *Environmental Management* 34: 802-818.
- VIDAL, J.P., MARTIN, E., FRANCHISTÉGUY, L., BAILLON, M. AND SOUBEYROUX, J.M. 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology* 30: 1627-1644.
- VILLARET, J.C. AND GENIS, J.M. 2004. Site Natura 2000 – I27. Landes, pelouses, forêts et habitats rocheux des Hauts Plateaux du Vercors. Cartographie de la végétation et des habitats et Atlas cartographique. Conservatoire botanique national alpin 2: 1-34.
- VITTOZ, P., RULENCE, B., LARGEY, T. AND FRELÉCHOUX, F. 2008. Effects of Climate and Land use Change on the Establishment and Growth of Cembran Pine (*Pinus cembra* L.) over the Altitudinal Tree line Tree line Ecotone in the Central Swiss Alps. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 40: 225-232.
- WANG, Z. AND L. A. GOONEWARDENE 2004. The Use of Mixed Models in the Analysis of Animal Experiments with Repeated Measures Data. *Canadian Journal of Animal Science* 84: 1-11.
- WEARNE, L.J. and MORGAN, J.W. 2001. Recent Forest Encroachment into Subalpine Grasslands near Mount Hotham, Victoria, Australia. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 33: 369-377.
- ZALD, H.S. 2009. Extent and spatial patterns of grass bald land cover change (1948-2000), Oregon Coast Range, USA. *Plant Ecology* 201: 517-529.



Evolution de la végétation du marais de Lavours (Ain, France) à quarante-cinq ans d'intervalle (1967-2012)

Evolution of the Lavours marsh vegetation with a forty five years interval (1967-2012)

Alexis Mikolajczak
Conservatoire Botanique National Alpin
Domaine de Charance
05000 GAP
a.mikolajczak.cbna@gmail.com

Fabrice Darinot
Réserve naturelle nationale du Marais de Lavours
Chemin des prés de la tour
73310 Chindrieux
contact@reserve-lavours.com

Résumé

Les cartes de végétation du marais de Lavours établies à 45 ans d'intervalle sont comparées. L'évolution du paysage végétal et de l'utilisation du sol comprend : (I) la mise en culture de grandes surfaces de prairies hygrophiles, (II) le retour spontané ou choisi de la forêt et (III) le développement d'une végétation ouverte eutrophe, dû à l'abaissement de la nappe phréatique et à l'eutrophisation des habitats sur limons. Dans ce contexte, la Réserve naturelle nationale du Marais de Lavours joue un rôle majeur pour la préservation des milieux ouverts sur tourbe qui ont disparu du reste du marais. La situation des milieux ouverts sur limons est plus mitigée car la moitié des surfaces restantes est située en dehors de la réserve, en îlots relictuels non gérés.

Mots clés : végétation, marais de Lavours, eutrophisation, forêt, agriculture

Abstract

Vegetation maps of the Lavours marsh realized 45 years apart are compared. The main changes in vegetal landscape and land use include: (I) transformation into crop fields of large surfaces of wet meadows, (II) the spontaneous or chosen development of forest and (III) the development of an open eutrophic vegetation, due to the water

table lowering and the subsequent nutrient enrichment of habitats on silt substrat. In this context, the Réserve naturelle nationale du Marais de Lavours plays a major role for open habitats conservation on peat soil, which have almost disappeared in the rest of the marsh. The situation of open habitats on silt substrat is more moderate because half of them are outside of the nature reserve, dispatched in small unmanaged islands.

Keywords : *vegetation, marais de Lavours, nutrient enrichment, forest, agriculture*

Introduction

Près de 67 % des zones humides métropolitaines ont été détruites depuis le début du XX^e siècle, dont la moitié sur la période 1960 à 1990. Depuis le début des années 1990, malgré un ralentissement de leur régression lié à une prise de conscience collective de leur intérêt socio-économique, les zones humides restent parmi les milieux naturels les plus dégradés et les plus menacés, en termes de surface et d'état de conservation (Genty, 2007 et 2012). Les données récentes montrent une situation particulièrement préoccupante pour les prairies humides, les tourbières, les landes humides et les annexes alluviales (MEEDDM, 2010). Les activités humaines en sont la cause principale : assèchement, perturbations du fonctionnement hydraulique, fragmentation du paysage, eutrophisation et comblement, pollutions, fermeture et banalisation des milieux, etc. Une enquête nationale à dire d'experts sur les zones humides, réalisée en 2011 dans le cadre du Plan national d'action en faveur des zones humides, révèle que 130 sites (85 %) rendent un service majeur à l'homme : d'abord pour les loisirs et le tourisme, puis pour leur rôle de réservoir de biodiversité. Les milieux cumulant le plus de services sont les prairies humides.

L'histoire du marais de Lavours depuis les années 1960 illustre parfaitement l'évolution des zones humides décrite par le MEEDDM au niveau national. A cette époque, d'immenses surfaces de prairies naturelles ont commencé à se transformer en champs de céréales, grâce au soutien de la première politique agricole commune qui subventionnait le drainage des sols. En 1966-67, l'Université de Grenoble dresse la carte de la végétation du marais de Lavours : s'appuyant sur ce travail, des universitaires et des protecteurs de la nature prennent conscience de la valeur écologique du marais et des menaces qui pèsent sur son écosystème. A la suite d'un long processus de négociations, en 1984, l'Etat classe 474 ha du marais de Lavours en réserve naturelle afin de préserver une partie de son patrimoine écologique exceptionnel.

En comparant l'évolution du paysage végétal à quarante cinq années d'intervalle, entre 1967 et 2012, cette présente étude révèle les grandes mutations qui ont affecté le marais de Lavours sur cette période. Elle permet de dresser un bilan de l'état de conservation du marais et met en évidence le rôle essentiel de la réserve naturelle pour la préservation de cette zone humide.

Matériel et méthodes

Le marais de Lavours est le marais le plus représentatif du rebord occidental des Alpes, avec une superficie de près de 2 000 ha. Il recèle

en son centre l'une des plus vastes tourbières française, qui s'étend sur 500 ha, bordée de terrains limono-argileux. Situé à 230 m d'altitude, le marais de Lavours bénéficie des inondations du Rhône et surtout du Séran, deux cours d'eau qui le délimitent naturellement à l'Est et à l'Ouest. Il est surplombé au Nord par l'anticlinal du Colombier qui le domine de ses 1 450 mètres. La végétation du marais s'organise en fonction des types de sol (limoneux et argileux au bord du Séran, tourbeux au centre du marais) et selon la profondeur de la nappe phréatique.

L'étude porte sur la comparaison de la carte de la végétation du marais de Lavours, dressée en 2011-2012 par le Conservatoire Botanique National Alpin (Mikolajczak, 2012), avec la carte écologique du marais de Lavours (voir carte en Annexe 2), dressée par le Laboratoire de botanique et de biologie végétale de l'Université de Grenoble en 1966-1967 (Aïn et Pautou, 1969) :

– la carte écologique du marais de Lavours publiée en 1969 portait sur l'étude des groupements végétaux du marais et leur répartition dans l'objectif de mieux comprendre la répartition des gîtes larvaires des espèces culicidiennes. Les groupements végétaux définis sont généralement rattachés à des syntaxons de la phytosociologie existant déjà, mais certains sont nouvellement décrits dans une typologie propre à la carte de la végétation des Alpes (Ozenda *et al.*, 1964). La carte est levée au 1/5 000^e pour une restitution cartographique au 1/15 000^e. Elle a été numérisée par le CBNA en 2012 pour permettre la comparaison surfacique des végétations.

– la carte de la végétation de 2012 visait à actualiser la carte de 1969 par (I) la redéfinition des types de végétations observés en 1969, (II) l'inventaire exhaustif des types de végétations non traités, (III) leur délimitation cartographique au 1/5 000^e dans le périmètre de la réserve naturelle (474 ha) ainsi que dans le reste du marais de Lavours (1 500 ha) au 1/10 000^e.

Les types de végétation sont rattachés aux syntaxons de la phytosociologie identifiés dans le synopsis phytosociologique des végétations du territoire d'agrément du CBNA (Mikolajczak, 2011) au niveau association le plus souvent. Ces syntaxons sont à leur tour mis en relation avec les typologies d'habitats Natura 2000 et Corine Biotopes. Les données cartographiques de terrain sont saisies sous un système d'information géographique (SIG).

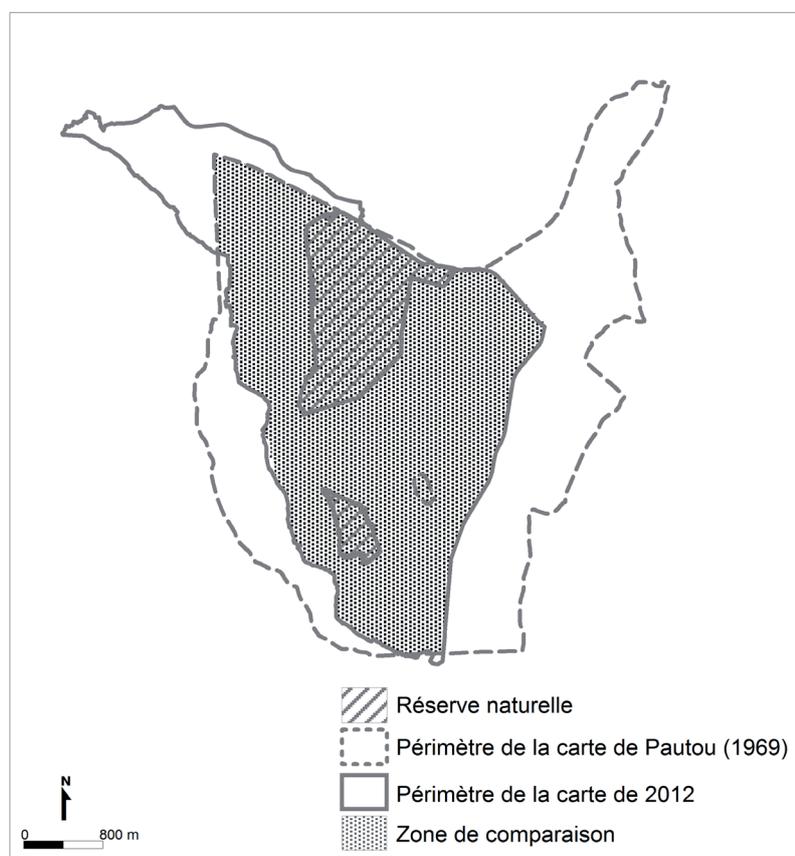
Résultats

En 2012, la cartographie du marais de Lavours recense 32 habitats naturels (sans compter les habitats cultivés et les plantations de peupliers), alors que la carte de la végétation de 1969 n'identifiait que 15 groupements végétaux (Tableau 1 en annexe). Cela s'explique par une typologie plus affinée aujourd'hui, en particulier pour la végétation aquatique, les roselières et la végétation des sols exondés. En revanche, un habitat n'a pas été retrouvé en 2012 : la magnocariçaie à *Carex appropinquata*. Ces 32 habitats naturels sont présents dans la réserve naturelle, alors que seulement 10 sont observés dans le reste du marais de Lavours.

Pour faciliter l'interprétation, les unités typologiques des deux cartes sont converties dans une typologie simplifiée des grands types de végétation qui comprend sept éléments :

- milieux ouverts sur tourbe : bas-marais à *Schoenus nigricans*, prairie à *Molinia caerulea*, cariçaie à *Carex elata*, cladiaie ;
- milieux ouverts sur limons : cariçaies à *Carex acuta*, *C. acutiformis* et *C. riparia* et prairies humides à graminées ;
- milieux arbustifs humides ;
- boisements humides naturels : chênaie-frênaie, aulnaies et aulnaies-frênaies ;
- milieux ouverts eutrophes : prairies à *Solidago gigantea*, roselière eutrophe ;
- cultures ;
- plantations de peupliers.

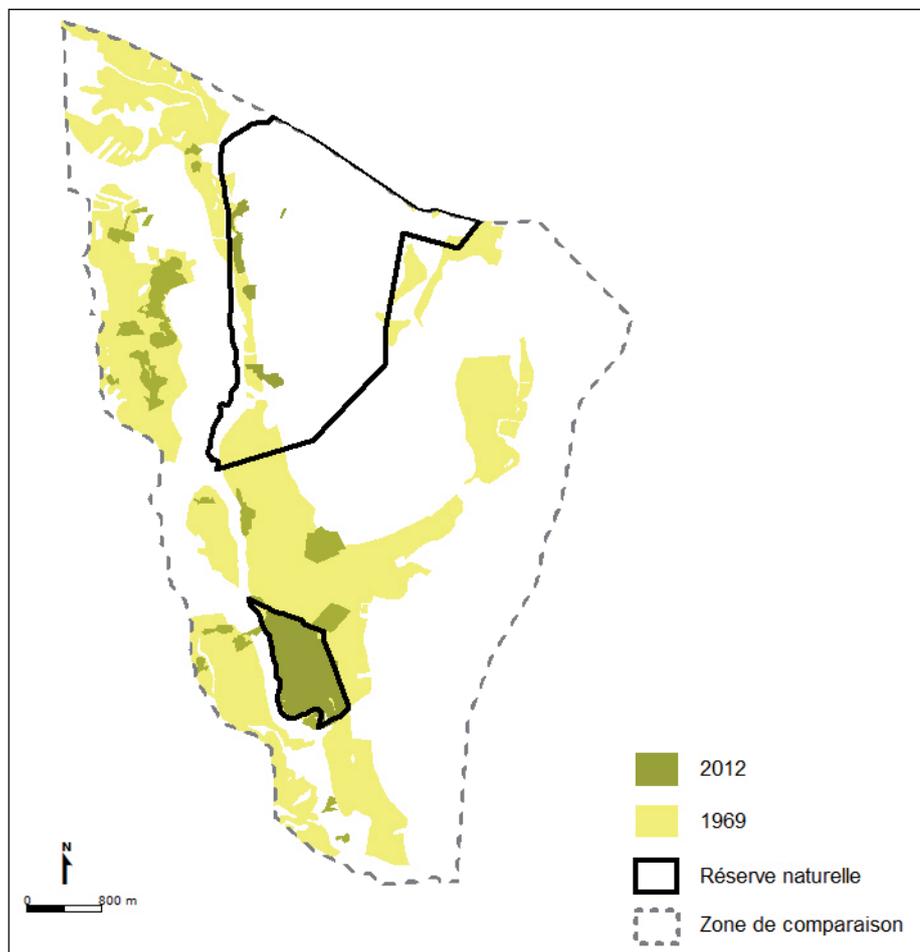
Une zone de comparaison est définie comme étant la zone de superposition des deux cartes (Carte 1). La comparaison en elle-même est réalisée à partir d'une intersection géographique entre les deux couches cartographiques sous SIG. Les résultats bruts de cette intersection sont traités pour construire des matrices de changements de grands types de végétation entre les deux cartes. L'analyse est menée à trois niveaux : (I) sur l'ensemble de la zone de comparaison, (II) sur la réserve naturelle uniquement et (III) en dehors de la réserve naturelle. Deux matrices de changements de végétation sont données en annexe, l'une pour la réserve (Tableau 2 en annexe) et l'autre pour l'enveloppe périphérique (Tableau 3 en annexe).



Carte 1 : Zone de comparaison entre la carte de 1969 et celle de 2012



Carte 2 : Evolution des milieux ouverts sur tourbe



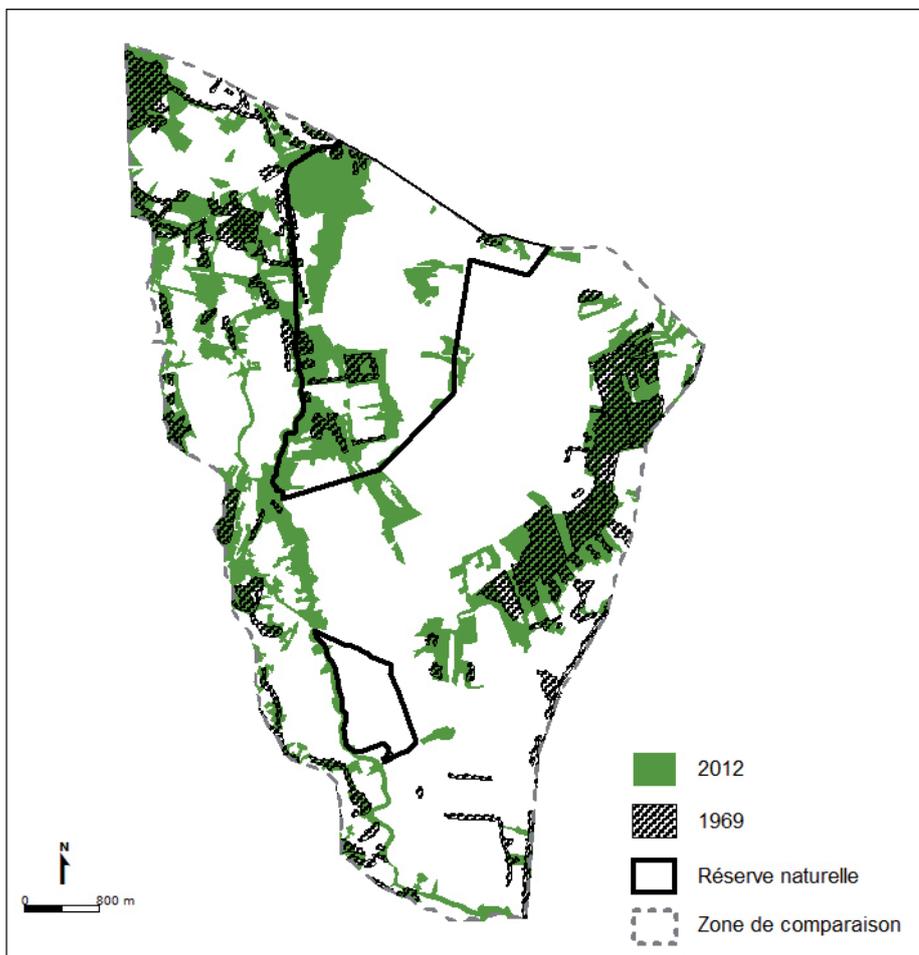
Carte 3 : Evolution des milieux ouverts sur limon

La situation des milieux ouverts sur limons est différente. Ces milieux sont surtout répartis en dehors de la réserve naturelle, sauf dans la réserve sud où ils occupaient tout l'espace en 1967. Globalement, 70 % de leur surface a disparu en cinquante ans. Dans la réserve naturelle, environ 60 % de leur superficie initiale a pu être maintenue grâce à la gestion, avec un contraste très fort entre la réserve nord et la réserve sud où près de 25 % et 75 % sont respectivement conservés. En réserve nord, ils ont évolués principalement vers des boisements naturels humides (chênaie pédonculée, aulnaie-frênaie) tandis qu'en réserve sud, cette évolution s'est opérée au profit de milieux ouverts eutrophes (roselière atterrie eutrophe et peuplements de solidage). En dehors de la réserve, moins de 10 % de ces milieux subsistent à l'heure actuelle. Près de 150 ha ont été transformés en cultures, 65 ha en plantation de peupliers, 90 ha ont évolué spontanément en boisements et en roselière et 190 ha ont évolué vers des milieux ouverts eutrophes.

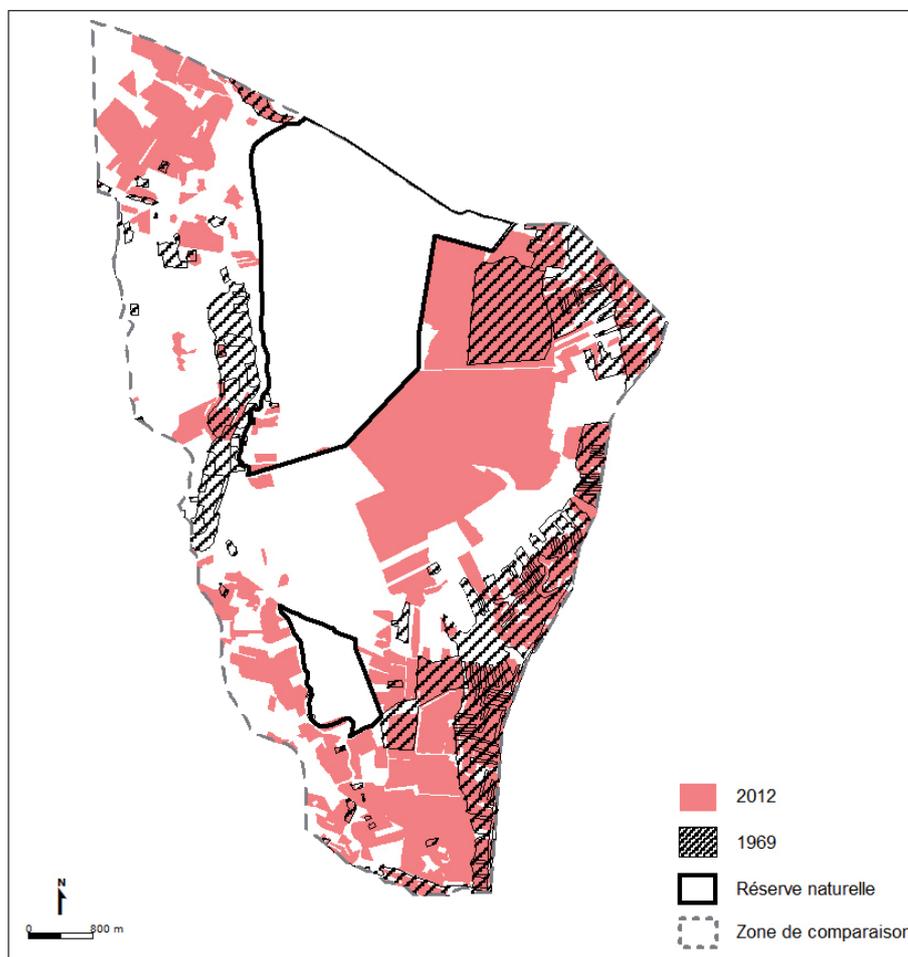
Les boisements humides naturels ont progressé de 325 ha, soit une augmentation de 140 % (Carte 4). L'aulnaie s'est particulièrement développée, au détriment des anciennes prairies qui n'étaient plus fauchées ou pâturées. Ce phénomène est surtout sensible autour de la réserve naturelle (prairies mésophiles et mésohygrophiles sur limons), bien qu'il ait touché près de 100 ha de prairies à l'intérieur de son périmètre (surtout milieux ouverts sur tourbe). Les plantations de peuplier ont augmenté de 102 ha (+ 150 %) surtout au Sud-Ouest du marais (communes de Flaxieu, Polliou et Cressin-Rochefort) où les sols limoneux s'y prêtent bien et, dans une moindre mesure, au Nord-Ouest du marais (communes de Talissieu et Béon), en conditions édaphiques moins favorables.

Le développement des milieux ouverts eutrophes (prairie à solidage et roselière eutrophe) est tout à fait saisissant. Alors que ce type de milieu n'existait quasiment pas en 1967, il concerne aujourd'hui 238 ha de marais. Ces milieux se répartissent uniquement en terrain limoneux et occupent d'anciennes prairies pâturées et fauchées. Le cortège floristique comprend des espèces comme l'Ortie (*Urtica dioica*), le Liseron (*Calystgia sepium*), le Pâturin vulgaire (*Poa trivialis*) en association avec le Roseau (*Phragmites australis*) et le Solidage (*Solidago gigantea*).

Tout aussi fulgurante, la progression des cultures (Carte 5) atteint 88 % du marais de Lavours pour passer de 340 ha en 1967 à 639 ha aujourd'hui. Cette augmentation est en réalité plus importante car la moitié des surfaces cultivées en 1967 ne le sont plus en 2012. Au total, ce sont donc près de 430 ha de milieux naturels qui ont été mis en culture entre 1967 et 2012. Ces cultures concernent principalement le maïs et sont majoritairement localisées sur la moitié est du marais (communes de Culoz, Lavours et Cressin-Rochefort), en terrain tourbeux et limoneux ; au nord-ouest (Talissieu et Béon), elles n'occupaient que quelques hectares en 1967, alors qu'aujourd'hui 70 ha sont cultivés.



Carte 4 : Evolution des boisements humides



Carte 5 : Evolution des cultures et des peupleraies

Discussion

Cette étude met en évidence la très forte dégradation de l'état de conservation des milieux naturels du marais de Lavours sur la période 1967 à 2012. En contrepoint, elle révèle le rôle essentiel de la réserve naturelle pour la préservation des milieux ouverts sur tourbe : alors qu'ils ont disparu partout ailleurs, leur surface a également régressé dans la réserve, mais cette réduction est la conséquence de choix de gestion qui ont favorisé le retour à une végétation forestière spontanée dans une partie de la réserve nord. Pour Pautou et Gruffaz (1993), les cariçaies à *Carex elata*, les prairies à *Orchis palustris* et *Schoenus nigricans* sur sols tourbeux engorgés de façon permanente représentent « la configuration limite obligatoire » de la réserve naturelle : leur présence même sur des surfaces limitées atteste que le système a conservé sa spécificité. De ce point de vue, la réserve naturelle a atteint son objectif.

La situation des milieux ouverts sur limons est tout aussi préoccupante : quoique bien préservés dans la réserve sud, ceux-ci ont enregistré une très forte réduction en dehors de la réserve où ils étaient autrefois très répandus. Quelques rares îlots de ces milieux ouverts sur limons subsistent çà et là en périphérie de la réserve où se mêlent des fragments de grande cariçaie à Laïche grêle (*Carex acuta*), des roselières plus ou moins eutrophes et des fourrés de Saule cendré (*Salix cinerea*). Ces cariçaies sur limons méritent d'être préservées et gérées pour la flore et les oiseaux qu'elles abritent : Ail anguleux (*Allium angulosum*), Gesse des marais (*Lathyrus palustris*), Violette élevée (*Viola elatior*), Râle des genêts (*Crex crex*), Tariet des prés (*Saxicola rubetra*).

Un fait marquant de l'évolution de la végétation depuis 1967 est le développement des végétations ouvertes eutrophes mésohygrophiles, principalement sur les terrains limoneux. Les prairies à solidage (*Solidago gigantea*) étaient déjà identifiées en 1967 mais leur présence était limitée aux sous-bois de plantation de peupliers. Les roselières eutrophes riches en espèces nitrophiles (ortie, liseron...) en revanche n'étaient pas notées par Pautou (1969) alors qu'elles couvrent de très grandes surfaces aujourd'hui. La comparaison des deux cartes indique que ces roselières eutrophes prennent place sur d'anciennes roselières aquatiques mais surtout sur d'anciennes cariçaies à laïche grêle (*Carex acuta*) qui sont toutes deux nettement plus exigeantes vis-à-vis de la ressource en eau. L'abaissement général de la nappe phréatique entre 1979 et 2000, qui atteint 50 cm à 1 m dans les secteurs limoneux du marais (BURGEAP, 2000), entraîne une augmentation de la disponibilité des nutriments pour les plantes (eutrophisation), grâce à la minéralisation des horizons superficiels du sol (Vermeer et Berendse, 1983) : il en résulte une diminution de la richesse spécifique de la végétation en place et en particulier une raréfaction des plantes patrimoniales (Ellenberg, 1988), ainsi qu'une stimulation de la production de biomasse végétale qui s'exprime par un développement excessif de la roselière.

Globalement, le marais passe d'un état où les flux d'entrée (eau, limons, nutriments) s'équilibraient avec les flux de sortie (matière organique exportée par la fauche et le pâturage), à un état caractérisé par une

surabondance de matière organique et une baisse des contraintes hydriques : les milieux ouverts évoluent alors vers une phragmitaie à solidage et ortie (Pautou et Gruffaz, 1993). En France métropolitaine, l'eutrophisation est un phénomène qui touche tous les types de zones humides, notamment le littoral méditerranéen (80 % des sites) et plus de 50 % des sites des plaines intérieures (Genty, 2012).

On remarque que la végétation des substrats limoneux est plus sensible à l'abaissement de la nappe phréatique que celle des substrats tourbeux : en se gonflant et se dégonflant au rythme des apports hydriques, la tourbe a tendance à rester au contact du sommet de la nappe phréatique de surface alors que les substrats limoneux se déconnectent beaucoup plus vite. L'expansion de l'Ortie (*Urtica dioica*) en est une conséquence : cette plante, qui fait partie du cortège floristique alluvial classique, voit son développement limité par une nappe phréatique affleurante et par des inondations fréquentes, alors qu'elle est stimulée par la diminution des contraintes hydriques (Šrútek, 1997).

Un autre fait marquant de l'évolution du paysage végétal du marais de Lavours est le retour en force de la forêt, qu'il soit volontaire à l'intérieur de la réserve naturelle (choix de gestion) ou consécutif à l'abandon des terrains en dehors de la réserve. Le boisement des zones humides est avant tout contrôlé par l'hydromorphie du sol : même en l'absence de pâturage ou de fauchage, les ligneux ne s'installent pas si les contraintes hydriques sont trop fortes (nappe phréatique suffisamment haute, inondations fréquentes et longues), comme en témoignent encore quelques grands marais d'Europe centrale (Briebrza et Rospuda Valley en Pologne, Cerkniska en Slovénie...). Dans le marais de Lavours, l'étude de la tourbe montre que la végétation est probablement restée bloquée aux stades de la phragmitaie et de la cariçaie-jonçaie pendant huit millénaires, avec de possibles phases à îlots de boulaie et de buissons de ligneux bas (Goubet et Darinot, 2014).

A partir de la fin du Petit âge glaciaire, vers 1860, deux facteurs ont contribué à l'expansion de la forêt dans le marais. Les contraintes hydriques ont diminué : le climat est devenu plus sec et les premiers aménagements hydrauliques sur le Rhône et le Séran ont réduit les apports d'eau dans le marais. Dans le même temps, l'abandon progressif des pratiques agricoles traditionnelles (fauchage et pâturage) a permis aux ligneux de coloniser les prairies depuis les semenciers déjà en place. Leur progression fut ralentie par les feux de marais, mais pas véritablement contrôlée. En conditions réellement hygrophiles, l'essence la plus compétitive est l'aulne glutineux (*Alnus glutinosa*). Les aulnes les plus anciens sont répartis le long des cours d'eau et des fossés : ces aulnaies riveraines constituent des foyers de propagation, grâce à l'entraînement des graines hydrochores par les inondations (Lhote, 1985). L'aulnaie progresse par vagues, chacune correspondant à une avancée de 100 à 150 m vers l'intérieur du marais, la période séparant deux vagues étant de l'ordre de 15 ans (Cluzeau, 1992). Aujourd'hui, certaines aulnaies marécageuses forment des habitats très intéressants et identifiés comme prioritaires au titre de la Directive Habitats (aulnaie-frênaie des petits cours d'eau à sous-bois de laîche à épillets espacés).

Enfin, cette étude met en évidence la principale cause de transformation du paysage du marais qui est due à la mise en culture d'anciennes prairies.

Il ne s'agit pas ici d'une évolution biocénotique spontanée mais d'un véritable changement d'utilisation du sol en faveur de grandes cultures de céréales et essentiellement de maïs. Non seulement les anciennes prairies hygrophiles sur tourbe et sur limons ont été labourées, ce qui ne s'était jamais produit depuis l'arrivée des premiers moines-paysans dans le marais il y a neuf siècles, mais elles ont également été méthodiquement drainées, grâce aux subventions de l'Europe dans le cadre de la première Politique agricole commune, à partir de 1963. Ces drains ont également un effet sur les parties de marais non cultivées et en particulier sur la réserve naturelle. Ainsi, évolution biocoenotique et changement d'utilisation du sol sont interdépendants puisque le drainage des terrains agricoles et l'abaissement du niveau de la nappe phréatique qui s'en suit modifient la végétation naturelle du marais. Par ailleurs, la nature des cultures a aussi changé en cinquante ans. Alors qu'en 1967, il s'agissait de maraîchage, de vignes (technique des hautains), de céréales et de vergers, les cultures se sont simplifiées au bénéfice des céréales qui utilisent presque la totalité des terres cultivées. L'élevage dans le marais a disparu, après des siècles d'existence : apparu avec les moines au XII^e siècle, il a connu son apogée au début du XIX^e siècle avec environ 5 000 têtes de bétail (Bravard, 1987).

Conclusion

La végétation du marais de Lavours s'est considérablement dégradée entre 1967 et 2012, avec une perte surfacique des deux tiers des habitats ouverts (soit 675 ha), au profit des zones agricoles céréalières, des roselières eutrophes et de l'aulnaie glutineuse où la flore s'appauvrit. Dans ce contexte, la réserve naturelle revêt une importance capitale pour la préservation des milieux ouverts et de leur faune, qui ne subsistent plus qu'à l'intérieur de son périmètre.

Au niveau national, l'avenir des zones humides après 2010 est incertain pour 48 % d'entre elles et stable ou favorable pour 40 %, les experts étant les plus pessimistes pour les massifs à tourbières et les plaines intérieures (Genty, 2012). L'agriculture intensive, l'une des principales causes de dégradation des sites, risque de se développer encore. Dans le marais de Lavours, cette tendance se vérifie malheureusement : certaines prairies sur limons riches en Fritillaires pintade (*Fritillaria meleagris*) ont très récemment été labourées pour planter du maïs et d'autres prairies vont probablement subir le même sort prochainement si aucune action conservatoire n'est engagée. Quant à la nature des productions végétales, les orientations de la prochaine PAC décideront peut-être d'un retour à des cultures plus économes en eau que le maïs. Les épisodes climatiques extrêmes (sécheresse et canicule) sont des phénomènes nouveaux qui impactent déjà la végétation : dans la réserve naturelle, le Solidage (*Solidago gigantea*) a vu son développement stimulé par la sécheresse des étés de 2003 et 2005. D'une manière générale, si cette tendance climatique se confirme, les habitats les plus humides risquent de se dégrader, en particulier les habitats sur substrats tourbeux qui jusque là résistaient mieux à l'abaissement de la nappe phréatique. Cette évolution climatique peut aggraver le dysfonctionnement hydraulique du marais, en accentuant l'effet de l'abaissement de la nappe phréatique et de la raréfaction des inondations, avec pour conséquence probable une eutrophisation accrue du marais. La Bourdaine (*Frangula alnus*), dont le développement pose de graves problèmes dans le marais de Chautagne voisin, pourrait bénéficier de cette situation.

Au regard de ces évolutions probables, l'intérêt de la Réserve naturelle nationale du Marais de Lavours pour la préservation de la biodiversité ne peut que se renforcer. Dans un contexte global de dégradation continue des zones humides, les services qu'elle rend à la population vont probablement s'affirmer de plus en plus : comme témoin d'un écosystème préservé, son rôle éducatif va se renforcer et sa tranquillité en fait un véritable espace de détente grâce à des aménagements adaptés. En cas de sécheresse estivale, grâce à ses prairies humides, elle offre des pâtures et un fourrage aux éleveurs locaux en difficulté. Son rôle dans l'écrêtement des crues du Rhône les plus importantes demeure essentiel pour les territoires situés plus en aval. Néanmoins, la réserve naturelle n'occupe qu'un quart du marais et elle n'a qu'un effet limité sur les phénomènes qui concernent la plaine dans son ensemble. En particulier, le fonctionnement hydraulique du marais lui échappe et son amélioration, qui est vital pour l'état de conservation des milieux naturels, doit résulter de choix concertés avec l'ensemble des acteurs du marais.

Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien financier du Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement (B.O.P. 113) et du Conseil Général de l'Ain.

Bibliographie

- AÏN G. et PAUTOU G., 1969. Etude écologique du marais de Lavours (Ain). Documents pour la Carte de la Végétation des Alpes, Tome VII : 25-64.
- BRAVARD J.P., 1987. Le Rhône, du Léman à Lyon. Ed. La Manufacture, 451p.
- BURGEAP S.A. et BRAVARD J.P., 2000. Réhabilitation des grands marais du Haut-Rhône, étude du fonctionnement hydrogéologique des marais et plaines de Lavours et de Chautagne. Rapport de phase I : état des lieux. Rapport interne, 52 p. + cartes.
- CLUZEAU C., 1995. Dynamique de colonisation de l'aulne glutineux *Alnus glutinosa* L. dans un marais eutrophe de la plaine alluviale du Rhône. Ann. Sci. For., 49 : 539-548.
- ELLENBERG H., 1988. Floristic changes due to nitrogen deposition in central Europe. Critical loads for Sulphur and Nitrogen, Ed. Nilsson & Grennfelt : 375-383.
- GENTY C., 2007. L'évolution des zones humides d'importance majeure entre 1990 et 2000. IFEN, n°122, 4p.
- GENTY C., 2012. Résultats de l'enquête nationale à dire d'experts sur les zones humides - État en 2010 et évolution entre 2000 et 2010. Commissariat général au développement durable, Service de l'observation et des statistiques, Etudes et documents n°70, 96p.
- GOUBET P. et DARINOT F., 2014. L'histoire de la tourbière de la Réserve naturelle nationale du Marais de Lavours : ce que nous révèlent les macrorestes. Bulletin Soc. Linnéenne de Lyon, Hors-série n°3, sous presse.
- LHOTE P., 1985. Etude écologique des aulnes dans leur aire naturelle en France. Rapport IDF, ENGREF, Univ. Franche-Comté Besançon : 67p + annexes.
- MIKOLAJCZAK A., 2011. Connaissance de la végétation : caractérisation, distribution, évaluation. Axe 2.1. CPO 2008-2010. Région Rhône-Alpes. Tranche finale 2010. Conservatoire botanique national alpin : 860p.
- MIKOLAJCZAK A., 2012. Actualisation de la cartographie de la végétation du Marais de Lavours. Rapport final. Conservatoire Botanique National Alpin, 52p.
- OZENDA P. et coll., 1964. Feuille de Domène (XXXIII-34). Documents pour la Carte de la Végétation des Alpes, II : 69-118.
- PAUTOU G. et GRUFFAZ R., 1993. Les conséquences de la déprise agricole sur la dynamique de la végétation alluviale : l'exemple de la Réserve Naturelle du Marais de Lavours (Ain). Rev. Ecol. Alp., tome II : 25-41.
- ŠRŮTEK M., 1997. Growth responses of *Urtica dioica* L. to different water table depth. Plant Ecology, 130 : 163-169.
- VERMEER J.G. et BERENDSE F., 1983. The relationship between nutrient availability, shoot biomass and species richness in grassland and wetland communities. Vegetatio, vol. 53 (2) : 121-126.

Annexe 1

Typologie des habitats (CBNA, 2012)	Codification	Correspondance avec les groupements Pautou (1968)	Présence	
			RN	Hors RN
Végétations aquatiques				
Herbier enraciné vivace des eaux profondes eutrophes à Nénuphar jaune (<i>Nuphar lutea</i>) et/ ou Nénuphar blanc (<i>Nymphaea alba</i>)	CB 22.4311	Pan d'eau à <i>Nymphaea alba</i>	x	
Herbier aquatique enraciné des résurgences à Potamot coloré (<i>Potamogeton coloratus</i>)	CB 24.42	non cité	x	
Végétation aquatique des mares de tourbières alcalines à Petite Utriculaire (<i>Utricularia minor</i>) et mousses brunes (<i>Scorpidium scorpioides</i>)	CB 22.45 (22.14), Natura 2000 3160-1	non cité	x	
Herbier enraciné annuel immergé à Potamot de Berchtold (<i>Potamogeton berchtoldii</i>)	CB 22.422, Natura 2000 3150-1	non cité	x	
Herbier annuel flottant des eaux stagnantes méso-(oligo) trophe à Utriculaire citrine (<i>Utricularia australis</i>)	CB 22.414, Natura 2000 3150-2	non cité	x	
Herbier amphibie des eaux courantes claires à Ache noueuse (<i>Apium nodiflorum</i>) et Cresson de fontaine (<i>Nasturtium officinale</i>)	CB 53.4	Résurgence à <i>Apium nodiflorum</i>	x	x
Roselières hautes et basses (peuplements de petits et de grands héliophytes)				
Peuplement de grands héliophytes des rivages lacustres en voie d'atterrissement à Roseau commun (<i>Phragmites australis</i>)	CB 53.111	Phragmitaie aquatique (<i>Scirpo-Phragmitetum</i> Koch 1926)	x	
Peuplement monospécifique de grands héliophytes à Roseau commun (<i>Phragmites australis</i>) des stations atterries	CB 53.11	non cité	x	
Peuplement de grands héliophytes des stations atterries eutrophes à Roseau commun (<i>Phragmites australis</i>) et espèces nitrophiles	CB 53.112	non cité	x	x
Roselière basse des dépressions inondées et ceintures lacustres à Prêle des bourbiers (<i>Equisetum fluviatile</i>)	CB 53.147	non cité	x	
Roselière basse des fossés en eau à <i>Rorippa amphibia</i>	CB 53.14	non cité	x	x
Herbier vivace amphibie des eaux stagnantes à faiblement courantes méso-eutrophes à Rubanier négligé (<i>Sparganium erectum</i>)	CB 53.143	non cité	x	

Magnocariçaises (peuplements de grandes Laïches)				
Magnocariçaises à <i>Carex elata</i>	CB 53.2151 CB 53.2151	Magnocariçaises à <i>Carex elata</i>	x	
Magnocariçaise des substrats minéraux eutrophes à Laïche grêle (<i>Carex acuta</i>)	CB 53.2121	Prairies à hautes-herbes et faciès à <i>Carex acuta</i>	x	
Magnocariçaise oligotrophile hygrophile des ceintures lacustres à Laïche renflée (<i>Carex rostrata</i>)	CB 53.2141			
	non cité	x		
Magnocariçaise eutrophile sur substrat organique engorgé à nappe stagnante à Laïche des marais (<i>Carex acutiformis</i>)	CB 53.2122	Cariçaise à <i>Carex acutiformis</i>	x	x
Magnocariçaise eutrophile sur substrat engorgé à nappe circulante neutro-acidicline à Laïche des rives (<i>Carex riparia</i>)	CB 53.213	non cité	x	x
Roselière haute de Marisque (<i>Cladium mariscus</i>)	CB 53.3, Natura 2000 7210-1	Prairie à <i>Cladium mariscus</i>	x	
Magnocariçaise à <i>Carex appropinquata</i>		Cariçaise à <i>Carex paradoxa</i>	Non revu	
Bas-marais, prairies humides et mégaphorbiaies				
Bas-marais collinéen sur tourbe alcaline oligotrophe à Orchis des marais (<i>Orchis palustris</i>) et Choin noirâtre (<i>Schoenus nigricans</i>)	CB 53.21, Natura 2000 7230-1	Prairie à <i>Juncus subnodulosus</i> et <i>Schoenus nigricans</i>	x	
Prairie humide sur tourbe eutrophe alcaline à Molinie bleutée (<i>Molinia caerulea</i>) et Oenanthe de Lachenal (<i>Oenanthe lachenali</i>)	CB 37.311, Natura 2000 6410	Prairie à <i>Molinia caerulea</i> (<i>Molinietum medioeuropaeum</i> Koch 1926)	x	
Prairie mésohygrophile sur limon dominée par des graminées	CB 37.21	Variante à graminée de la Prairie à hautes-herbes	x	
Prairie hygrophile intensément pâturée	CB 37.24	non cité	x	
Mégaphorbiaie de substitution nitrophile méso-(hygro)phile à Solidage géante (<i>Solidago gigantea</i>)	CB 87.1	Prairie à <i>Solidago serotina</i>	x	x
Végétation des sols exondés				
Gazon pionnier des suintements et dépressions humides en contexte calcaire à Chlora perfoliée (<i>Blackstonia perforata</i>) et Petite centaurée élégante (<i>Centaureum pulchellum</i>)	CB 22.32, Natura 2000 3130-6	non cité	x	
Communauté pionnière annuelle longuement inondable à Isnardie des marais (<i>Ludwigia palustris</i>)	CB 22.32, Natura 2000 3130	non cité	x	
Végétation des grèves exondées vaseuses à Souchet noirâtre (<i>Cyperus fuscus</i>)	CB 22.3232, Natura 2000 3130	non cité	x	

Herbier amphibie des eaux stagnantes à faiblement courantes méso-oligotrophes à Leersie faux-riz (<i>Leersia oryzoides</i>)	CB 53.14	non cité	x	(x)
Boisements et fourrés				
Chênaie pédonculée(-frênaie) (<i>Quercus robur</i> , <i>Fraxinus excelsior</i>) neutrophile à Primevère élevée (<i>Primula elatior</i>)	CB 41.23, Natura 2000 9160-2	Chênaie-Frênaie (à Peupliers)	x	x
Aulnaie marécageuse à <i>Carex acutiformis/elata</i>	CB 44.91	Aulnaie à <i>Alnus glutinosa</i> (p.p.)	x	x
Aulnaie-frênaie (<i>Alnus glutinosa</i> , <i>Fraxinus excelsior</i>) des petits cours d'eau à sous-bois de Laîche à épillets espacés (<i>Carex remota</i>)	CB 44.3, Natura 2000 91E0	Aulnaie à <i>Alnus glutinosa</i> (p.p.)	x	x
Fourré mésohygrophile de Saulé cendré (<i>Salix cinerea</i>) sur tourbe alcaline	CB 44.921	non cité	x	
Fourré mésophile de Nerprun purgatif (<i>Rhamnus cathartica</i>)	CB 31.81, pas N2000	non cité	x	
			32	10

Tableau 1 : Liste des habitats naturels du marais de Lavours

Surfaces en 2012 (ha)									
Surfaces en 1969 (ha)	MOT	MOL	MAH	MFH	MOE	PL	CU	ind.	Total 1969
MOT	192		7	72				9	280
MOL		44	1	15	11	3		4	78
MOM		2		11		1	1		16
MAH		1	2	14				2	19
MFH		1		18				1	20
PL				1					1
ind.	2			1				1	3
Total 2012	195	50	11	131	13	5	1	12	417

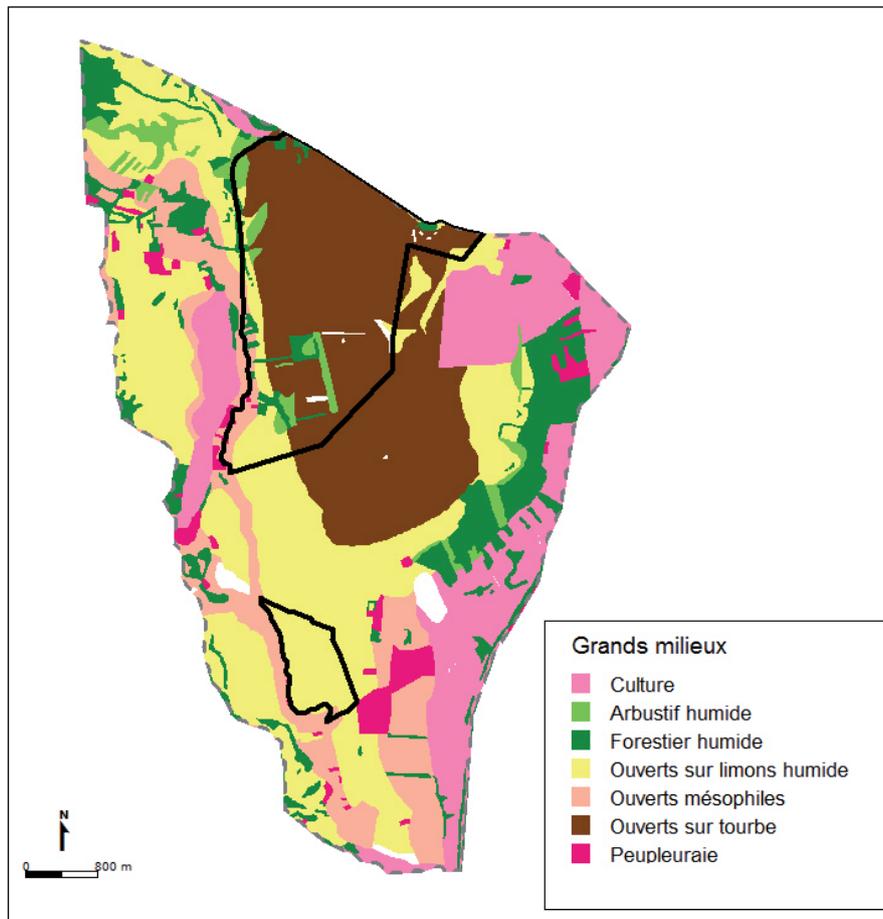
CU culture ; MAH arbustif humide ; MFH forestier humide ; MOE ouvert humide eutrophe ; MOL ouvert humide limon ; MOM ouvert mésophile ; MOT ouvert humide tourbe ; PL plantation peuplier ; Ind. indéterminé

Tableau 2 : Changements des grands types de végétation dans la réserve naturelle entre 1967 et 2012

Surfaces en 2012 (ha)										
Surfaces en 1969 (ha)	MOT	MOL	MOM	MOE	MAH	MFH	CU	PL	ind.	Total 1969
MOT	2	2	1	10		16	171	7	5	214
MOL	1	39		196	22	91	147	64	16	577
MOM		3	8	15	7	73	75	44	15	241
MOE					1	1	1	4		7
MA1	40									
MFH		1	1	6	5	150	19	19	14	215
CU			40	2		48	183	20	49	343
PL				4	1	27	22	5	5	64
Total 2012	3	45	50	235	38	421	638	166	104	1700

Tableau 3 : Changements des grands types de végétation hors de la réserve naturelle entre 1967 et 2012

Annexe 2



Carte écologique simplifiée du marais de Lavours (d'après Ain et Pautou, 1969)



Renconstitution dendrogéomorphologique de la dynamique récente d'un cône torrentiel : le torrent des Glacières (RN des Hauts de Chartreuse)

Résumé

Les laves torrentielles sont un des enjeux majeurs liés aux dynamiques de versant dans les Alpes. Pour connaître la chronologie et l'emprise des phénomènes, les archives documentaires sont souvent lacunaires. Or, les arbres impactés par des processus géomorphologiques, dont les laves torrentielles, enregistrent les perturbations dans leurs cernes de croissance. L'analyse des séries de cernes a ainsi été utilisée pour reconstituer l'occurrence spatio-temporelle des laves torrentielles du torrent des Glacières (RN des Hauts de Chartreuse) et pour retracer la dynamique du cône forestier. Cette étude dendrogéomorphologique se base sur l'analyse de conifères et de feuillus : 315 perturbations de croissances extraites de 189 arbres échantillonnés ont permis d'identifier 21 laves torrentielles depuis 1915. Avec l'appui d'orthophotographies aériennes et par le géoréférencement des arbres échantillonnés dans un SIG, la dynamique torrentielle a pu être retracée sur l'ensemble du cône de déjection du torrent.

Abstract

Impacted trees by geomorphologic process such as debris flows, record growth disturbances in the tree ring series. Their analysis has been used to firstly recreate spatio-temporal occurrence of debris flows in the Glacières torrent and secondly to reconstruct dynamic on the forested cone. Debris flows events represent a major challenge in risk management in Alpine Regions, but incomplete historic archives often

Johann Blanpied
Laurent Astrade,
Estelle Ployon
Johan Berthet
*Laboratoire Edytem CNRS (UMR5204 CNRS),
Université de Savoie, Pôle Montagne, campus
scientifique, Le-Bourget-du-lac.*

Jérôme Lopez-Saez
*Institut de Géographie Alpine, Université
Grenoble I, 14b Marie Reynoard, 38000
Grenoble.*

Contact : Laurent.astrade@univ-savoie.fr

prevent from a good knowledge. This dendrogeomorphologic study is based on conifers and broad-leaved trees samples: 315 growth disturbances from the 189 sample trees, allowed the identification of 21 debris flows since 1915 on Glacières torrent. An orthophotography series helped to reconstruct torrential dynamic on forested cone of the torrent.

INTRODUCTION

Les torrents et leurs cônes de déjection sont des systèmes intégrateurs des évolutions hydroclimatiques et anthropiques des moyennes et hautes montagnes. Leur situation à l'interface entre la vallée et le versant en font des secteurs aux enjeux sociétaux majeurs où il faut concilier la gestion des milieux et des risques naturels avec l'aménagement du territoire.

La lave torrentielle est un processus géomorphologique très répandu dans les Alpes (Stoffel, 2008) qui peut engendrer de nombreux dommages sur les infrastructures routières, les bâtiments et parfois même sur l'Homme (Bollschweiler, 2007). Cependant la compréhension et la prévision des phénomènes restent difficiles. Les lacunes dans les archives documentaires, tant dans la fréquence que dans l'extension spatiale des aléas (Corona *et al.*, 2010), mettent en exergue la nécessaire amélioration de la connaissance pour une estimation réaliste du risque. Les cônes de déjection sont l'expression de l'évolution des paramètres du bassin versant et représentent, encore plus quand ils sont végétalisés, la mémoire des différents processus (Stoffel et Wilford, 2012).

La compréhension de leur dynamique et de leur mobilité spatiale mobilise de nombreux outils et méthodes, dont le recours aux archives historiques et environnementales, et, ici, celles enregistrées dans les cernes des arbres. La dendrochronologie est la mesure des largeurs des cernes annuels de croissance et leur datation précise. En 1971, une étude pionnière d'Alestalo pose les premiers concepts de la dendrogeomorphologie. Il la définit comme une technique de reconstruction de l'activité géomorphologique passée, grâce à la capacité du peuplement forestier à réagir à une perturbation exogène, en l'occurrence le processus géomorphologique. Depuis, les études dendrogeomorphologiques se développent sur les différents processus, en particulier en domaines montagnards (Astrade *et al.*, 2012), comme les glissements de terrain (Stefanini, 2004, Lopez Saez, 2011), les avalanches (Bryant *et al.*, 1989 ; Corona *et al.*, 2010), les inondations (Astrade et Begin, 1997), et les laves torrentielles (May et Gresswell, 2004 ; Stoffel *et al.*, 2005 ; Stoffel, 2010 ; Arbellay *et al.*, 2010). Bollschweiler *et al.* (2008) ainsi que Stoffel *et al.* (2005, 2008) qui mettent en relation leurs résultats à l'échelle de plusieurs torrents et les comparent aux données climatiques avant d'évaluer le possible impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des laves torrentielles. Par ailleurs, la dendrogeomorphologie a été utilisée pour une reconstruction spatio-temporelle des événements (Bollschweiler *et al.*, 2007) sur le cône forestier du torrent du Bruchji dans le Valais (Suisse). Lopez Saez *et al.* en 2011, avec l'utilisation d'un Lidar terrestre, retrace par dendrogeomorphologie l'activité des laves torrentielles dans les chenaux abandonnés du torrent du Manival dans le massif de la Chartreuse.

Le travail présenté dans ce texte se rapproche de l'étude réalisée par Procter *et al.* (2012) qui ont retracé l'historique des laves torrentielles ainsi que la dynamique du cône forestier par une approche intégrative avec une résolution spatio-temporelle qu'une série d'orthophotographies leur a permis de préciser. L'objectif est de comprendre la dynamique récente du torrent des Glacières afin de comprendre le contexte de sa dynamique actuelle, à l'aide de la dendrogéomorphologie et de orthophotographies aériennes. La méthodologie est mise en place afin d'effectuer une reconstitution spatio-temporelle des laves torrentielles et des phases de la dynamique du cône.

Site, matériel et méthodes

Site d'étude

Le torrent des Glacières se situe à l'extrémité nord du Massif de la Chartreuse dans la Réserve Naturelle des Hauts de Chartreuse (Figure 1), dans et au pied de la fameuse paroi rocheuse de la face nord nord-ouest du Mont Granier. Sa zone de production correspond au ravin du Diable qui fend la paroi de 1850 m à environ 1200 m d'altitude, avec une pente moyenne de 57° (Hogrel et Magdinier, 2001) où les écoulements de surface présents uniquement en période de fortes précipitations, lui permettent de se charger en matériaux. La zone d'étude est le cône de déjection en aval du ravin qui s'étend de 1050 m à 850 m d'altitude sur environ 20 ha, principalement peuplé d'une hêtraie sapinière plus ou moins homogène.

Ce cône présente aujourd'hui de très nombreuses formes de dynamiques anciennes et actuelles encore bien visibles (chenaux actifs, paléochenaux, lobes de laves torrentielles frais ou fossilisés, bourrelets, talus d'incision, Figure 2), une recolonisation végétale plus ou moins ancienne sur certains secteurs et une réactivation récente sur d'autres qui témoignent déjà du dynamisme passé et actuel du site. Plusieurs méthodes ont été mobilisées pour comprendre et retracer ce dynamisme :

La cartographie géomorphologique

C'est l'état des lieux et la cartographie des formes de dépôts caractéristiques des laves torrentielles qui permettent de connaître l'emprise des processus de lave torrentielle et leurs caractéristiques (fraîcheur des dépôts, colonisation végétale, etc.). C'est un préalable nécessaire et l'outil de base de la connaissance du site.

Les formes ont été relevées à l'aide d'un GPS Garmin ETrex. Ces tracés sont ensuite transférés vers le logiciel de Système d'Information Géographique ArcGis et corrigés pour la construction du croquis à l'échelle du 1/3000. Sous couvert forestier, le GPS peut en effet parfois avoir plus d'imprécisions. Il est donc important de reprendre les contours des formes en fonction des observations de terrain. Parallèlement, deux profils topographiques ont été réalisés afin d'avoir une vision du profil en long du torrent dans différentes parties du cône de déjection, en particulier les zone de rupture et de reprise de pente.

Les archives documentaires

Elles permettent d'avoir une première vision de la dynamique et de la fréquence de l'occurrence des laves torrentielles. Des informations fournies par l'Office National des Forêts et par l'étude de 2001 pour le curage du torrent (Hogrel et Magdinier, 2001), permettent d'établir un

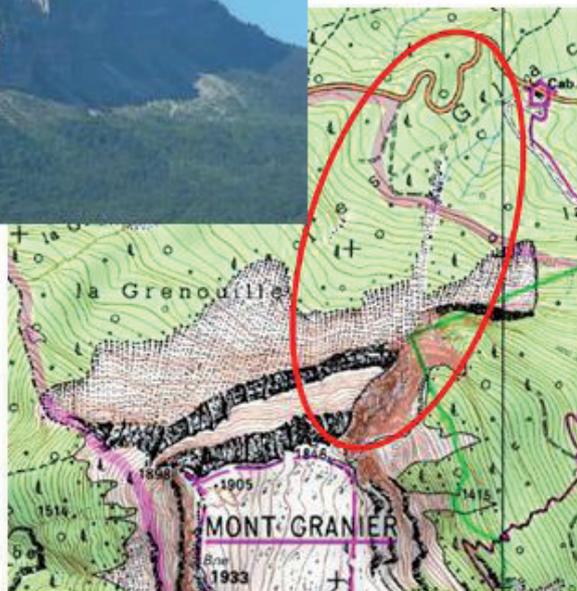
premier historique des événements torrentiels recensés sur le torrent des Glacières. Par ailleurs, des études prospectives pour l'exploitation de matériaux du torrent ont été effectuées en 2001 et 2006 : elles décrivent la dynamique observée à cet instant en l'illustrant avec des photographies de terrain qui nous serviront de comparaison.

Cependant, les archives, en particulier dans les zones non peuplées sont parfois lacunaires et imprécises, et ce même pour les événements les plus récents. Et surtout, renseignent peu sur le comportement spatial des événements. Le travail de collecte de données documentaires est toutefois indispensable pour servir de cadre de référence aux résultats de l'étude dendrogéomorphologique et pour comprendre la perception des événements par les populations et acteurs locaux.

La base de données cartographiques et d'images.

La base de données cartographique est composée d'une série de 11 photographies IGN orthorectifiées, de photographies obliques de 1996, 2001 et depuis 2009, et d'un scan 25 IGN récent. L'observation de la mobilité du chenal actif dans le temps est réalisable par la digitalisation de la bande considérée comme active (zone discernable à l'œil sur la photographie aérienne où les arbres ne colonisent pas le lit du torrent). A la suite de cette analyse, une lecture plus fine est effectuée et consiste à repérer et à préciser des points importants de la dynamique comme la présence de dépôts, d'incision... Elle n'est utilisable que sur les images récentes dotées d'une bonne résolution. En parallèle, le laboratoire EDYTEM a mis en place un suivi topographique à haute résolution (laserscan terrestre) sur le haut du cône actif.

Figure 1 : Localisation du Mont Granier et du torrent des Glacières.



L'approche dendrogéomorphologique

Elle repose sur le concept de « *Process-Event-Response* » de SHRODER (1978, 1980), repris par ASTRADE et al. (2012) (Figure 3) qui explique le principe de reconstitution des processus géomorphologiques par la lecture et la datation dans les cernes des réponses des arbres aux perturbations. Le passage de laves torrentielles provoque des perturbations morphologiques externes visibles sur la végétation et lisibles par l'analyse de la croissance des cernes. Les perturbations et les réponses recherchées sont (Figure 4) :

- la blessure sur le tronc : la datation de la cicatrice va permettre de dater l'année de l'impact ;
- l'enfouissement de la base du tronc : en fonction de l'épaisseur des dépôts, l'apport en nutriment et en eau aux racines est limité voir arrêté ; cela provoque une sorte d'asphyxie dans les années suivant l'évènement, l'arbre meurt ou subi une modification de croissance des cernes ;
- la courbure ou l'inclinaison du tronc ; par effet de phototropisme, l'arbre va modifier la croissance des cellules du cerne de part et d'autre du tronc, ce qui va former du bois de réaction (visible extérieurement par la courbure du tronc) ;
- l'étêtatement du tronc : il provoque un arrêt ou une diminution de la croissance de l'arbre dans les années postérieures à l'évènement.

Les arbres présentant des signes de perturbation sont systématiquement échantillonnés, soit à l'aide d'une scie à bois ou d'une tronçonneuse pour obtenir une coupe transversale, soit, dans la partie supérieure du cône qui se trouve dans la Réserve Naturelle, avec une Tarière de Pressler ; dans ce cas, deux échantillons par arbre sont prélevés (carottes). Lorsque l'arbre possède une blessure, la méthode de coin est employée ; elle consiste à extraire une forme triangulaire de l'arbre au niveau du bourrelet de cicatrice.

Les conifères sont largement privilégiés dans les études dendrogéomorphologiques en raison de la plus grande visibilité des cernes de croissance et des réponses aux perturbations. Cependant, des zones fortement impactées du site d'étude sont uniquement peuplées de feuillus. Suite aux premières campagnes de prélèvements et aux premières analyses, les échantillons de *Fagus sylvatica* (Hêtre) et de *Fraxinus excelsior* (Frêne) ont été privilégiés pour leur meilleure lisibilité. Dans certains secteurs, lorsque des zones ne possèdent pas d'arbres impactés ou uniquement des jeunes feuillus (moins de 15 ans), il est important de dater ou d'estimer l'âge du peuplement. Cela permet d'évaluer la date de la recolonisation végétale et donc la date du dernier évènement ainsi que la stabilisation de la forme.

Un protocole de terrain pendant l'échantillonnage est mis en place pour faciliter la transposition des informations en base de données géographiques. Ainsi, pour chaque arbre échantillonné, une fiche de terrain renseigne sur les informations primordiales comme son espèce, sa perturbation, le type d'échantillonnage, les photographies associées

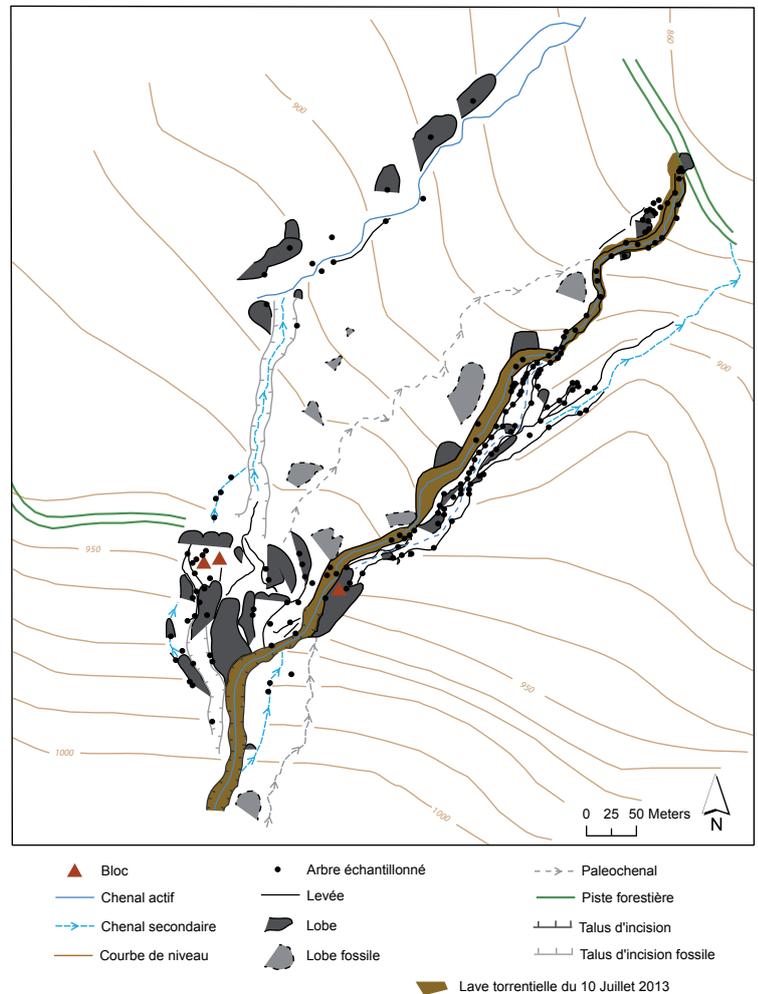


Figure 2 : Croquis géomorphologique du torrent des Glacières, positionnements des arbres échantillonnés et lave torrentielle du 10 Juillet 2013.

et les coordonnées GPS. L'arbre échantillonné est également pointé manuellement sur le croquis géomorphologique sur le terrain. Ces données sont transférées dans un tableau Excel et sous ArcGis pour constituer la base de données.

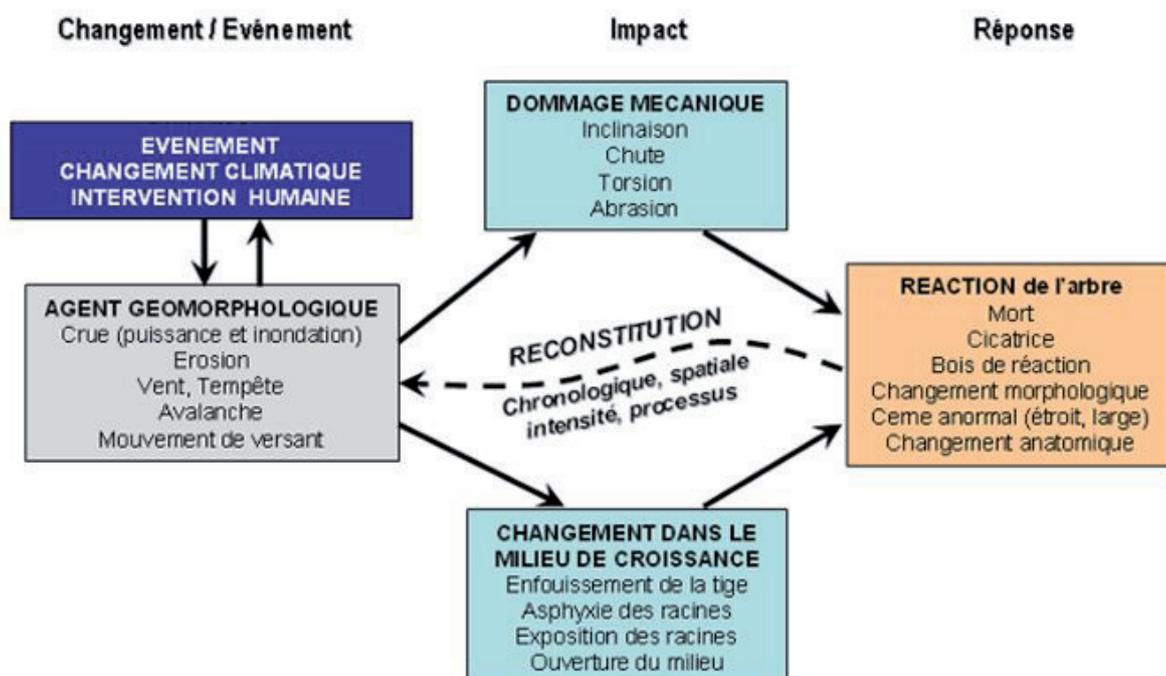
Procédure d'analyse

La totalité des échantillons est poncée avec une ponceuse à bois, au grain 80P, puis 160P puis 200P, avant de passer au scanner haute résolution (scan de 1200Dpi). Le scan est transféré sous le logiciel CooRecorder qui permet de pointer chaque cerne directement sur le scan et d'en mesurer la largeur. Une fois les cernes pointés, le fichier est transféré vers le logiciel CDrendro. Ce dernier permet d'interdater, de visualiser la courbe de largeur des cernes et de corrélérer plusieurs séries de données. Le cerne le plus jeune est daté, permettant de visualiser les variations de largeurs par année. Dans le souci d'améliorer les analyses et de conforter les résultats, une corrélation est réalisée entre les carottes du même arbre.

Les perturbations de croissance s'analysent de la manière suivante (Figure 5) :

- les blessures sur le tronc sont datées par l'année de formation de tissu calleux qui se forme suite à l'impact du cambium (tissu végétal marquant la limite entre le bois et l'écorce) ;
- les basculements du tronc sont datés par l'année de formation du bois de réaction qui permet de maintenir la stabilité mécanique de l'arbre : du bois de compression et une réduction de croissance chez les conifères - le bois de compression est plus foncé (jaune ou brun) du fait des trachéides (cellules allongées du xylème) arrondies, denses à parois cellulaires plus épaisses -, du bois de tension chez les feuillus ;
- l'enfouissement et l'étêtement des tiges sont datés par l'année de début d'une période de réduction de croissance d'au moins 2 ans ;
- l'ouverture du milieu adjacent à l'arbre échantillonné est datée par l'année de l'augmentation de croissance significative de plus de 2 ans. En effet, un évènement torrentiel, en rasant certains arbres, laisse les vivants accéder plus facilement à la lumière. Il y a une diminution de

Figure 3 : L'approche dendrogéomorphologique (Astrade et al., 2012).



la concurrence de l'accès à la lumière et à l'eau et donc une augmentation rapide de la croissance de l'arbre.

Construction de la base de données

L'espèce de l'échantillon, le type d'échantillon et de perturbation morphologique externe, le nombre de cernes (donc son âge), l'année et le type de perturbation de croissance de l'échantillon sont répertoriés dans un tableau Excel, différentes statistiques en sont extraites (présentées dans la partie suivante) et l'ensemble de ces informations est transférée sous le logiciel ArcGis dans la table attributaire précédemment constituée. Le total d'arbres impactés par année est calculé et spatialisé. L'évènement torrentiel est retenu pour la chronologie quand le nombre d'échantillons impactés une année donnée par rapport au nombre d'échantillons total de cette même année dépasse un seuil de validation communément fixé à 5% par les études en dendrogéomorphologie. Par exemple, en 2012, 32 arbres ont été impactés sur 184 arbres analysés ; 17,4% des arbres de 2012 sont impactés, dépassant le seuil fixé à 5% ; l'évènement est retenu.



Figure 4 : Exemples d'arbres échantillonnés et de prélèvements.

Résultats

Les perturbations de croissance

Au total 222 échantillons issus des 189 arbres ont été réalisés. Tous les résultats sur les types d'échantillons et les espèces échantillonnées sont présentés dans les tableaux ci-dessous. L'analyse des cernes a permis d'identifier 331 perturbations de croissance. Les 126 conifères échantillonnés (68% des échantillons) représentent 80% des perturbations de croissance analysées. A l'exception du *Fraxinus excelsior* (Frêne), l'analyse des cernes des feuillus s'est avérée plus compliquée.

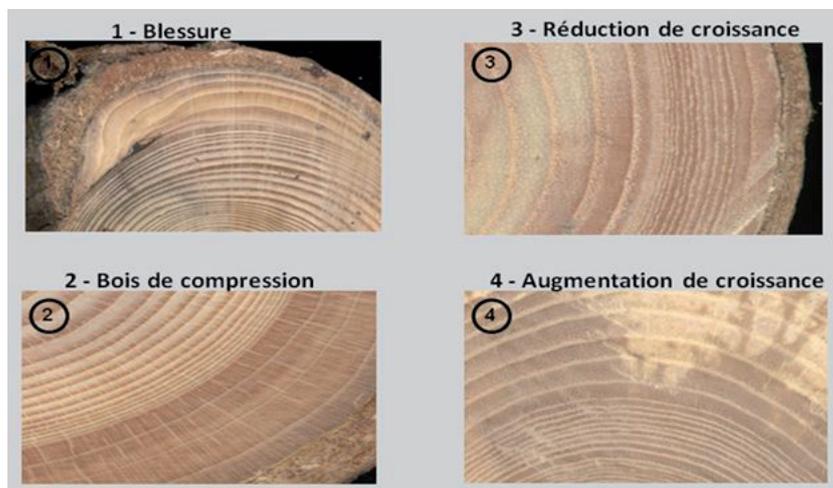


Figure 5 : Exemples de perturbations de croissance des arbres échantillonnés.

Espèce échantillonnée	Nombre d'échantillon	Pourcentage
<i>Picea abies</i> (Epicéa)	67	36%
<i>Abies alba</i> (Sapin)	59	32%
<i>Fraxinus excelsior</i> (Frêne)	31	17%
<i>Alnus incana</i> (Aulne blanc)	20	11%
<i>Fagus sylvatica</i> (Hêtre)	7	4%
Feuillus indédertimé	3	2%
<i>Sorbus aria</i> (Alisier blanc)	2	1%
<i>Acer pseudoplatanus</i> (Erable)	1	1%
Total	189	100%

Perturbation morphologique externe	Nombre de perturbation	Pourcentage
Blessure	110	33%
Courbure	109	33%
Enfouissement	103	31%
Etêtement	9	3%
Total	331	100%

Age de peuplement

La moyenne d'âge de l'échantillonnage est de 38,6 ans. La cartographie de la structure de l'âge du peuplement échantillonné (Figure 6) offre une vision des secteurs ayant une structure d'âge similaire et met en évidence la dynamique de recolonisation du site. L'estimation de l'âge minimum ou la datation des jeunes arbres sur les dépôts permettent de dater le dernier événement. Cependant, les 189 arbres échantillonnés ne permettent pas d'observer la structure d'âge complète. De plus, la résolution des orthophotographies n'est pas assez bonne pour pouvoir différencier ou estimer les types et les âges des peuplements. Il est donc intéressant de comparer leur lecture avec les observations de terrains sur la végétation.

Datation des événements

L'analyse a permis d'identifier 21 laves torrentielles depuis 1915 (Figure 7). Les laves torrentielles de 1982, 1991, 1992 et 2001, sont décrites dans les archives documentaires ; 11 laves torrentielles depuis 1960 non connues sont révélées. En considérant une période de 98 ans (1915-2013), la période de retour d'un événement est de 4,66 ans, soit un peu plus de deux événements par décennie. Depuis 1960, 17 laves torrentielles se sont produites sur le torrent des Glacières. La période de retour est alors de 3,1 ans, soit 3,2 événements par décennie. L'augmentation de la fréquence se confirme avec l'observation de la récurrence des laves ces dernières années (2008, 2010, 2012, 2013). Les événements les plus intenses sont, du fait du grand nombre d'arbres impactés par rapport aux nombres d'arbres échantillonnés ceux de 1982, 1992, 2001 et 2010 – auquel il faut ajouter 2013, survenu juste après la campagne d'échantillonnage (Figure 2). Les résultats avant 1950 sont toutefois à prendre avec prudence, le nombre de cernes obtenus pour ces années devenant de plus en plus restreint.

Spatialisation des événements

L'analyse des bandes actives et des différents chenaux depuis 1948 sur les orthophotographies aériennes (Figure 8) montre des phases de plus fort dynamisme (milieu du 20^e siècle, années 1990 et depuis 2009) et de recolonisation végétale (décennies 1970 et 1980, 1^{re} moitié des années 2000). La cartographie précise de l'extension spatiale des laves torrentielles basée sur le géoréférencement des arbres impactés confirme ces phasages et montre que celles de 1982, 1992, 2001 et 2010 sont aussi les plus étendues (Figure 9). Elle montre aussi la tendance d'une déviation des laves dans la branche nord-est à partir des années 1990 et l'extinction du chenal axial à partir de 2001. A partir de 2010 l'intensité s'accroît dans la partie de rive droite du cône, les matériaux se déposent dans la forêt et parfois même sur la route forestière des Eparres en aval.

Conclusion / Discussion

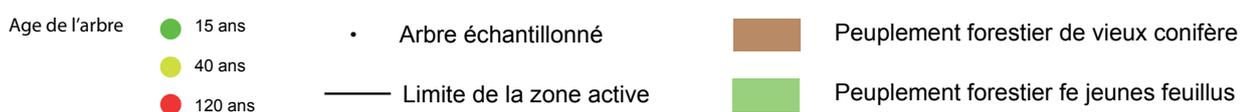
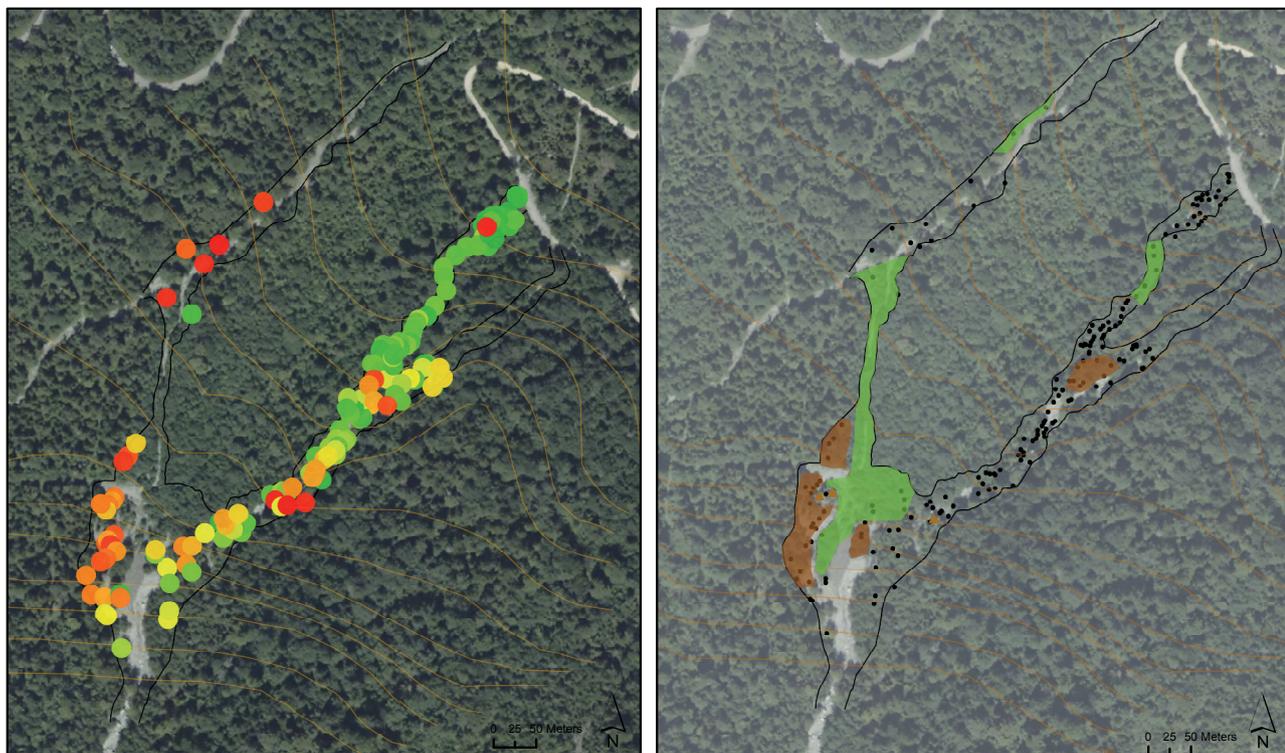
La confrontation des différentes analyses (carte géomorphologique, orthophotographies, dendrogéomorphologie) permet de reconstituer (surtout depuis 1950) la fréquence et l'extension spatiale des laves torrentielles et la dynamique globale du cône de déjection du torrent des Glacières.

Dynamique du cône de déjection

Elle peut être divisée en plusieurs phases (Figure 10) :

- avant 1970 : construction du cône principal avec au moins 5 événements morphogènes. Mais les données disponibles avant les années 1940 sont insuffisantes pour préciser la chronologie de la formation de ce cône ;
- 1970-1982 : période de calme hydromorphologique (pas d'événement, contraction de la bande active et colonisation végétale du cône)
- 1982-2001 : les écoulements et laves torrentielles contournent le désormais paléocône, préférentiellement par sa rive gauche et parfois aussi en partie sur sa rive droite à partir de 1991. Jusqu'en 1992 les fronts des laves atteignent la route départementale (et en particulier en 1982), ensuite leurs extensions sont plus réduites ;
- 2001 : l'événement est un tournant dans la dynamique du cône. Au sens propre, le dépôt de quantités importantes de matériaux sur la partie supérieure (formant un nouveau cône) va déclencher le basculement des écoulements sur la rive droite et la déconnexion du chenal axial. Au sens figuré, c'est la prise de conscience par les nombreux acteurs locaux (RN, commune, ONF, carrier) des enjeux liés à ce site (source de matériaux, risques, impacts sur la route forestière des Eparres, spécificités écologiques) ;

Figure 6 : Ages et structures des peuplements.



- 2004-2008 : la zone d'accumulation de 2001 est d'abord contournée par la gauche, dans une zone forestière jusque là épargnée, puis par la droite, et commence déjà à s'inciser ;
- Depuis 2010 : l'ancien chenal axial est complètement déconnecté du système, il se végétalise, sur la partie amont l'incision s'accélère (plus de 3 m en 5 ans) et progresse rapidement vers l'aval, guidant les laves torrentielles vers la rive droite où des cônes secondaires se mettent en place plus en aval et où les fines atteignent presque systématiquement la route forestière.

En termes d'évolution future, le secteur actuellement actif de rive droite va poursuivre son évolution et sa dynamique de remplissage et d'étalement, sous l'influence toutefois maintenant de la plage de dépôt construite en 2013 en amont immédiat de la route forestière. Par ailleurs, une évolution de la partie amont n'est pas à exclure, la forte incision en cours pouvant faciliter le dégagement du bouchon d'accumulation actuel et la remobilisation des anciens dépôts par un ou des événements successifs.

Bilan et comparaison

L'analyse dendrogéomorphologique a recensé et spatialisé 17 laves torrentielles depuis 1960, dont 11 laves inconnues des archives documentaires, avec une relative augmentation de la fréquence. Elle ne renseigne toutefois que sur le nombre minimum d'événements, une perte d'information étant liée (I) à la jeunesse du peuplement, facteur limitant, récurrent dans les études dendrogéomorphologiques (Procter *et al.* 2012, Stoffel, 2008), (II) au seuil d'intensité et d'extension entraînant les perturbations sur les arbres, (III) à la répétition d'événements pendant une même année (un seul sera enregistré dans les cernes) et (IV) à la durée du temps de réponse des arbres qui peut masquer deux événements rapprochés. Cependant, ces limites sont compensées par l'utilisation des archives documentaires et des orthophotographies, et par la datation de la stabilisation des formes, qui permettent de cadrer la chronologie des laves torrentielles et surtout de donner un phasage de la mobilité du chenal au cours du temps.

En 2011, Lopez Saez et al ont reconstitué l'activité torrentielle des chenaux abandonnés du torrent du Manival, également sur la bordure orientale du Massif de la Chartreuse, riche en études et en archives documentaires du fait de son intense activité, de sa dimension remarquable et de sa proximité avec l'agglomération grenobloise. Les résultats montrent également une tendance à l'augmentation de la fréquence des événements ces dernières années et un synchronisme pour certaines années entre les laves torrentielles des deux torrents (1950, 1986, 1991, 1992, 1998...).

Apports et perspectives

Ce travail a permis de donner une meilleure connaissance du fonctionnement du torrent des Glacières aux différents gestionnaires préoccupés par les risques, la protection des ressources et la préservation des milieux naturels protégés. Il montre, au cours du 20^e et du début du 21^e siècle, une tendance à l'augmentation de la période de retour des événements dans la décennie actuelle et illustre la mobilité naturelle des cônes de déjection torrentiels, pas toujours bien perçue ni admise. Reste encore pour ce site, dans la continuité de ces résultats,

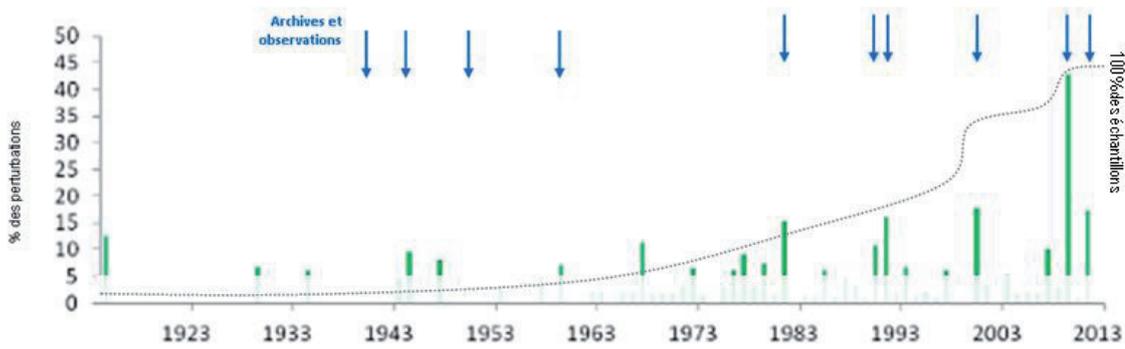


Figure 7 : Chronique dendrogéomorphologique des laves torrentielles du torrent des Glacières.



Figure 8 : Exemple de l'évolution de la limite de la bande active (trame grise) en 1982, 2006 et 2009 (de gauche à droite).

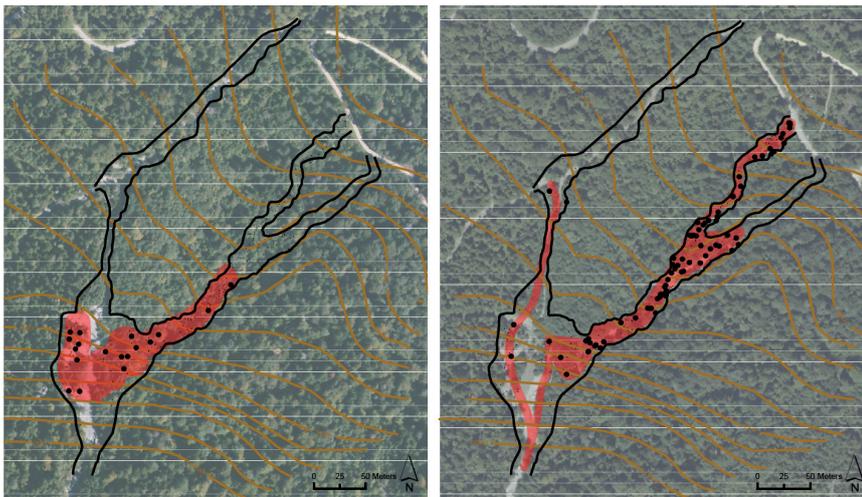


Figure 9 : Exemple de reconstitution spatiale de lave torrentielle (trame rouge) en 2008 (à gauche) et en 2010 (à droite).

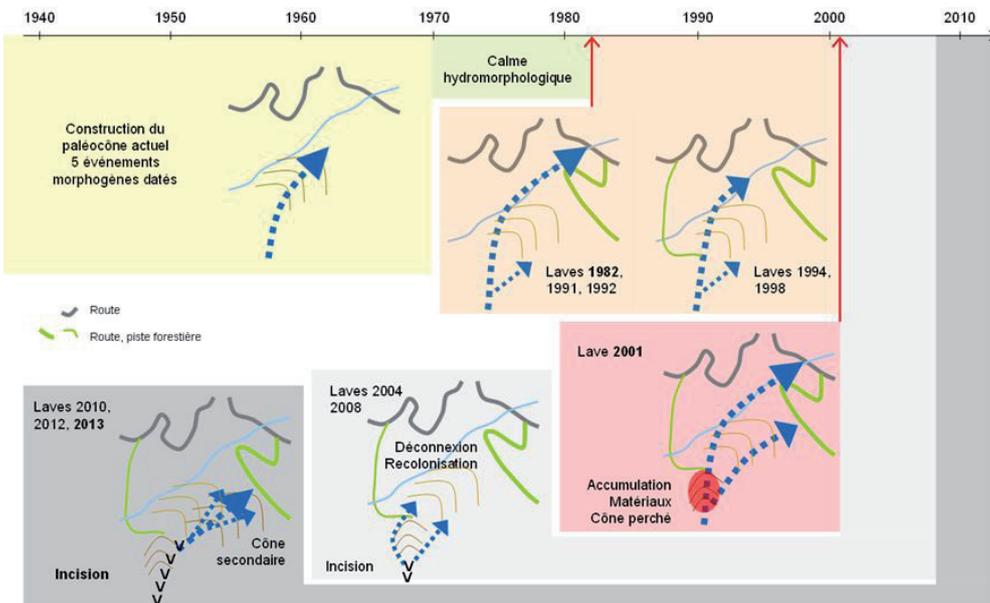
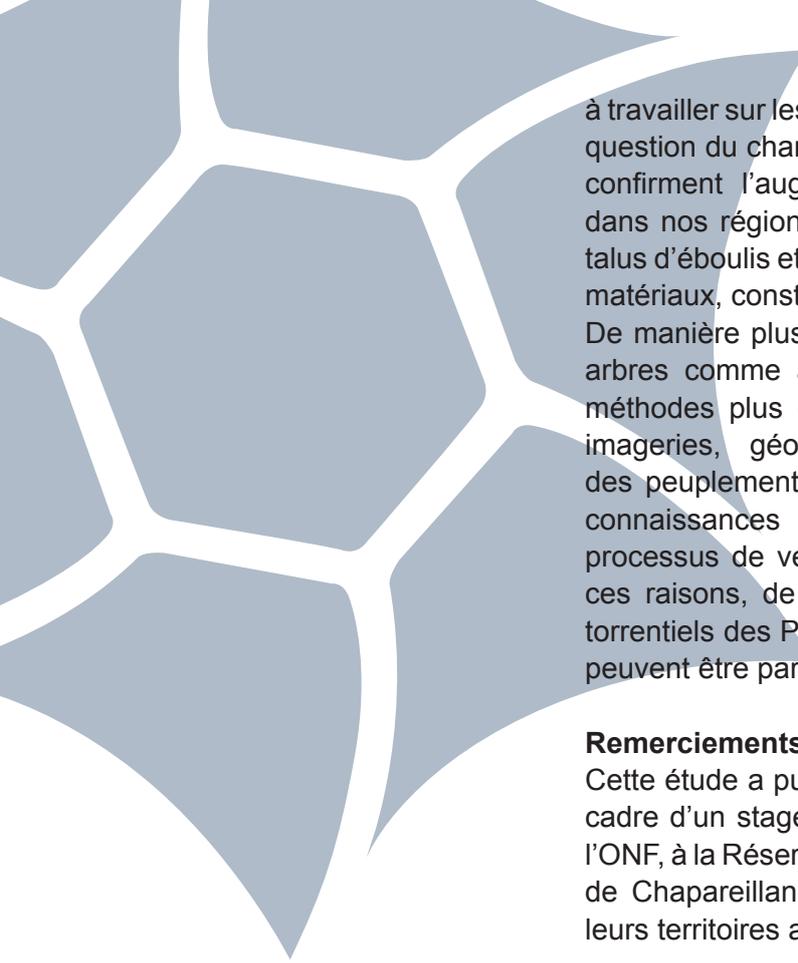


Figure 10 : Reconstitution schématique de l'évolution de la dynamique du cône de déjection du torrent des Glacières.



à travailler sur les liens entre les événements et les précipitations, sur la question du changement climatique – d’autant plus que les prévisions confirment l’augmentation des phénomènes climatiques extrêmes dans nos régions – sur la fourniture sédimentaire des parois et des talus d’éboulis et sur le rôle des interventions humaines (extractions de matériaux, construction de la plage de dépôts...).

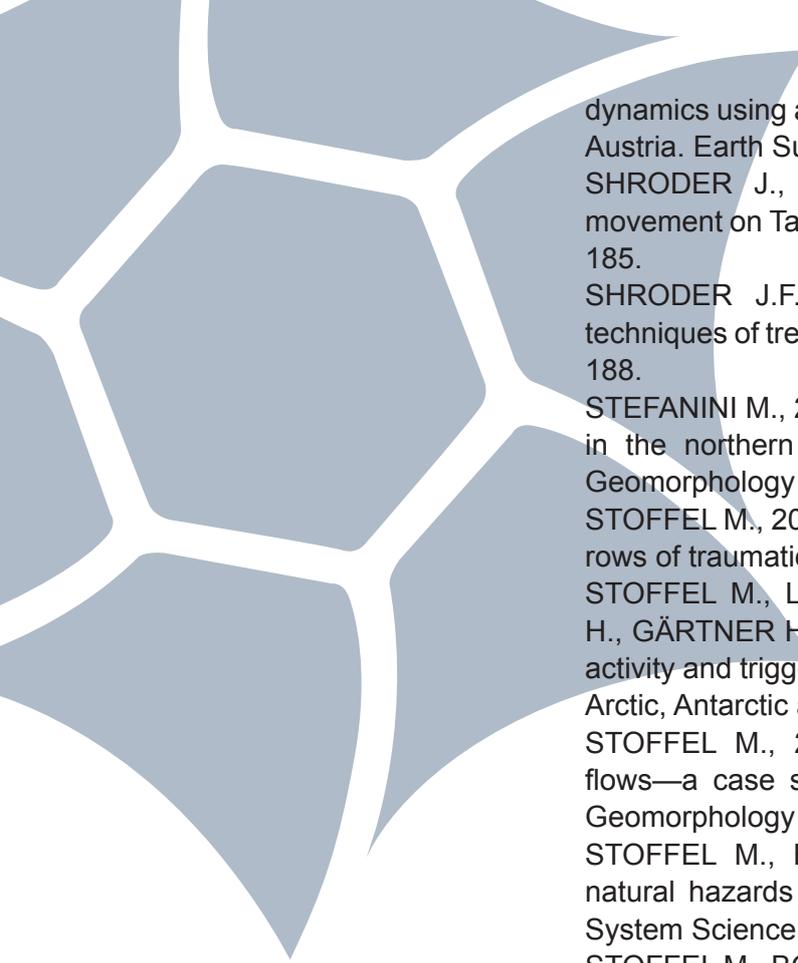
De manière plus générale, l’utilisation des cernes de croissance des arbres comme archives environnementales, couplée avec d’autres méthodes plus ou moins classiques (géomorphologie, topographie, imageries, géoréférencement, archives documentaires, analyse des peuplements...) est une approche riche pour l’amélioration des connaissances de la dynamique des écosystèmes soumis à des processus de versants ainsi qu’au zonage des risques. Pour toutes ces raisons, de telles études menées sur un ensemble de milieux torrentiels des Parcs régionaux et des Réserves Naturelles des Alpes peuvent être particulièrement intéressantes.

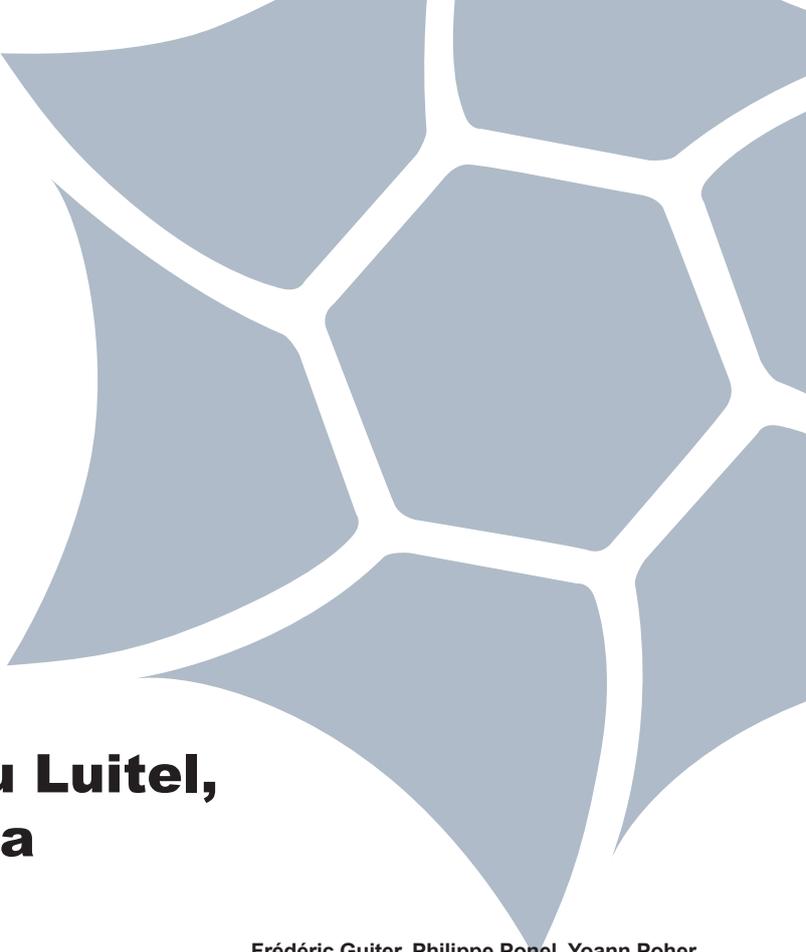
Remerciements

Cette étude a pu être réalisée grâce au laboratoire EDYTEM, dans le cadre d’un stage de Master 2. Les remerciements vont également à l’ONF, à la Réserve Naturelle des Hauts de Chartreuse et à la commune de Chapareillan qui ont permis les prélèvements d’échantillons sur leurs territoires ainsi que l’accès aux archives historiques.

Bibliographie

- ALESTALO J., 1971. Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia* 105 : 1-140.
- ARBELLAY E., STOFFEL M., BOLLSCHWEILER M., 2010. Dendrogeomorphic reconstruction of past debris-flow activity using injured broad-leaved trees. *Earth Surface Processes and Landforms* 35 : 399-406.
- ASTRADE L., BÉGIN Y., 1997. Tree-ring response of *Populus tremula* L. and *Quercus robur* L. to recent spring floods of the Saône river, France. *Ecoscience* : 4 (2) : 232-239.
- ASTRADE L., STOFFEL M., CORONA C., LOPEZ SAEZ J., 2012. L'utilisation des cernes de croissance des arbres pour l'étude des événements et des changements morphologiques : intérêts, méthodes et apports des recherches alpines à la dendrogéomorphologie. *Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement* 3 : 295–316.
- BOLLSCHWEILER M., 2007. Spatial and temporal occurrence of past debris flows in the Valais Alps – results from tree-ring analysis. Université de Fribourg.
- BOLLSCHWEILER M., STOFFEL M., 2007. Debris flows on forested cones — reconstruction and comparison of frequencies in two catchments in Val Ferret, Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 7 : 207-218.
- BOLLSCHWEILER M., STOFFEL M., EHMISCH M., MONBARON M., 2007.- Reconstructing spatio-temporal patterns of debris-flow activity using dendrogeomorphological methods. *Geomorphology* 87 : 337-351.
- BOLLSCHWEILER M., STOFFEL M., SCHNEUWLY D.M., 2008. Dynamics in debris-flow activity on a forested cone — a case study using different dendroecological approaches. *Catena* 72 : 67-78.
- BRYANT C.L., BUTLER D.R., VITEK J.D., 1989. A statistical analysis of tree-ring dating in conjunction with snow avalanches: comparison of on-path versus off-path responses. *Environmental Geology and Water Sciences* 14 : 53-59.
- CORONA C., ROVÉRA G., LOPEZ SAEZ J., Stoffel M., PERFETTINI P., 2010. Spatio-temporal reconstruction of snow avalanche activity using tree rings: Pierres Jean Jeanne avalanche talus, Massif de l'Oisans, France. *Catena* 83 : 107-118.
- HOGREL L., MAGDINIER R., 2001. Dynamique torrentielle du torrent des Glacières en vue d'une exploitation raisonnée des matériaux, Granulats Rhône Alpes, Matser 1 Université de Savoie, 45 p.
- LOPEZ SAEZ J., 2011. Reconstruction de l'activité des glissements de terrain au moyen d'une approche dendrogéomorphologique (Moyenne vallée de l'Ubaye, Alpes de Haute Provence, France). Thèse Doctorat Géographie, Université de Grenoble.
- LOPEZ SAEZ J., CORONA C., Stoffel M., GOTTELAND A., BERGER F., LIÉBAULT F., 2011. Debris-flow activity in abandoned channels of the Manival torrent reconstructed with LiDAR and tree-ring data. *Natural Hazards and Earth System Science* 11 : 1247-1257.
- MAY C.L., GRESSWELL R.E., 2004. Spatial and temporal patterns of debris-flow deposition in the Oregon Coast Range, USA. *Geomorphology* 57 : 135-149.
- PROCTER E., STOFFEL M., SCHNEUWLY-BOLLSCHWEILER M., NEUMANN M., 2012. Exploring debris-flow history and process

- 
- dynamics using an integrative approach on a dolomitic cone in western Austria. *Earth Surface Processes and Landforms* 37 : 913-922.
- SHRODER J., 1978. Dendrogeomorphological analysis of mass movement on Table Cliffs Plateau, Utah. *Quaternary Research* 9 : 168-185.
- SHRODER J.F. 1980. Dendrogeomorphology: Review and new techniques of tree-ring dating. *Progress in Physical Geography* 4 : 161-188.
- STEFANINI M., 2004. Spatio-temporal analysis of a complex landslide in the northern Apennines (Italy) by means of dendrochronology. *Geomorphology* 63 : 191-202.
- STOFFEL M., 2008. Dating past geomorphic processes with tangential rows of traumatic resin ducts. *Dendrochronologia* 26 : 53-60.
- STOFFEL M., LIÈVRE I., CONUS D., GRICHTING M.A., RAETZO H., GÄRTNER H.W., MONBARON M., 2005. 400 years of debris flow activity and triggering weather conditions: Ritigraben VS, Switzerland . *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 37(3) : 387-395.
- STOFFEL M., 2010. Magnitude–frequency relationships of debris flows—a case study based on field surveys and tree-ring records. *Geomorphology* 116 : 67-76.
- STOFFEL M., BOLLSCHWEILER M., 2008. Tree-ring analysis in natural hazards research—an overview. *Natural Hazards and Earth System Science* 8 : 187-202.
- STOFFEL M., BOLLSCHWEILER M., 2009. Tree ring reconstruction of past debris flows based on a small number of samples – Possibilities and limitations. *Landslides* 6 : 225-230.
- STOFFEL M., WILFORD D.J., 2012. Hydrogeomorphic processes and vegetation: disturbance, process histories, dependencies and interactions. *Earth Surface Processes and Landforms* 37 : 9-22.



La Réserve Naturelle du Luitel, ou l'autobiographie de la Nature

Résumé

L'étude pluridisciplinaire des archives palustres et lacustres de la Réserve Naturelle du Luitel a permis de reconstituer les dynamiques passées des écosystèmes lacustres, tourbeux et forestiers de la zone d'étude. Les résultats ont montré que les paysages ont considérablement varié depuis la fin de la dernière glaciation. Ainsi, avec le retour des essences ligneuses pionnières, puis forestières, les communautés d'Insectes ont également rapidement recolonisé l'environnement, avec parfois une grande abondance d'espèces il y a environ 10 000 ans, et aujourd'hui rares en Isère. Enfin, l'étude géochimique en haute résolution a également mis en évidence des variations d'éléments atmosphériques (piégés par la sédimentation) témoignant d'activités humaines anciennes, depuis l'Antiquité jusqu'à nos jours. Les pollutions industrielles du XX^e siècle (liées notamment aux industries grenobloises) ont été particulièrement bien enregistrées dans les sédiments lacustres du Luitel.

Introduction

La Réserve Naturelle du Lac Luitel a soufflé son 50^e anniversaire en 2011. Située au niveau du Col Luitel, au sud du Massif de Belledonne (Figure 1), elle cache néanmoins son âge véritable sous les couches sédimentaires qui reposent au fond du lac et sous la surface de la tourbière. Façonnée par les retraits d'un diverticule du glacier de la Romanche, la zone du Luitel abrite depuis environ 15 000 ans, deux zones humides témoignant de la reconquête des paysages par les écosystèmes depuis la dernière déglaciation. Grâce à une amélioration rapide du climat, les Alpes sont progressivement réinvesties par des communautés herbacées d'abord steppiques, puis sont progressivement remplacées par des landes arbustives, puis de véritables boisements pionniers, cédant finalement la place à des forêts méso-thermophiles au

**Frédéric Guiter, Philippe Ponel, Yoann Poher,
Elodie Brisset, Cécile Miramont, Jacques-
Louis de Beaulieu**

*Institut Méditerranéen de Biodiversité et
d'Ecologie marine et continentale (IMBE),
Aix-Marseille Université (AMU)
Europôle Méditerranéen de l'Arbois BP 80 13545
Aix-en-Provence Cedex 4, France
(www.imbe.fr)*

Stéphane Guédron, Laurent Charlet

*ISTerre BP 53 38041 Grenoble Cedex 9, France
(www.isterre.fr)*

Pierre Sabatier

*Laboratoire EDYTEM « Pôle Montagne »
F-73376 Le Bourget du Lac Cedex
France(edytem.univ-savoie.fr)*

Eric Hustache

*Maison de l'intercommunalité 05140 Aspres sur
Buëch*

Carole Desplanque

*ONF Isère 9 Quai Créqui
38026 Grenoble Cedex 1
(<http://www.reserves-naturelles.org/lac-luitel>)*

cours de l'Interglaciaire actuel appelé Holocène (environ de – 10 000 ans à nos jours). Mais cette histoire (brièvement résumée ici) n'a pas eu lieu sans accident, sans soubresaut : entre les nombreux caprices du climat et les activités humaines pluriséculaires, la végétation et les animaux associés (notamment les insectes) n'ont cessé de s'adapter, migrer voire disparaître des paysages, avec des dynamiques écologiques complexes et parfois très rapides.

Grâce au financement en 2011 du Pôle Département de Biodiversité de l'Isère et de la Réserve Naturelle du Luitel, une étude en haute résolution temporelle de ces dynamiques a pu être menée à Luitel, en incluant des analyses palynologiques (étude des spores et des pollens fossiles) paléoentomologiques (étude des insectes fossiles) et géochimiques (étude des variations des composants chimiques du sédiment). Ainsi, le but de cette approche était de (1) reconstituer l'histoire et la dynamique de la biodiversité végétale et entomologique sur la tourbière et autour du col Luitel depuis la dernière déglaciation ; (2) comprendre les interactions passées entre l'homme, le milieu et le climat à l'échelle du bassin versant, et (3) estimer les changements géochimiques dans les sédiments palustres et lacustres, liées aux activités humaines, depuis les plus anciennes (au Néolithique) jusqu'aux périodes les plus récentes.

2. La zone d'étude. Les prélèvements

Le carottage de la tourbière du Col Luitel a eu lieu sur la zone préalablement identifiée comme la plus favorable par imagerie géophysique (menée lors d'études antérieures par S. Garambois, UJF, Grenoble) : ainsi, plus de 10,5 m de remplissage palustre et paléo-lacustre ont été prélevés (Figure 3). Le point de carottage sur le lac a également été choisi à proximité de l'ombilic, pour atteindre la zone de prélèvement la plus favorable (la plus épaisse). Il n'a pas été possible d'atteindre le substratum encaissant.

2a) Principe et modalités du carottage

Afin d'obtenir des enregistrements sédimentaires et paléoécologiques adaptés pour notre étude, des carottages manuels ont été menés. Ils consistent à prélever au moyen d'un carottier dit « russe » des sections de sédiments de 1 mètre (Figure 2). Ce système éprouvé permet de récolter des profils sédimentaires au moyen d'un compartiment semi-cylindrique (et refermable par clapet amovible) enfoncé par pression. Le clapet est refermé systématiquement sur le prélèvement de carotte afin d'éviter toute pollution par la remontée dans les niveaux tourbeux supérieurs (plus récents). Ainsi, grâce à une série de rallonges métalliques, il est possible de prélever avec précision jusqu'à

20 m de carottes (en continu) sur l'ensemble des remplissages depuis les faciès tourbeux et paléo-lacustres, jusqu'aux faciès argileux contemporains de la déglaciation sensu lato.

Deux campagnes de carottage ont été menées :

- La tourbière et le bord du lac ont été échantillonnés en novembre 2011

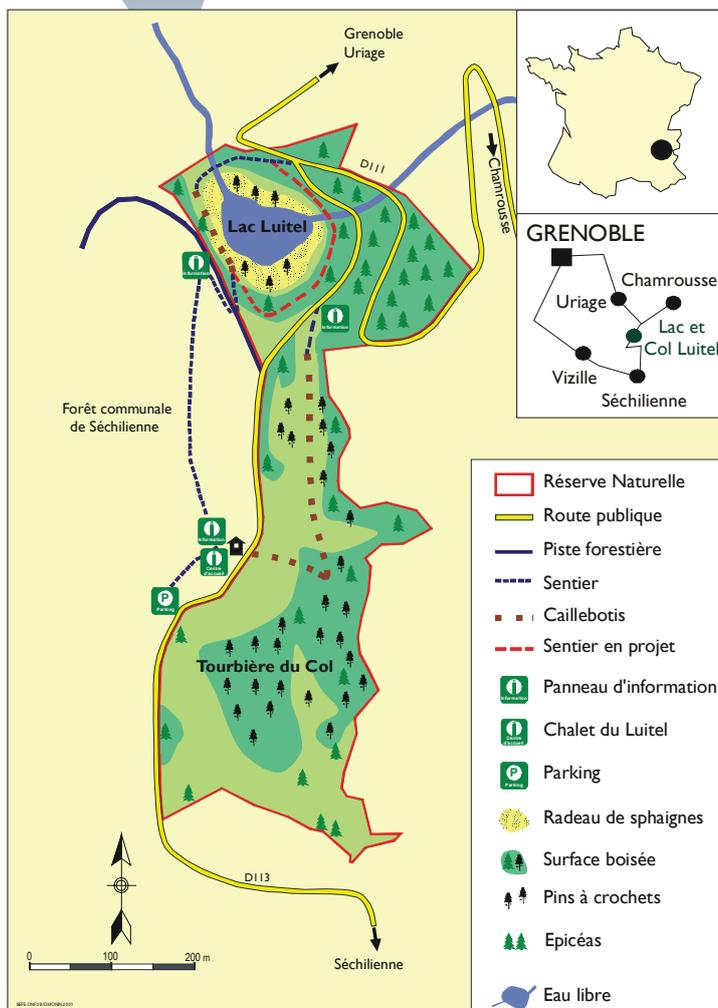


Figure 1 : carte simplifiée de la réserve naturelle du lac Luitel (desplanque, 2001)

– Un profil sédimentaire a été prélevé dans le lac en mars 2012, lorsque la surface du lac était gelée, permettant ainsi un prélèvement en position centrale « à pied sec » (Figure 4).

Chaque carotte a été soigneusement emballée hermétiquement. Afin que chaque discipline dispose de matériel suffisant pour les analyses, le profil principal a été triplé, et des profils annexes (moins profonds) ont été prélevés comme archives. Tous les profils ont été échantillonnés côte à côte afin que la corrélation par la profondeur soit facilitée pour l'ensemble des analyses (Figure 3).

2b) Profils prélevés

Une des particularités de la Réserve réside dans le fait qu'elle contient à la fois un lac et une tourbière: ainsi, sur un périmètre réduit, on observe deux zones humides autrefois lacustres, dont une s'est comblée alors que l'autre est restée lacustre (en raison d'un contexte géomorphologique différent). Il faut alors souligner que cette particularité de la Réserve constitue un atout car elle permet d'avoir accès à deux types d'archives sédimentaires complémentaires, et dont la résolution des enregistrements (notamment pour la géochimie) diffère. Initialement, le programme ne prévoyait que l'expertise de la tourbière (située sur le col) mais il nous est apparu pertinent de prélever l'archive sédimentaire lacustre, tout particulièrement pour la partie géochimique du projet (qui nécessitait une sédimentation plus fine que la tourbe) mais également afin d'étudier conjointement (à moyen terme) l'histoire paléoécologique du lac et de la tourbière. Compte tenu du temps d'analyses d'une telle double approche, l'expertise du contenu fossile du lac est encore en cours.

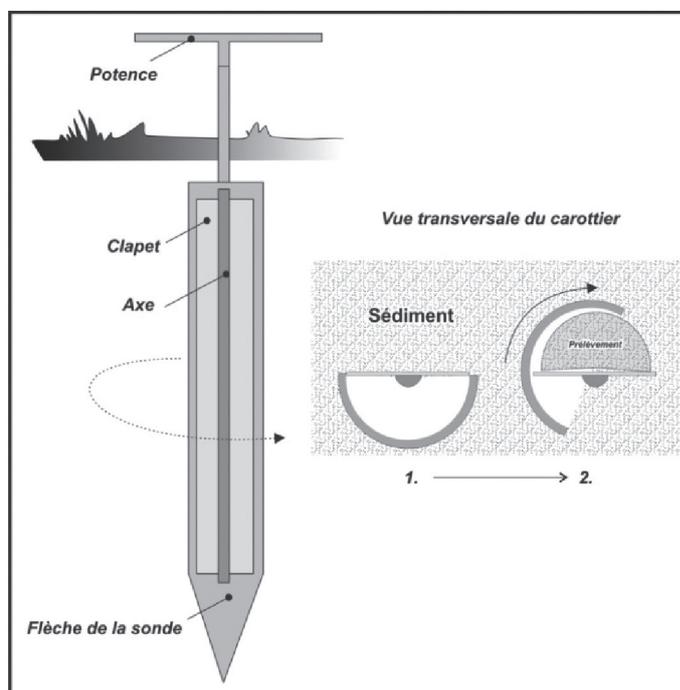


Figure 2 : schéma de fonctionnement du carottier russe



Prélèvements des profils tourbeux au col Luitel au moyen du carottier russe



Ouverture du carottier et observation du sédiment

Figure 3 : photographies du premier carottage effectuée sur la tourbière du col luitel en 2011

Sur la tourbière du Col

Dans la tourbière, 6 profils ont été prélevés (Figure 3). Le tableau ci-dessous (Table 1) résume les analyses menées et prévues (hors programme) par profil. Les profils C et E ont été peu ou pas perturbés par les échantillonnages en laboratoire et feront office d'archives (conservées en stockage réfrigéré) : ainsi toute analyse ultérieure ne nécessitera pas de carottage supplémentaire *a priori*.



Figure 4 : photographies des carottages lacustres effectués sur le lac luitel en 2012

Table 1 : récapitulatif des profils prélevés à la tourbière du col

	Luitel A	Luitel B	Luitel B2	Luitel C	Luitel D	Luitel E
Longueur du prélèvement	3 x 1100 cm	1048 cm	1050 cm	1100 cm	100 cm	650 cm
Expertise en cours	Paléontologie	Palynologie et datations	Palynologie et datations	Géochimie et archives	Géochimie	
« A moyen terme »	Datations	-	-	Palynologie	Palynologie	-

Au Lac Luitel

Le lac Luitel a fait l'objet de deux prélèvements, le premier en même temps que la tourbière en 2011 (fait sur le bord du lac) et le second au cours de la période hivernale (2012), ce qui a permis une campagne de carottage sur la surface gelée du plan d'eau (Figure 4). Le tableau ci-dessous (Table 2) résume les profils prélevés sur le bord tourbeux du lac (Luitel Lac 1 et 2) et au centre du lac (Luitel Lac 3) pour de prochaines analyses paléoécologiques.

Table 2 : liste de profils prélevés pendant la campagne hivernale

	Luitel Lac 1	Luitel Lac 2	Luitel Lac 3
Longueur du prélèvement	760 cm	(Profondeur estimée) 1160 cm	Environ 400 cm (hors tranche d'eau)
Expertise envisagées (hors PDB)	Paléontologie	Palynologie et datations	Paléoécologie, géochimie et datations

Un quatrième profil, fait en collaboration avec le laboratoire EDYTEM (P. Sabatier) de Chambéry a permis de prélever une carotte spécifiquement pour la géochimie grâce à un autre type de carottier (UWITEC¹ voir photographie de droite Figure 4).

⁽¹⁾ Voir <http://www.uwitec.at/html/frame.html>

3. Cadre Chronologique. Observation du sédiment

Toute reconstitution de l'histoire et des dynamiques passées des écosystèmes nécessite (a) la construction préalable d'un cadre chronologique solide, et (b) la caractérisation du sédiment qui livre les informations paléo-environnementales. En effet, les dynamiques passées des écosystèmes, ou encore les variations géochimiques retracées dans les sédiments prélevés ne peuvent être comprises (voire interprétées) qu'aux conditions suivantes :

- des datations doivent être disponibles pour différentes profondeurs des carottes,
- la nature du sédiment doit être définie, afin de mieux comprendre « l'histoire de la zone humide ».

Il existe plusieurs méthodes pour dater des sédiments, mais elles ne sont pas toutes applicables selon (a) la nature du sédiment et (b) la fenêtre temporelle considérée. Pour l'étude de Luitel, deux méthodes ont été employées.

3a) Cadre chronologique

Méthode par datations ¹⁴C

La nature très organique des sédiments prélevés dans la tourbière, et leur richesse en restes fossiles de plantes (aiguilles de sapins, branches, débris de bois) a permis de dater 9 niveaux de la carotte LuiB (voir Table 3) grâce à la méthode de datation par radiocarbone (¹⁴C) réalisée par le laboratoire Betanalytic Radiocarbon Dating, à Londres.

Table 3 : ages radiocarbone obtenus pour la tourbiere du luitel

code/profondeur échantillon	Age mesuré	Age conventionnel
LuiB 220-221	1390 +/- 30 BP	1400 +/- 30 BP
LuiB 325-326	2010 +/- 30 BP	2020 +/- 30 BP
LUIB-446-450	2880 +/- 30 BP	2900 +/- 30 BP
LUIB-614-616	4090 +/- 30 BP	4130 +/- 30 BP
LuiB 650-651	4630 +/- 30 BP	4650 +/- 30 BP
LuiB 748-749	6850 +/- 40 BP	6780 +/- 40 BP
LUIB-850-852	7550 +/- 40 BP	7560 +/- 40 BP
LUIB-955-957	9430 +/- 40 BP	9400 +/- 40 BP
LUIB-1020-1023	11830 +/- 50 BP	11850 +/- 50 BP

Cette méthode de datation nécessite une correction des âges obtenus (on parle de calibration).

Une fois ces âges radiocarbone calibrés et exprimés en années B.P (Before Present), une construction statistique peut être proposée afin d'établir une relation entre l'âge et la profondeur, de sorte que pour une profondeur donnée (et non datée) un âge soit extrapolé, à partir des datations obtenues dans le reste de la carotte. La Figure 5 illustre la relation graphique (ou modèle âge/profondeur prenant en compte l'erreur des mesures et le meilleur ajustement de la courbe).

Méthode par analyses des radioéléments ²¹⁰Pb et ¹³⁷Cs

Pour les périodes très récentes, la précision chronologique des âges obtenus par radiocarbone demeure insuffisante : il faut alors recourir

à une autre méthode mesurant des ratios isotopiques plomb/césium. Cette méthode a été employée pour le sédiment de surface prélevé dans le lac.

Sans entrer dans le détail de la méthode, l'analyse des radio-éléments (^{210}Pb et ^{137}Cs) a permis d'estimer un taux de sédimentation élevé dans le lac Luitel de l'ordre de $\sim 0.5\text{cm/an}$, et a permis de dresser une chronologie pertinente pour les 200 dernières années enregistrées dans le lac.

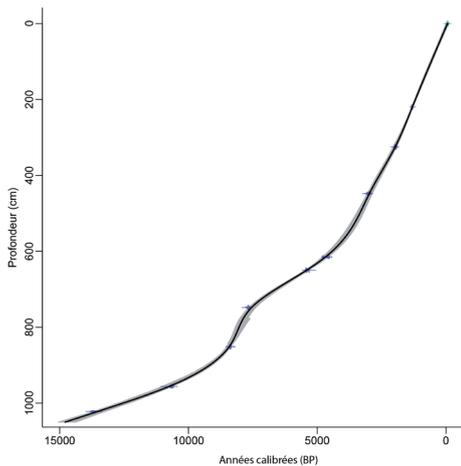
3b) Lithologie. Observation du sédiment

La caractérisation qualitative des profils prélevés permet de retracer la dynamique de la zone humide. Ainsi, la base de l'enregistrement est dominée par la gyttja : Il s'agit d'un sédiment très organique qui se dépose dans un environnement lacustre, donc sous une tranche d'eau, contrairement à la tourbe (issue de la croissance de la végétation hygrophile).

Ainsi, la lithologie présentée dans la Figure 6 permet de montrer qu'au Col Luitel se développait un lac (sans doute peu profond) entre environ - 15 000 ans et 4500 ans : ce lac était dominé, dans un premier temps par des apports détritiques (argile, puis gyttja argileuse) puis par une sédimentation plus calme, organique (gyttja, gyttja organique) Pendant cette période, de possibles phases d'assèchement ont pu se produire, comme en témoigne les passées tourbeuses vers 8200 ans et 7400 ans cal BP.

Ce n'est finalement que dans la seconde moitié de l'Holocène qu'une véritable tourbière s'est installée au Col.

La simple observation du sédiment est particulièrement instructive puisqu'elle illustre parfaitement le caractère dynamique de ces écosystèmes de montagne : cette évolution d'un lac en tourbière échappe le plus souvent à la perception humaine, mais elle doit cependant être gardée à l'esprit, notamment dans le cadre de la gestion de ces sites, dont le comblement soulève parfois bon nombre de questions. Ce point sera évoqué plus loin.



◆ densité de probabilité de la date calibrée

Figure 5 : modèle âge/profondeur obtenu par l'ajustement d'une courbe «smooth-spline». Ce graphique permet d'évaluer pour une profondeur donnée un âge (en abscisses)

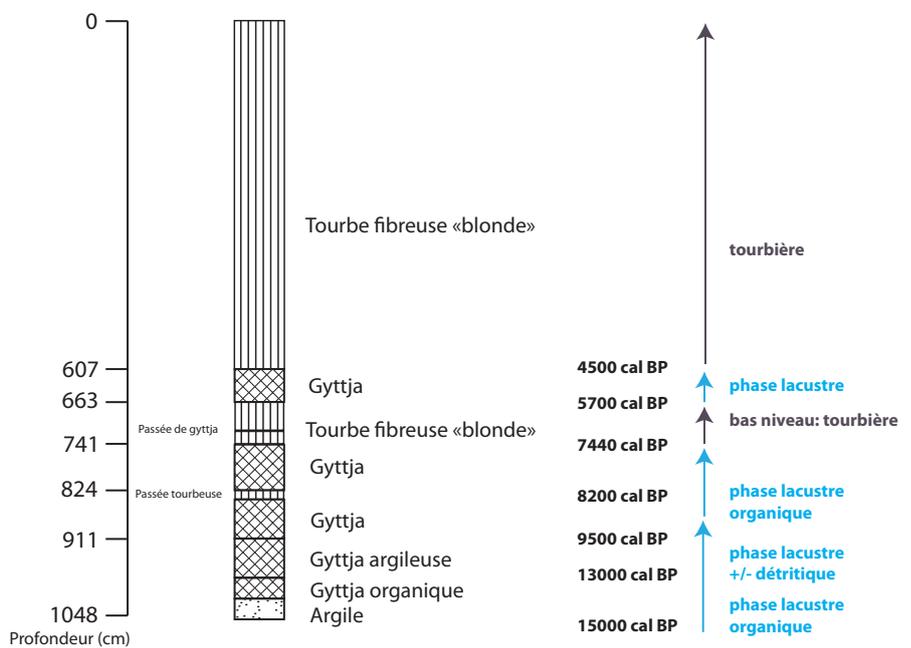


Figure 6 : lithologie synthétique des profils palustres prélevés à Luitel (luia et luib)

4. Histoire de la végétation

Au Luitel, deux études palynologiques pionnières ont été menées en 1952 par J. Becker, et en 1977 par S. Wegmüller. Grâce à ces travaux, nous savons que les zones humides du Luitel sont âgées d'au moins 13 000 ans. Les grandes étapes de la recolonisation de la région par la végétation (depuis le dernier retrait glaciaire) ont été brièvement décrites, mais elles manquaient cruellement de calage chronologique. Les profils prélevés en 2011, couvrent une période sensiblement plus importante puisque leur base a été datée à environ - 15 000 ans.

4a) Principes de l'analyse pollinique

Les prélèvements palynologiques sont effectués sur les carottes LuiB (tous les 1 cm de profondeur et à volume constant) en laboratoire (en milieu clos afin d'éviter toute pollution par la pluie pollinique actuelle). Les grains de pollen et de spores fossiles emprisonnés dans la matrice sédimentaire sont extraits par élimination des minéraux, fibres et matières organiques amorphes : cette élimination a lieu en laboratoire selon un protocole standardisé fondé sur des attaques physico-chimiques répétées et des centrifugations, avant filtration. Une fois l'extraction achevée, les résidus obtenus ont été montés entre lames et lamelles pour l'observation au microscope à objectif 500 mm (en immersion d'huile).

La reconnaissance des grains est facilitée par la consultation d'atlas photographiques et de lames microscopiques de référence (disponibles pour chaque espèce végétale d'Europe à l'IMBE). Après comptages et identifications des grains de pollen, les résultats sont convertis en pourcentages par rapport à la somme pollinique totale observée par échantillon². Ainsi, chaque spectre pollinique est ensuite représenté graphiquement dans l'ordre stratigraphique (selon la profondeur) au sein d'un diagramme pollinique. Il s'agit d'une représentation synthétique de l'évolution des pourcentages polliniques exprimés sous forme de courbes en fonction de la profondeur, donc du temps. Les pollens sont regroupés en trois grands groupes : les arbres et arbustes, les plantes herbacées à fleurs et les mousses, fougères ou algues.

Cette classification permet de visualiser rapidement l'importance du couvert forestier par rapport au tapis herbacé (pelouses, prairies). Le rapport entre le total des pollens arbres et le total des pollens d'herbacées (PA/PNA : Pollen Arboréen/Pollen Non Arboréen) est généralement représenté dans le diagramme (voir plus loin). Ce ratio facilite également l'interprétation paléoécologique, permettant d'évaluer l'ouverture (diminution du couvert d'arbres) ou la fermeture (densification des forêts) des écosystèmes au cours du temps. Il est également important de (1) replacer nos données dans le contexte paléoécologique général (décrit dans la littérature scientifique), mais également (2) de pondérer les interprétations en fonction de la productivité et de la dissémination des pollens pour chaque espèce (paramètres connus). Ainsi, le pin est généralement surreprésenté à l'inverse des genévriers. Dans la partie interprétative, il faut également prendre soin de distinguer les apports polliniques de la végétation locale, de celle qui se développait dans les basses vallées et dans la plaine iséroise. Certains pollens se dispersent plus facilement que d'autres par le vent, et sur de plus longues distances. Ce point est fondamental pour comprendre et décrypter un diagramme pollinique, tout particulièrement à partir d'une séquence tourbeuse où ? la végétation hygrophile (Cypéracées, etc.) peut dominer.

² L'ensemble des pourcentages des différents taxons observés par niveau constitue un « spectre pollinique ».

4b) Résultats. Interprétations

Commentaires généraux

Les 95 échantillons expertisés dans le cadre du programme sont caractérisés par une grande richesse floristique avec près de 48 300 grains de pollen et spores, répartis en 157 taxons. Le site de Luitel témoigne d'une importante « paléo-biodiversité » : pour exemple, ont été identifiés des grains de pollen de *Vaccinium*, dont on peut raisonnablement penser qu'il puisse s'agir de *Vaccinium oxycoccos*, *V. myrtillus*, *uliginosum* ou *vitis idaea* toutes présentes actuellement au Luitel.

Les résultats sont présentés sous la forme de plusieurs diagrammes polliniques distincts : il n'est pas possible de représenter l'évolution de l'ensemble des taxons sur un seul graphique lisible. Des diagrammes simplifiés sont donc présentés ci-après à titre d'exemple). Les courbes colorées représentent les fluctuations des pourcentages polliniques ; les lignes noires traduisent ces mêmes pourcentages mais multipliés par 5, le but étant de rendre plus lisible les fluctuations des fréquences faibles de certains taxons³. Les courbes polliniques sont tracées selon l'axe chronologique estimé par l'interpolation des âges (voir paragraphe sur le calage chronologique).

Les diagrammes documentent avec précision les dynamiques passées des formations végétales principales, et l'histoire des paysages à Luitel. Il faut également remarquer que le site a enregistré une forte biodiversité, notamment au niveau des herbacées : de plus, cette paléobiodiversité végétale est largement sous-estimée par l'analyse pollinique puisqu'il est souvent difficile de déterminer les grains de pollen au-delà du genre. Le diagramme ci-après (Figure 7) présente quelques espèces minoritaires quantitativement dans l'enregistrement mais dont la présence est remarquable.

Ainsi, on peut citer la présence de *Parnassia palustris*, *Drosera* (*D. rotundifolia* ou *D. longifolia* espèces protégées au niveau national), *Gentiana pneumonanthe*, ou encore plusieurs genres de caryophyllacées. Enfin signalons la présence de pollen de céréales (type pollinique « *Cerealia* ») qui sera interprétée dans les prochains paragraphes.

Dynamiques forestières à Luitel depuis environ 15000 ans : des paysages changeants

La Figure 8 permet, en premier lieu, d'illustrer l'histoire mouvementée de la végétation, à travers notamment l'évolution du couvert forestier à Luitel. Ainsi, même en regroupant les taxons sous la forme de courbes synthétiques, on observe sans peine l'extraordinaire dynamique du couvert forestier sur les 15 derniers millénaires, avec :

- le passage (entre – 15000 et – 11000 ans) de systèmes pré-forestiers à forestiers (marqués par les occurrences significatives d'*Hedera* pendant les optimums de la coudraie, de la chênaie et de la hêtraie-sapinière),
- puis vers des périodes plus récentes, une ouverture des milieux, probablement à toutes les altitudes, marquée par le recul de la hêtraie-sapinière, favorisant l'arrivée de *Picea* ; à plus basse altitude, *Juglans*, implanté par l'homme, se développe (repères 1 et 2 du diagramme).

On peut ainsi décrire l'histoire de la végétation selon l'axe chronologique, avec un découpage par périodes marquées par des successions originales de formations végétales.

(3) Plusieurs diagrammes du rapport comporte ces « lignes d'exagération par 5 » pour les espèces dont les effectifs sont très faibles.

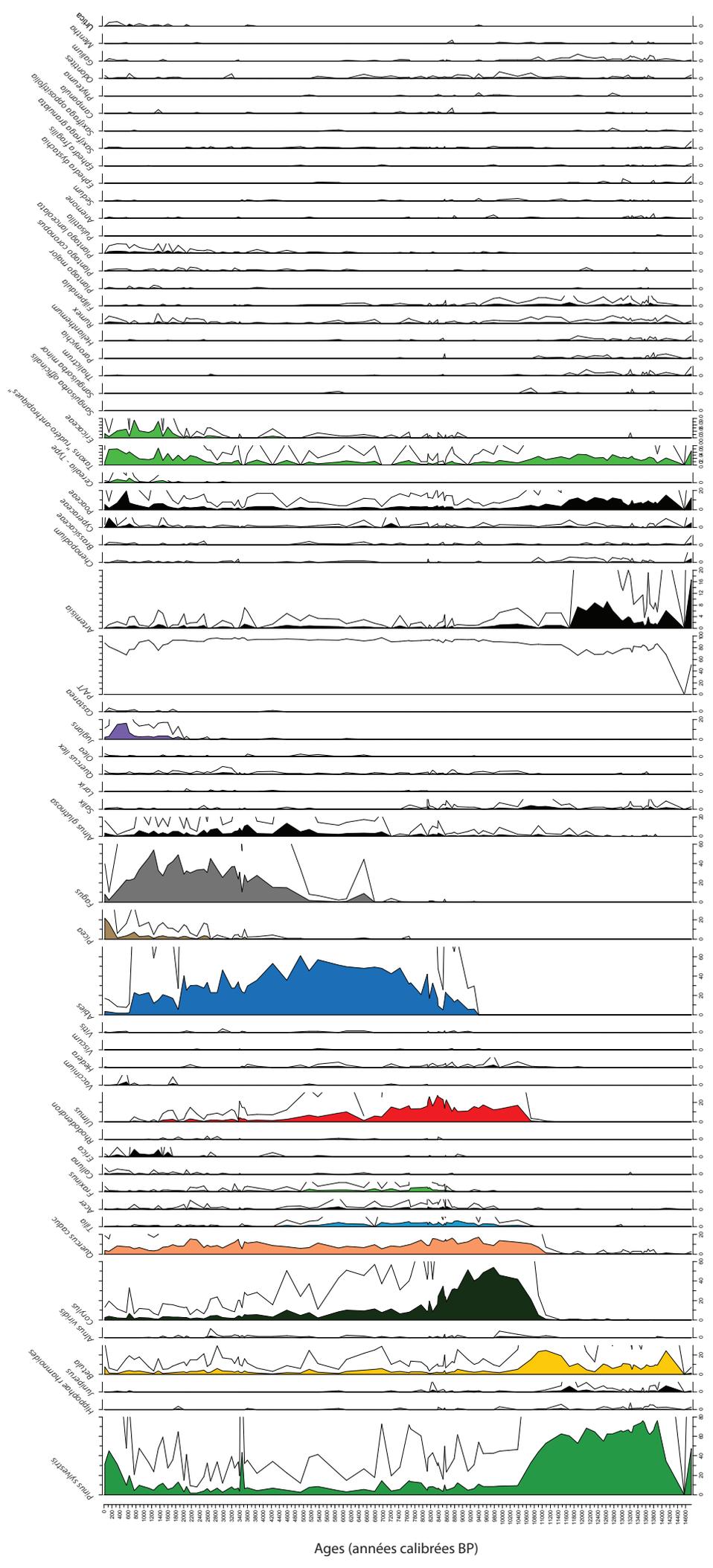


Figure 7: diagramme pollinique simplifié de quelques taxons herbacés observés à luitel (exprimes en ages)

Le Tardiglaciaire (– 15000 à – 11000 ans) : un paysage dominé par des pelouses herbacées steppiques puis une pinède à bouleaux

La base de l'enregistrement pollinique a livré un contenu pollinique d'abord dominé par des taxons herbacés steppiques tels qu'*Artemisia*, *Helianthemum*, les *Chenopodiaceae*, les *Caryophyllaceae* et les *Poaceae*, puis rapidement supplantés par une lande arbustive à bouleaux, genévriers (les taux de *Juniperus* sont faibles mais significatifs entre 14500 et 14000 ans BP, voir [B] Figure 9), à son tour remplacée par une pinède. Cette dynamique est caractéristique de la période tardiglaciaire, abondamment documentée dans les Alpes. A Luitel, la période du Dryas ancien (qui se termine vers 14700 ans) ne semble pas enregistrée si ce n'est peut-être par l'échantillon à la base (dominé par *Artemisia* voir [A] Figure 9). A l'exception de ce niveau, l'histoire de la tourbière débute donc au Bölling/Alleröd (environ 14500-12800 BP), une période marquée par un réchauffement général du climat (à l'échelle mondiale) qui a favorisé la recolonisation forestière d'abord par *Betula*, puis *Pinus* (voir [C] Figure 9) des paysages dénudés lors de la dernière glaciation.

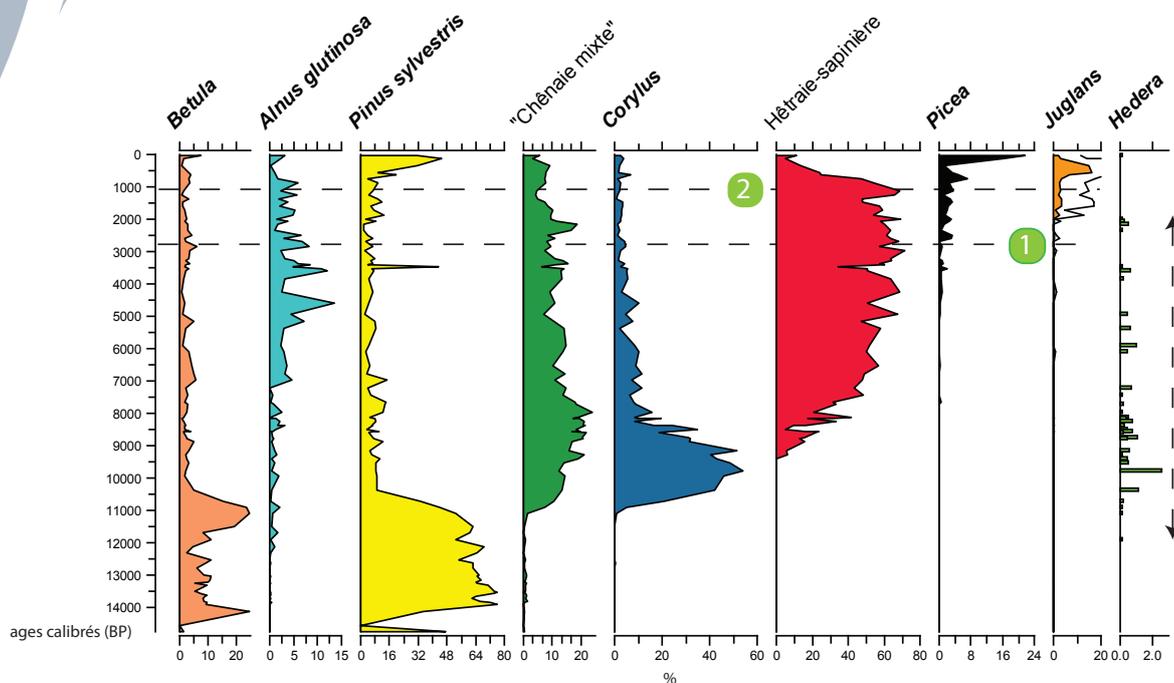
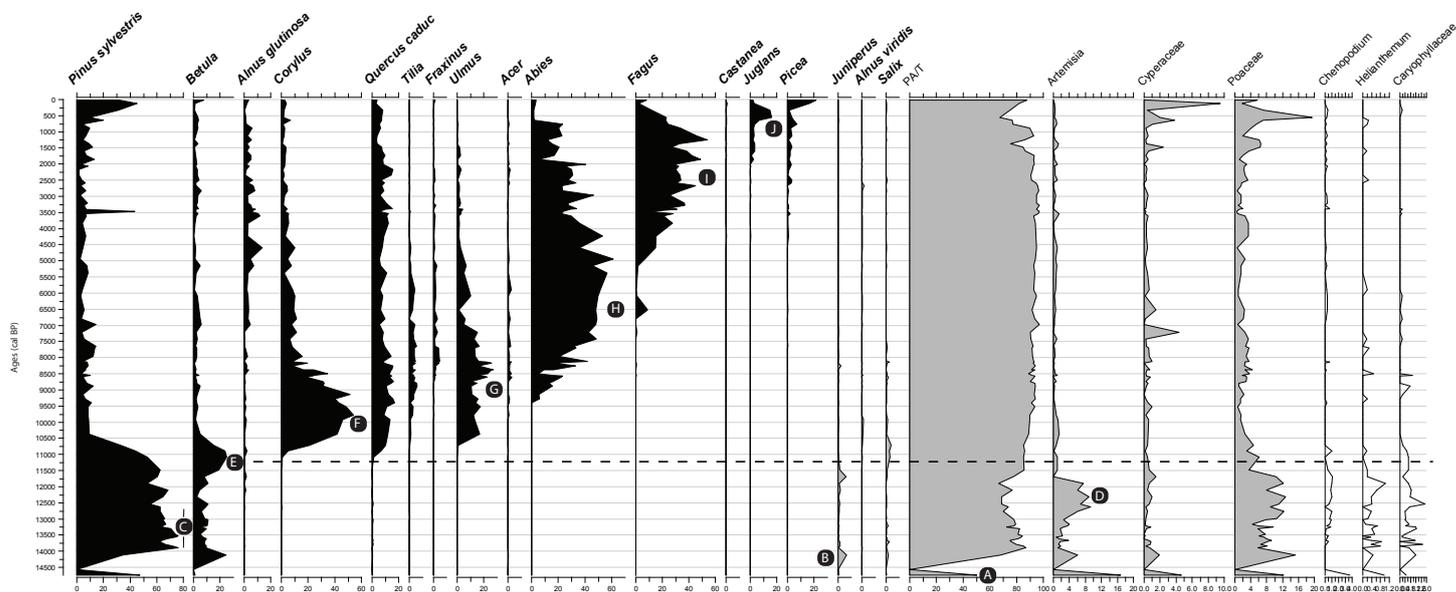


Figure 8 : diagramme pollinique simplifié des principales formations forestières (la courbe de la hêtre-sapinière regroupe la somme des pourcentages d'abies et de fagus ; la courbe de la chenaie mixte regroupe la somme des pourcentages de quercus «decidus »

Mais vers 12800 cal BP, un épisode mondial de froid a lieu brutalement, au cours duquel des glaciers ont pu réavancer et les paysages forestiers (notamment dans l'hémisphère nord) ont profondément régressé. A Luitel, cette crise climatique se manifeste nettement par un retour à une végétation steppique herbacée rase, notamment dominée par *Artemisia*, associée à des *Poaceae* principalement (voir [D] Figure 9). Il est très probable qu'à cette période, la pinède ait régressé, même si les fréquences du pin n'ont pas fortement diminué : *Pinus* est un fort producteur et disséminateur, dont le pollen peut avoir une signification plus régionale (et donc lointaine). Cet épisode, qui précède le réchauffement climatique général (appelé Holocène, dont le début est symbolisé en pointillé sur la Figure 9, et qui se poursuit aujourd'hui) est appelé Dryas récent. Vers la fin de cette pulsation climatique froide, une amélioration climatique débute, permettant ainsi le retour momentané de boulaies (voir [E] Figure 9) autour de la zone humide.



De – 11000 à – 9000 ans : des boisements pionniers à noisetiers

L'amélioration générale du climat au début de l'Holocène se manifeste à Luitel de manière spectaculaire avec un développement très rapide de *Corylus* (voir [F]), atteignant rapidement un optimum entre 10000 et 9000 cal BP. Cette expansion de la coudraie s'accompagne du développement à plus basse altitude de la chênaie mixte (*Quercus décidu*, *Fraxinus*, *Tilia*, *Acer*, etc.). Notons également qu'une ormaie, probablement locale (ce point sera discuté plus loin) se développe au début de l'Holocène, et connaît à son tour un optimum vers 8500 ans cal BP (voir [G] Figure 9). Cet élément de la dynamique forestière holocène est connu dans les Alpes du Nord, mais cette phase est particulièrement bien enregistrée à Luitel.

Il est probable que cette ormaie ait été relativement dense, en mélange avec le noisetier. Cela pose alors la question de la disparition de ce type de boisements dans les Alpes, et plus largement en Europe. De nombreuses études ont soulevé cette question, proposant des hypothèses de compétitions interspécifiques, ou de maladies spécifiques à l'orme, comme la graphiose. Enfin, il existe actuellement un coléoptère se nourrissant du feuillage des ormes, et dont la pullulation peut affaiblir ces arbres : l'étude paléontomologique a montré que cet insecte était présent à Luitel (voir plus loin).

De – 9000 à – 5000 ans : la sapinière règne en maître

A partir de 9000 cal BP, alors que les taux de noisetier diminuent fortement, puis ensuite ceux d'*Ulmus*, apparaissent les premières occurrences du sapin (voir (H) Figure 9). D'abord présent de manière discrète, il atteint ses valeurs optimales en moins de 1500 ans pour devenir l'essence forestière dominante.

L'analyse du sédiment à la binoculaire a montré une très grande accumulation d'aiguilles d'*Abies alba* pendant toute la phase dominée par le sapin : une sapinière très dense était donc présente localement, dans la réserve de Luitel. Cette prédominance du sapin va durer près de 3000 ans environ, jusqu'à l'arrivée du hêtre. On parle d'optimum forestier (attribué dans la littérature scientifique à la période atlantique) centré autour de 6000-6500 cal BP, et lié à un optimum climatique chaud et humide enregistré partout en Europe. L'altitude favorable de Luitel explique également (pour partie) le fort développement, puis la prédominance d'*Abies* dans le paysage montagnard.

Figure 9: diagramme pollinique simplifié des principaux taxons

De –5000 à – 1000 ans : l'arrivée du hêtre, un compétiteur du sapin

A partir de 5000 ans, jusqu'au Moyen Age environ, la sapinière régresse progressivement au profit du hêtre, un fort compétiteur. De nombreuses études paléoécologiques et biogéographiques ont démontré que *Fagus* a migré depuis des refuges en Europe de l'est (Roumanie, Balkans, etc.) où il est demeuré à l'abri des épisodes glaciaires entre – 90 000 ans et – 15 000 ans. Puis, avec le réchauffement climatique holocène, cette espèce a progressivement recolonisé l'arc alpin : à Luitel, le début de la courbe continue de *Fagus* est daté d'environ 4800 ans.

Il s'est rapidement développé en mélange dans la sapinière, devenant par conséquent la « classique » hêtraie-sapinière de l'étage montagnard. Les courbes polliniques témoignent de la compétition interspécifique entre *Abies* et *Fagus* : ainsi, on peut remarquer qu'à partir de 2500 ans environ, le hêtre devient dominant au détriment du sapin (ce point sera discuté plus loin). Pendant toute cette période (appelée généralement Subboréal), la chênaie mixte⁴ semble se maintenir à plus basse altitude.

De l'an mille à nos jours : la destruction des écosystèmes forestiers et l'apparition des pessières

La fin de la séquence tourbeuse de Luitel témoigne des premières perturbations importantes des écosystèmes du bassin versant : en effet, l'ensemble des taxons arboréens, à l'exception de *Pinus sylvestris*, *Juglans* et *Picea abies*, diminuent fortement. Ainsi, on remarque qu'antérieurement à l'apparition des courbes continues de *Picea* et de *Juglans* (repère 1 de la Figure 8), les formations forestières présentes autour de la tourbière (hêtraie-sapinière) mais également plus aval (chênaie mixte) étaient très bien représentées dans la pluie pollinique : on peut de plus observer la présence significative du pollen d'*Hedera* (double flèche de la Figure 8) pendant cet « optimum des forêts » entre 10000 et 2800 ans environ. Le pollen de lierre (classiquement interprété comme un marqueur forestier typique) témoigne à Luitel assurément de la maturité du couvert forestier local. Or ces occurrences d'*Hedera* cessent après 1000 BP ; de manière synchrone avec la chute de la hêtraie-sapinière qui finalement tend à disparaître vers la période actuelle. Cette dernière est alors remplacée par *Picea abies* et *Pinus sylvestris*, recolonisant très rapidement les versants en moins de 500 ans ! Cet épisode de dégradation des forêts est contemporain (à l'erreur près du modèle d'âge) du Moyen Age : l'action humaine est sans conteste un des moteurs de ce changement de végétation.

5. Etude paléontomologique. Evolution de la biodiversité des insectes

5.a) Principes de la paléontologie

En raison de la nature particulièrement robuste de leur exosquelette, les Coléoptères sont très largement dominants dans les assemblages fossiles. Ils ne sont toutefois pas le seul ordre d'insectes présent dans les sédiments quaternaires. Il est ainsi fréquent de rencontrer des fragments bien conservés d'Hétéroptères, d'Hyménoptères (surtout de Formicidae), de Mégaloptères (*Sialis*), de Diptères (essentiellement des capsules céphaliques de larves de Chironomidae), de Trichoptères (diverses pièces bien chitinisées de larves). Cependant les Coléoptères sont presque toujours, et de loin, l'élément dominant.

⁴⁾ Cette chênaie semble moins diversifiée comme en témoigne la raréfaction des pollens de *Fraxinus*, *Acer* ou encore *Tilia*, à partir de 5500 ans

La première étape en laboratoire conduit à séparer et concentrer les restes d'insectes contenus dans les différents échantillons au moyen d'une technique simple qui consiste à déliter et à désagréger le sédiment sous l'eau puis à éliminer les particules fines par criblage sur un tamis calibré de maille 300 µm. Le refus du tamis, qui contient un mélange de débris végétaux et d'insectes, est alors placé dans un autre récipient et incorporé à du pétrole. L'excès de pétrole est récupéré, puis de l'eau est ajoutée en quantité suffisante dans le récipient pour permettre une séparation par décantation des différentes fractions. Après quelques minutes, les débris d'insectes, enduits sélectivement d'un film de pétrole, vont flotter à la surface tandis que la majorité des débris végétaux coulent au fond du récipient. Il ne reste plus qu'à verser délicatement la fraction flottante dans le même tamis de 300 µm, à éliminer les résidus de pétrole au moyen d'un détergent, puis à procéder à un dernier tri manuel, à la pince fine sous loupe binoculaire, pour obtenir une séparation parfaite des restes d'insectes fossiles. Les fragments d'insectes stockés en alcool dans des tubes de verre peuvent se conserver sur de très longues périodes.

L'identification des insectes fossiles quaternaires n'est pas fondamentalement différente de celle des insectes actuels. Le principal obstacle pratique réside dans l'impossibilité d'utiliser les clés de détermination proposées par les ouvrages usuels de systématique, qui sont établies pour l'identification d'insectes complets. En effet, les fragments fossiles se présentent toujours sous forme de pièces désarticulées et isolées, puisque les muscles et les ligaments ont disparu, décomposés lors du processus de fossilisation. Des travaux bien illustrés peuvent servir à une première approche, en particulier les révisions de genres accompagnées de photos au microscope à balayage. Toutefois pour une identification plus précise, il est indispensable d'avoir accès à une collection de référence la plus complète possible et de pouvoir comparer soigneusement les fossiles avec des spécimens de référence actuels.

Les carottes sédimentaires de Luitel A ont été découpées en section de 5 à 10 cm environ.

5b) Résultats. Interprétations

La carotte Luitel A a été traitée dans sa totalité, mais les insectes ne sont conservés que dans la tranche 670 cm à 1000 cm, au-delà du niveau 670 cm les fragments sont trop rares et en trop mauvais état de préservation pour permettre une interprétation pertinente. Ces problèmes sont récurrents en paléoécologie : les processus taphonomiques (enfouissement et conservation des fossiles) diffèrent d'un objet biologique à l'autre. Cela souligne clairement la nécessité de mener ce type de recherche en multidisciplinarité.

Les fossiles peuvent être regroupés en 86 taxons d'Arthropodes appartenant à 33 familles. Il faut souligner que d'une manière générale, les Coléoptères dominent les assemblages avec 76 taxons.

Le reste inclut les taxons représentant au sein des Insecta les ordres de *Diptera*, *Heteroptera*, *Hymenoptera*, *Megaloptera* et *Trichoptera*.

Au cours de cette étude, 41% des taxons de Coléoptères ont été identifiés jusqu'à l'espèce, 86% l'ont été jusqu'au genre. Au sein des Coleoptera, les familles les plus représentées sont les *Curculionidae* et les *Staphylinidae* (18%), les *Chrysomelidae* (13%), les autres, ne représentant pas plus de 5% des taxons.

Il n'est pas possible de tout présenter ici ; seules les dynamiques

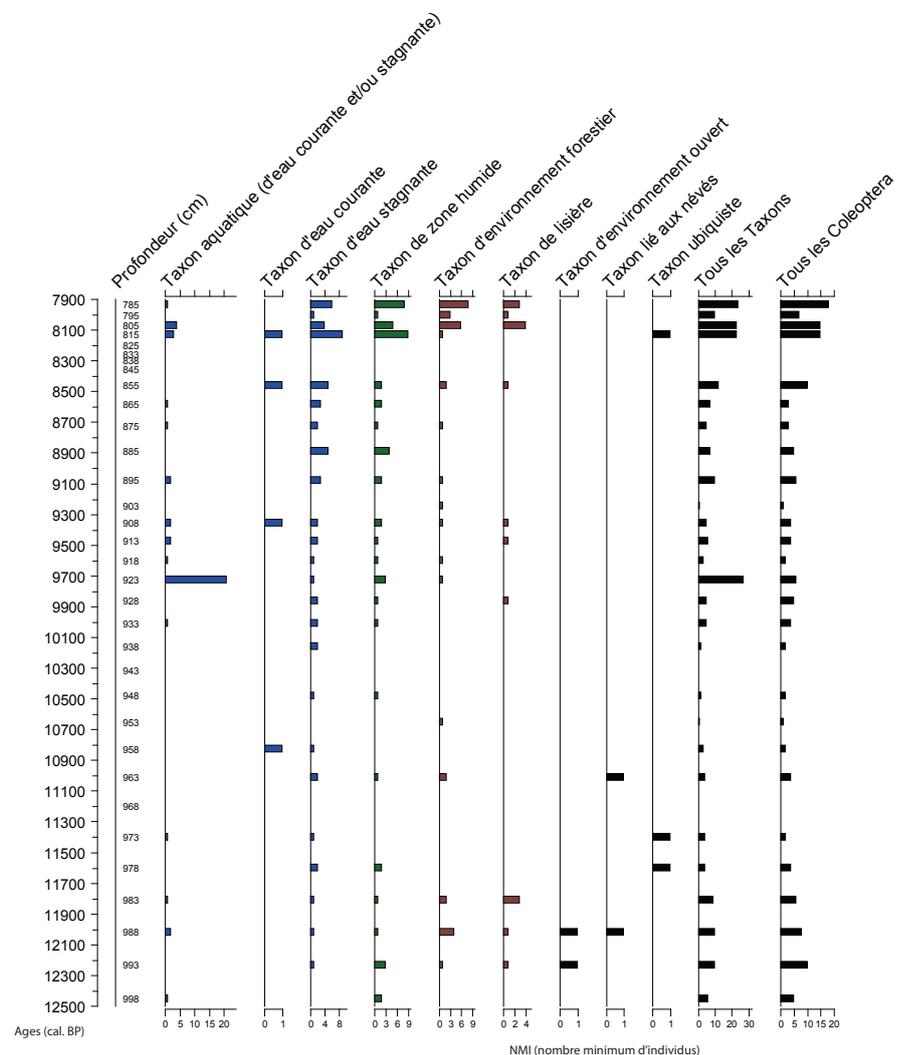
des principaux groupes écologiques sont présentées dans la Figure 10 ; ainsi nous discuterons des successions d'assemblages. Des photographies de quelques espèces emblématiques de la séquence sont présentées plus loin.

Grands traits de l'évolution des assemblages d'insectes

Seule la tranche sédimentaire 780-1000 m a fourni des assemblages d'insectes exploitables sur le plan paléoenvironnemental. Par chance cette section correspond à une période de transition écologique majeure qui marque le début de l'Holocène. La Figure 10 montre que sur le profil étudié, les assemblages d'insectes sont écologiquement diversifiés : il n'y a pas prédominance d'une catégorie écologique au détriment d'une autre, ce qui suggère l'absence de biais dans la fossilisation des assemblages.

Les insectes aquatiques

Il n'y a pas une représentation excessive des aquatiques, comme on pourrait s'y attendre dans un site d'origine lacustre. Les aquatiques d'eau courante sont représentés sporadiquement, mais surtout dans la moitié supérieure de la partie fossilifère de la séquence. Ceci suggère la présence probable de petits cours d'eau tributaires alimentant l'ancien lac. La faiblesse des effectifs dénote soit un cours d'eau de longueur insuffisante pour entretenir une riche faune de rhéophiles, soit un éloignement de l'embouchure du ruisseau par rapport au point de prélèvement. Les aquatiques d'eau stagnante sont mieux répartis sur la séquence, avec toutefois une diversification dans la partie supérieure. Il



est possible que cette situation soit la conséquence d'un atterrissement progressif du lac et sa colonisation par une végétation d'hélophytes et de plantes aquatiques offrant une diversification des habitats pour les insectes aquatiques, qui sont toujours bien mieux représentés dans des lacs bordés d'une riche végétation. Un tel contexte présente l'intérêt de fournir une plus grande variété de ressources trophiques mais aussi un abri pour fuir les prédateurs.

Les insectes des zones humides

L'hypothèse précédente est confirmée par la diversification des insectes des zones humides dans la partie supérieure de la séquence. Comme pour les aquatiques il faut envisager la transformation progressive du lac en tourbière, qui entraîne la diversification des habitats et par conséquent la diversification de la faune associée aux milieux de transition, entre un contexte purement lacustre et une tourbière formée d'une mosaïque de parties émergées et de trous d'eau.

Les insectes forestiers / les insectes de milieux ouverts

La base de la séquence est marquée par la présence de Coléoptères associés aux milieux complètement ouverts, comparables à une prairie alpine. C'est en particulier le cas du Scarabéide *Aphodius abdominalis* (=mixtus) qui n'est présent que dans cette partie de la séquence. La présence (en très petit nombre toutefois) d'espèces associées aux névés dans le tiers inférieur de la séquence suggère que le site devait se trouver à cette époque assez proche de la limite supérieure des arbres, bien que l'hypothèse d'un transport occasionnel par le vent de ces insectes depuis les hautes altitudes ne soit pas à exclure, compte tenu des très faibles effectifs enregistrés.

On assiste clairement à la disparition totale des insectes de milieux ouverts et à une diversification de la faune forestière dans la partie supérieure de la séquence fossilifère avec surtout une diversification de la faune saproxylophage associée aux peuplements forestiers riches en vieux arbres, comportant du bois mort, des écorces déhiscentes, des champignons saproxyliques. Cette indication est intéressante car elle complète les informations tirées de l'analyse pollinique en renseignant sur la physionomie de la couverture forestière, qui n'est donc pas composée, à ce moment de l'évolution des paysages, de boisements pionniers clairsemés mais d'une véritable forêt mature. Les indications écologiques apportées par les Coléoptères associés à des essences forestières particulières concordent parfaitement avec les données polliniques.

Quelques espèces remarquables

*L'énigme de *Macrolea appendiculata**

La présence sur une bonne partie de la séquence de ce chrysomélide aquatique (Photographie 2) associé à *Potamogeton natans* est tout à fait remarquable car il s'agit d'une espèce très rarement observée en France et même considérée comme en voie de disparition. Il n'a jamais été observé dans le département de l'Isère. Cette situation a aussi été observée dans une séquence sédimentaire provenant de l'Aubrac, qui présente des occurrences régulières de *M. appendiculata* sur une bonne partie de l'Holocène. Ailleurs en France la détection de spécimens fossiles de cette espèce dans des contextes comparables est loin d'être exceptionnelle.

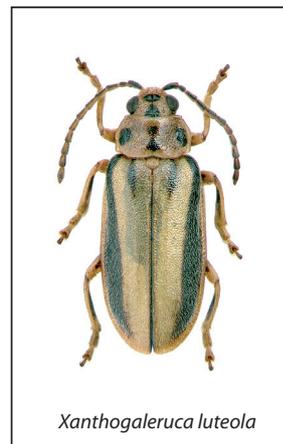
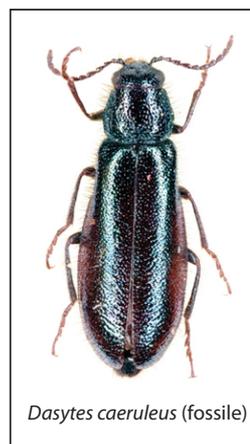
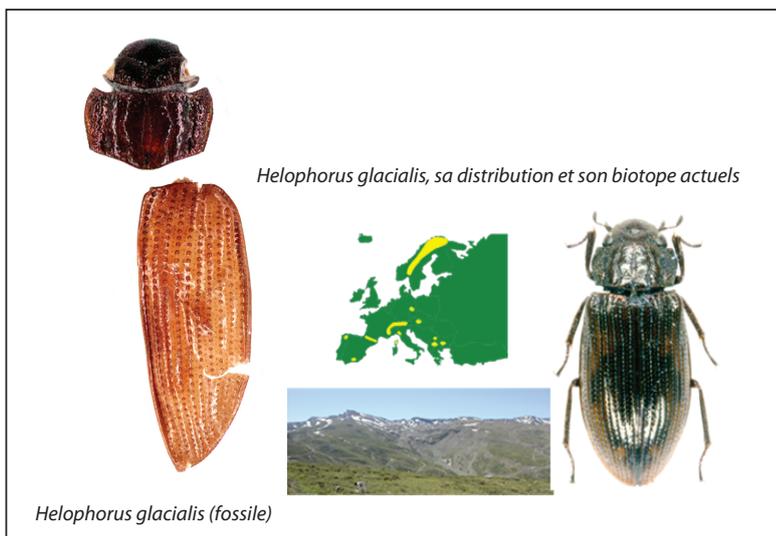
Comment interpréter ces données ? Plusieurs hypothèses peuvent être avancées. On peut imaginer que la découverte de spécimens vivants est

très exceptionnelle et fortuite car il s'agit d'un insecte amphibie passant la quasi-totalité de son existence sous l'eau, sa capture est donc le plus souvent le résultat de conditions particulières, accidentelles (rejet sur la berge dans des laisses d'étangs par exemple). Dans cette hypothèse la rareté de cette espèce ne serait qu'apparente. Une autre possibilité serait que cet insecte serait en voie de disparition pour des raisons encore inconnues: dégradation de la qualité des eaux, eutrophisation progressive, raréfaction de sa plante hôte, prédation accrue. Une extinction progressive d'un Coléoptère aquatique jadis abondant en France est déjà documentée pour le dytique géant *Dytiscus latissimus*. Cette espèce de taille exceptionnelle était abondante autrefois, au point qu'elle était occasionnellement utilisée pour l'alimentation d'animaux domestiques (canards). Elle s'est progressivement raréfiée jusqu'à disparaître totalement de notre pays, où aucune découverte n'a été effectuée depuis des dizaines d'années. Seules les données issues de vieilles collections attestent la présence passée de cet insecte en France. Il est actuellement encore assez bien représenté en Europe centrale, mais surtout dans les pays baltes et en Scandinavie. Les hypothèses pour expliquer une telle situation sont nombreuses mais aucune n'est pleinement satisfaisante, et il faut probablement envisager une conjonction de facteurs plutôt qu'un facteur unique. Cette hypothèse pourrait bien s'appliquer aussi au cas de *Macrolea appendiculata*.

La galéruque de l'orme Xanthogaleruca luteola (Photographie 1)

Cette chrysomèle associée à l'orme est détectée dans la séquence de Luitel exactement dans les niveaux correspondant au pic de pollen d'*Ulmus*, qui traduit un peuplement dense de cet arbre, comparable à une véritable forêt. Une telle formation ne semble pas présenter d'analogues actuels en Europe, et cette disparition de l'ormaine presque

Photographie 1 : quelques espèces remarquables observées à luitel



pure n'est pas clairement expliquée. L'hypothèse d'une épidémie a été évoquée. Quoiqu'il en soit, il est frappant de constater qu'actuellement les ormes sont dans une situation sanitaire précaire, puisqu'ils sont à la fois attaqués par divers Coléoptères, dont un scolyte qui est connu pour véhiculer un champignon pathogène capable de tuer l'arbre. Les spécimens affaiblis subissent de plus l'attaque spectaculaire de cette galéruque phyllophage *Xanthogaleruca luteola* qui peut parfois pulluler au point de dévorer complètement le feuillage en ne laissant subsister que les nervures des feuilles. On ne peut évidemment affirmer que l'apparition de la forêt d'orme de Luitel (puis sa disparition progressive) soit à attribuer aux mêmes facteurs, mais il s'agit cependant d'une observation qui mérite d'être soulignée. En effet, dans un contexte différent, les fluctuations au cours de l'Holocène de certains conifères canadiens ont été expliquées par des phases de pullulation d'insectes ravageurs, dont les restes ont été trouvés dans les sédiments au moment où le pollen de ces conifères commence à chuter.

Le bord du lac, profondeur - 15 m ; des sédiments plus anciens ?

Un échantillon unique a été prélevé et analysé à partir d'une carotte extraite des berges du lac dans un but exploratoire. Le petit assemblage de Coléoptères identifiés montre la présence d'*Helophorus glacialis*, un Coléoptère sténotope (Photographie 2) associé aux bords de névés, indicateur de conditions climatiques froides. Cet assemblage (non daté) pourrait être contemporain de la fin de la dernière glaciation. De nouveaux carottages pourraient être envisagés dans la berge du lac de façon à compléter l'enregistrement entomologique sur une période encore mal connue et non documenté dans la tourbière du Col, le début du Tardiglaciaire.

6. Etudes géochimiques des sédiments palustres et lacustres de Luitel

6a) Principes méthodologiques

L'objectif de ce travail était d'évaluer l'impact du climat et des activités passées de l'homme (activités pastorales, forestières, minières et industrielles) à travers l'évolution des concentrations de certains traceurs géochimiques dans les archives sédimentaires de la Réserve Naturelle du Luitel. Nous avons ainsi analysé (en haute résolution) les teneurs en métaux et métalloïdes enregistrés dans :

- un profil de tourbe prélevé au Col
- un profil lacustre,

Ces teneurs peuvent permettre :

- (1) de quantifier les flux naturels et/ou anthropiques de ces métaux
- (2) de caractériser des périodes d'érosion du bassin versant (apportant ces métaux)
- (3) d'identifier de possibles variations climatiques, marquées par des apports atmosphériques de ces éléments métalliques.

Pour effectuer ces reconstitutions paléo-géochimiques, nous nous sommes intéressés à des traceurs caractéristiques de l'érosion du bassin versant dits « terrigènes » n'ayant pas ou peu de source



Photographie 2 : *helophorus glacialis*, marqueur de climat «froid»

atmosphérique (la silice [Si], l'aluminium [Al], le fer [Fe] et les terres rares), des émissions atmosphériques naturelles, issus du dégazage des océans et de la croûte continentale: (le sélénium [Se], le brome [Br] et le mercure [Hg]), des émissions issues des activités anthropiques anciennes et récentes (agropastoralisme, feux industrie, automobile) (le plomb [Pb] et le mercure [Hg]), et enfin, des activités d'extraction de minerai, (le cuivre [Cu], le chrome [Cr], le plomb [Pb], le mercure [Hg], l'arsenic [As] et le cadmium [Cd]).

Seuls les éléments les plus significatifs ont été exploités par l'étude⁵. Par souci de simplification, seules les fluctuations du mercure, choisi comme élément central (car c'est un élément ubiquiste, présent dans tous les compartiments de l'environnement) seront détaillées dans l'article.

Les échantillons prélevés sur les profils à Luitel ont été analysés pour le mercure par absorption atomique (AMA 254) après décomposition par combustion (et pré-concentration du mercure par amalgamation). La carotte lacustre a également été échantillonnée pour le dosage des radio-éléments (²¹⁰Pb et ¹³⁷Cs pour obtenir le modèle d'âge) au LSM de Modane (collaboration avec P. Sabatier EDYTEM) permettant de dater la séquence. Après lyophilisation, des échantillons ont également été broyés en poudre fine (< 100 µm) pour les analyses chimiques « classiques » (éléments majeurs). Ces dernières ont été effectuées après minéralisation des poudres (HNO₃, H₂O₂ et HF) sur plaques chauffantes à 120°C. Les analyses chimiques des éléments traces ont

été effectuées par ICP-AES et des ultra-traces par ICP-MS à l'ISTerre. Enfin, une analyse très haute résolution par microfluorescence X (core scanner) a été menée sur la carotte lacustre à l'EDYTEM (collaboration Université de Savoie – P. Sabatier) afin d'évaluer les variations semi-quantitatives des éléments géochimiques majeurs et traces, recalculées en flux (soit en fonction du temps de dépôt).

6b) Résultats. Interprétations

LE LAC ou la Période industrielle (1850-2012)

Le fort taux de sédimentation obtenu pour la carotte sédimentaire du lac Luitel permet de retracer les flux de mercure sur la période comprise entre 1850 et aujourd'hui. Les flux géochimiques seront calculés pour des périodes de 2 ans en moyenne. L'analyse géochimique du profil lacustre a donc mis en évidence deux hausses très importantes des flux de Hg au cours des première (1914-1918) et seconde (1939-1945) guerres mondiales suivies par une diminution graduelle des flux pour atteindre des flux actuels de l'ordre de 10 µg/m₂/an⁶. La source industrielle du mercure atmosphérique enregistré à Luitel pendant les deux guerres est en cours d'investigation en partenariat avec Chantal Spillemaecker, Conservateur en chef du Musée Dauphinois

et directrice du Musée Hector-Berlioz. La réflexion se poursuit, mais il est indéniable que de tels flux témoignent de pollutions importantes. Puis autour des années 1960, une hausse significative des flux de mercure est enregistrée : elle pourrait correspondre à la mise en place des cellules d'électrolyse à Hg sur le site d'ARKEMA Jarrie. On remarque d'ailleurs que le démantèlement de l'usine est également enregistré par la baisse significative des taux de mercure dans le profil lacustre.

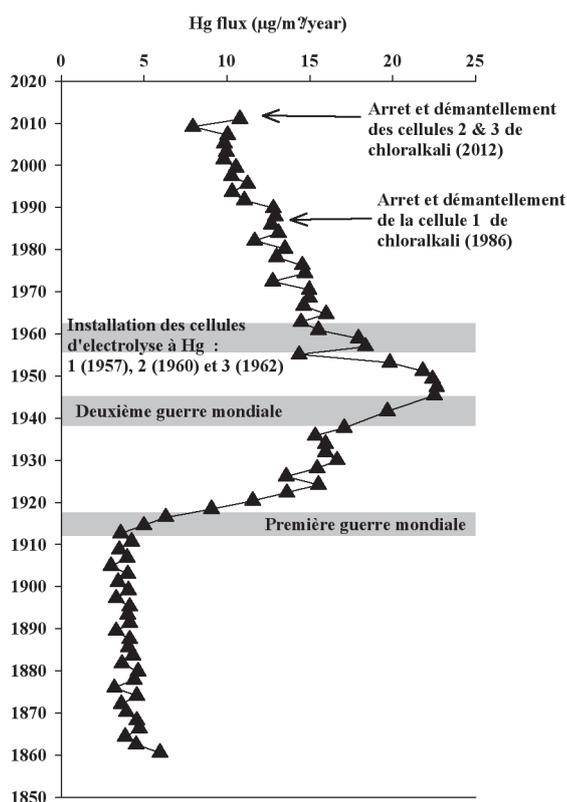


Figure 11 : flux de mercure pour le lac Luitel sur la période 1850 – actuelle

⁽⁵⁾ Le rapport de restitution est disponible sur demande auprès des auteurs ou au Pôle départemental de Biodiversité
⁽⁶⁾ Les taux actuels sont deux fois plus élevés que ceux mesurés dans la période préindustrielle (fin XIX^e).

On peut, à la vue de ces résultats, constater que le lac Luitel a joué un rôle majeur de mémoire des activités industrielles iséroises, avec plusieurs sources potentielles de pollution dès le début du siècle :

- toutes les usines de papeterie et plus particulièrement celles de la vallée du Grésivaudan (« Papetiers des Alpes » sous la direction de C. Spillemaecker) qui se convertirent comme à Lancey en production d'obus dans le cadre de l'effort de guerre
- les premiers fours électriques de l'industrie métallurgique pour les coulées d'aluminium par voie électrolytique à Froges (usines d'aluminium) qui fournirent aussi des industries de guerre
- sur Grenoble et Saint Martin d'Hères : toutes les fabrications pour les barrages et centrales d'équipements hydrauliques (conduites forcées, turbines...) produites essentiellement par Bouchayer et Viallet et Neyret-Beylier (devenu ensuite Neyric), qui ont également produit quantité d'obus. Ensuite dès les années 1920, les grosses usines d'appareillage électrique ont pris le relais, dont Merlin Gérin⁷ (1^{ers} disjoncteurs à haute tension). Dans la vallée de la Romanche, l'activité industrielle fut intense avec des papetiers mais surtout de la métallurgie⁸ autour de Livet Gavet sous l'impulsion de CA Keller (Keller et Leleu). Toute l'industrie chimique, également renforcée en temps de guerre (gaz et chlore) se met en place à Jarrie et Pont de Claix. Quant aux mines, celles de fer autour des Forges d'Alleverd avec les fours à griller le minerai ainsi que des activités de charbonniers dans la montagne pour la fabrication de charbon de bois ont probablement eu une incidence sur les émissions de mercure.

La tourbière ou la période pré-industrielle (avant 1850)

Sur le profil tourbeux, haute résolution, des teneurs totales en mercure (ou des flux volumiques normalisés à la densité sèche), cinq hausses importantes se distinguent :

- la plus importante se situe dans la partie haute de la carotte entre 50 et 100 cm de profondeur. Les autres hausses sont observables respectivement autour des profondeurs 100, 150, 210 et 330-370 cm (Figure 12).

La courbe montre une série de 4 augmentations significatives en mercure (symbolisées en grisé) datées des périodes suivantes :

- Entre 2500 et 2100 cal BP, soit la période romaine sl.
- Vers 1250 cal BP,
- Vers 880 cal BP, soit pendant le Moyen Age
- Puis à partir de 570 cal BP, vers le XVI^e siècle, cette augmentation se poursuivant jusqu'à un optimum pendant le XVIII^e et XIX^e siècle.

La normalisation du mercure au sélénium illustre bien la forte hausse globale des concentrations en Hg (issu de sources anthropiques) notamment sur la partie haute de la carotte (Figure 13). Les activités

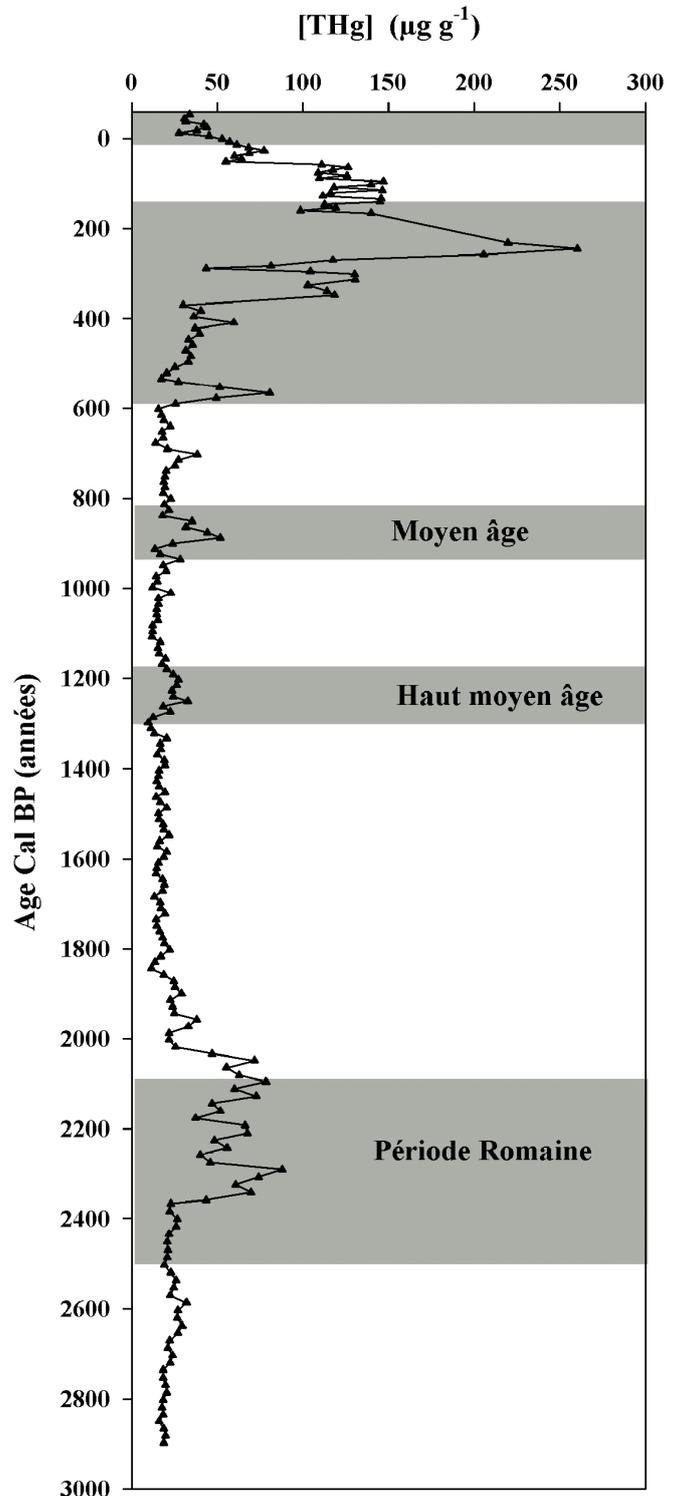


Figure 12 : profil très haute résolution des teneurs totales en mercure

⁽⁷⁾ devenu plus tard Schneider Electric

⁽⁸⁾ avec encore des productions de fontes synthétiques et des obus

métallurgiques de l'Âge du Fer, du Moyen Age et de la Renaissance sont ici bien caractérisées par une forte contribution de « mercure anthropique ».

Le plomb

Les flux de plomb nous renseignent également sur les activités anthropiques passées notamment celles du Moyen âge et de la Renaissance (Figure 13). Pendant ces périodes, les émissions anthropiques de Pb s'intensifient en lien avec plusieurs activités possibles :

- (I) l'augmentation de la combustion de biomasse et ou charbon,
- (II) les activités extractives (nombreuses mines répertoriées sur le massif de Belledonne)
- (III) la hausse des émissions globales

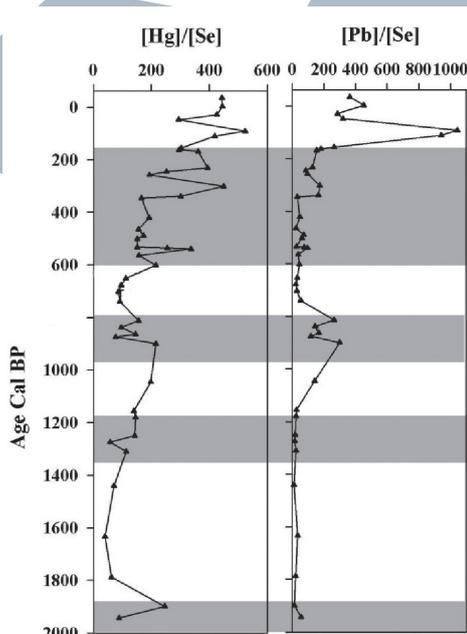


Figure 13 : profil de concentrations en hg et pb normalisés aux concentrations en SE

Sur la période récente, la hausse brutale des émissions est certainement liée aux essences plombées et la diminution successive résulte de l'interdiction d'ajout d'additifs plombés dans les essences au milieu des années 1970-1980.

7. Discussion et croisement des résultats

Il est illusoire d'interpréter la totalité des résultats de l'analyse pollinique dans une forme concise. La question du rôle du climat pourrait être débattue : elle fera l'objet de discussions dans une publication scientifique, mais à ce stade de la réflexion, on ne peut qu'émettre des hypothèses qu'il faudra évaluer par de nouvelles analyses. Naturellement, le climat a été le facteur déterminant à la transition Tardiglaciaire/Holocène. L'épisode du Dryas récent (voir (D) dans la Figure 8) est particulièrement bien enregistré, avec le retour d'espèces herbacées steppiques froides (*Artemisia*, *Chenopodiaceae*, *Caryophyllaceae*, *Helianthemum*, etc.)

La question du rôle de l'homme dans les dynamiques de végétation est plus évidente. A partir du Moyen Age, la diminution brutale du couvert forestier coïncide avec l'augmentation des taux de Juglans et de *Castanea* (noyer et châtaigniers espèces cultivées), des pollens de céréales, ainsi que des taxons herbacés liés aux activités agropastorales tels que *Rumex*, *Plantago lanceolata*, *Plantago coronopus*, *Urtica* ou encore *Mentha* pour ne citer que ces espèces. Il ne fait pas le moindre doute que le site de Luitel a subi de manière très marquée l'anthropisation croissante vers environ 1000 cal BP, comme dans le reste des Alpes. Afin d'exploiter au mieux les données de cette période, il faudra effectuer une synthèse des données archéologiques disponibles (notamment sur le pastoralisme médiéval) dans la région.

7a) Comparaison entre les données polliniques et géochimiques

La comparaison des données polliniques et des proxies géochimiques confirme également le rôle de l'anthropisation dans la modification du bassin versant de Luitel : la hausse des flux terrigènes à la Renaissance et au Moyen Age (Figure 12) pourrait être associée à un fort déboisement et une hausse de l'érosion du bassin versant : elle coïncide par ailleurs avec la chute spectaculaire de la hêtraie sapinière parfaitement documentée par le diagramme pollinique. Il est probable que le sapin, puis le hêtre aient été exploités, par coupes, mais également par brûlages, ce qui est notamment conforté par l'augmentation des apports atmosphériques

en mercure. La diminution radicale du couvert forestier permet alors le développement du cortège herbacé rudéro-anthropique comprenant *Plantago*, *Rumex*, *Galium*. A cette même période, on observe également la recrudescence des pollens de céréales, démontrant la présence d'activités agricoles dès 2000 cal BP (qui s'intensifient au Moyen Age).

7b) Comparaison entre les données polliniques et paléontomologiques

La comparaison entre les données polliniques fossiles et entomologiques fossiles permet également de mieux préciser les changements de paysages à la transition Tardiglaciaire/Holocène. Cependant, en raison de biais taphonomiques⁹, il n'est pas possible de croiser ce type de données pour la période contemporaine de l'anthropisation. Dans ce contexte, il serait envisageable d'étudier les carottes lacustres par l'entomologie afin de pallier ce manque. De nouvelles analyses paléontomologiques sont en cours pour compléter cette image imparfaite de l'évolution des communautés d'Arthropodes à Luitel. Un autre point original concerne la concomitance de l'apparition de la galéruque de l'orme avec l'optimum d'*Ulmus*. Cet arbre est aujourd'hui menacé, notamment par la graphiose, mais les données recueillies à Luitel indiquent que l'insecte phytophage (qui constitue aujourd'hui également une menace pour *Ulmus*) a coexisté au début de l'Holocène avec l'ormeaie. L'insecte a-t-il joué un rôle plus ancien dans le déclin de l'orme ? La question reste ouverte. Enfin, cette étude croisée a livré de précieuses informations paléoécologiques, notamment sur des espèces rares aujourd'hui comme l'orme ou la chrysomèle *Macroplea appendiculata*.

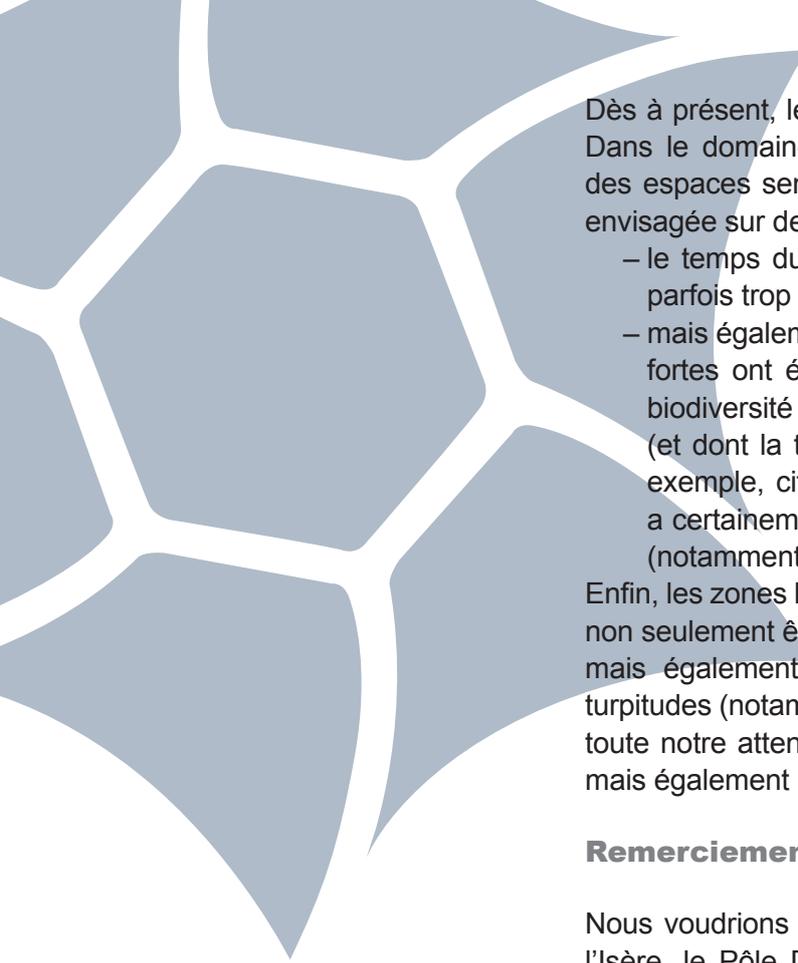
Conclusions

Au terme de cette étude, nous avons pu :

- 1) retracer l'évolution des écosystèmes depuis le dernier retrait glaciaire dans la région (il y a environ 15 000 ans),
- 2) reconstituer les dynamiques forestières dans le bassin versant du site,
- 3) comprendre l'impact des activités humaines passées sur la mise en place de la biodiversité animale et végétale
- 4) mieux comprendre des pollutions récentes régionales.

Naturellement, ces données sont encore à exploiter de manière très approfondie, mais elles constituent un solide socle de connaissances inédit pour les Alpes iséroises. L'étude paléoécologique (principalement au travers du contenu pollinique fossile) se poursuit également en haute résolution temporelle, en « serrant la maille d'analyse ». Ainsi, il sera possible d'améliorer la qualité de nos connaissances sur les dynamiques forestières postglaciaires, dont la rapidité et l'extraordinaire diversité sont encore probablement sous-estimées, à Luitel, mais également dans l'ensemble des massifs. L'histoire des bassins versants, sous la triple influence des « forçages » géomorphologiques, climatiques et anthropiques reste un vaste sujet d'étude, non seulement pour le scientifique, mais également pour le gestionnaire des zones humides (ces dernières étant étroitement liées aux bassins versants).

⁹⁾ Liés aux conditions d'enfouissement des fossiles dans la tourbe.



Dès à présent, les données présentées ici inspirent le constat suivant. Dans le domaine de la biologie de la conservation, de la protection des espaces sensibles, la notion de changement écologique doit être envisagée sur des échelles de temps variées :

- le temps du gestionnaire, qui doit faire face à des « menaces » parfois trop rapides
- mais également le temps plus long, au cours duquel des variations fortes ont également eu lieu, avec parfois des changements de biodiversité inattendus, liées à des activités humaines ancestrales (et dont la trace reste néanmoins visible dans le paysage). Pour exemple, citons l'épicéa, dont l'arrivée à Luitel est tardive, et qui a certainement « profité » de la destruction de la hêtraie sapinière (notamment liée aux activités de charbonnage).

Enfin, les zones humides, et tout particulièrement les tourbières, doivent non seulement être considérées comme des « havres de biodiversité », mais également comme la mémoire de nos paysages, et de nos turpitudes (notamment nos activités polluantes). A ce titre, elles méritent toute notre attention pour ce qu'elles nous enseignent au jour le jour, mais également pour ce qu'elles nous ont légué en profondeur.

Remerciements

Nous voudrions tout particulièrement remercier le Conseil Général de l'Isère, le Pôle Département de Biodiversité de l'Isère et la Réserve Naturelle du Lac Luitel. Le soutien financier mais également la confiance qui nous été accordés furent déterminants pour mener à bien ces travaux.



Nouveaux regards sur le vivant : de la protection à la gestion

Jacques Blondel
CEFE-CNRS, Montpellier

Résumé

Après avoir expliqué comment et pourquoi la biodiversité garantit le fonctionnement des écosystèmes et est à l'origine de fonctions génératrices de services écosystémiques, ce texte stigmatise son déclin et analyse quelques unes de ses conséquences, notamment en termes de fonctionnement des écosystèmes. On montre ensuite que le problème des références par rapport auxquelles évaluer la rapidité et l'ampleur des changements que subit la biodiversité est une réelle difficulté en raison de la rareté des suivis à long terme et des éléments de comparaison. Dans la logique actuelle de modélisation et d'instrumentalisation de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes, l'identification des fonctions que cette dernière exerce dans les écosystèmes est un thème de recherche très actif qui justifie la notion de capital naturel. Ces évolutions de la perception de la biodiversité entraînent un glissement de la notion de protection de la nature vers celle de gestion participative du patrimoine naturel. Ces nouveaux regards sur la biodiversité amènent à repenser les stratégies de conservation mais elles ont le mérite de rapprocher le vivant humain du vivant non-humain à travers le concept de solidarité écologique, économique et sociale.

Introduction

Une évidence de bon sens bien que nos contemporains n'en soient pas toujours convaincus est que l'environnement, tant dans ses composantes physiques que biologiques, est au fondement même de notre existence. Il l'est parce que la diversité biologique qui s'y déploie est un bien précieux pour des raisons culturelles, esthétiques, éthiques, sociétales, scientifiques et économiques, mais aussi et peut-être surtout parce que la biodiversité exerce des fonctions qui sont

à l'origine des *services écosystémiques* nécessaires à la vie. Après avoir constaté que notre environnement se dégrade, que la diversité biologique s'érode et que ces réalités ne présagent rien de bon pour le développement et le bien-être des sociétés humaines, l'objet de ce chapitre est de montrer qu'au-delà des problématiques traditionnelles de lutte contre l'érosion de la biodiversité qui relèvent des Sciences de la Conservation, la gestion de cette biodiversité s'intègre désormais dans l'agenda d'une nouvelle vision des relations entre la société et le tissu vivant des écosystèmes. Bien que fondamentalement anthropocentrée, cette nouvelle vision privilégie la notion de solidarité entre les humains et les composantes non-humaines de la biodiversité.

Erosion de la biodiversité et changements globaux

Dès la fin des temps glaciaires, il y a plus de 10 000 ans, la protohistoire fut déjà marquée par des spasmes d'extinction d'origine humaine bien antérieurs à l'exploitation massive et industrielle des ressources naturelles. A côté des archives fossiles, les peintures pariétales des grottes ornées dont certaines datent de plus de 30 000 ans, sont là pour nous donner un aperçu du fabuleux bestiaire des grands animaux qui peuplaient les espaces européens à ces époques reculées mais que les humains contribuèrent à faire disparaître (Alroy, 2001). Avec des hauts et des bas, le déclin de la biodiversité du fait de l'homme n'a jamais réellement cessé. De multiples exemples pourraient être donnés, qu'il s'agisse du déclin continu des grands singes, de celui des batraciens dans le monde entier, ou de nombreuses espèces d'oiseaux, notamment des espèces endémiques insulaires. Au taux estimé à 5 % de la diversité mondiale par décennie (Sala et al. 2000), le rythme actuel d'extinction des espèces, tel qu'il est rapporté par le *Millennium Ecosystem Assessment* (2005) reste tout aussi soutenu malgré l'engagement solennel qu'avaient pris, lors de la Conférence de Johannesburg (2002), les États signataires de la Convention sur la diversité biologique de la conférence de Rio (1992) de stopper la perte de biodiversité à l'horizon 2010. Et Julia Marton-Lefèvre, Directrice générale de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) d'avertir : « Les listes rouges de l'UICN démontrent que les efforts inestimables déployés à ce jour pour protéger les espèces sont insuffisants. Le rythme de l'érosion de la biodiversité s'accélère, et nous devons agir sans plus attendre. ». Les déterminismes de ces pressions sur l'environnement sont nombreux, complexes et en interactions les uns avec les autres. On les rassemble sous l'expression de « changement global » (Global change) (Vitousek, 1994) qui se décline en cinq composantes : I) l'altération et la fragmentation des habitats, II) l'utilisation massive d'intrants chimiques, III) les invasions biologiques, IV) la surexploitation des ressources naturelles et V) les dérèglements climatiques. Lourdes et globales, donc planétaires, ces composantes sont liées à la domination des humains sur une planète devenue à ce point anthropisée et modifiée que le terme « d'Anthropocène » a été proposé par le Prix Nobel Paul Crutzen (Crutzen & Stoermer, 2000) pour désigner cette nouvelle ère géologique succédant à l'Holocène. Isolément ou en synergie, ces composantes du changement global se combinent pour exercer sur la diversité biologique et sur les fonctions et services écologiques liés aux écosystèmes des pressions inédites dans l'histoire de la vie.

Les conséquences de cet appauvrissement sont l'objet d'innombrables recherches qui s'efforcent de documenter les points suivants d'ores

et déjà avérés mais encore mal connus dans les modalités de leurs mécanismes : I) modification des aires de distribution des populations et des espèces, II) changement des effectifs des populations, III) changement de l'ampleur et des modalités des comportements de déplacement des espèces migratrices, IV) modification des traits d'histoire de vie des espèces sous l'effet de nouvelles pressions de sélection, V) altération de la structure des peuplements, et VI) dérèglement des interactions entre espèces (compétition, prédation, parasitisme, symbioses), ces deux derniers points ayant de profondes répercussions sur le fonctionnement même des écosystèmes. C'est essentiellement des dérèglements climatiques dont il sera question ici.

Confrontés à un climat qui se réchauffe inexorablement, les organismes ont trois réponses possibles qui ont toutes trois été démontrées sur une large gamme d'organismes animaux et végétaux. La première réponse consiste à pratiquer une « traque à l'habitat » qui permet à l'organisme de suivre son habitat au fur et à mesure qu'il se déplace sous l'effet d'un réchauffement du climat (Parmesan, 2006 ; Devictor *et al.*, 2008). Les travaux qui s'efforcent de simuler les glissements d'aire de distribution des organismes en réponse aux dérèglements climatiques utilisent des modèles de niche qui sont fondés sur la projection des changements attendus des valeurs des descripteurs d'habitat (physiques et biotiques) qui définissent les niches actuellement observées des espèces (Chuine & Thuillier, 2005).

Une deuxième réponse consiste à changer d'habitus en modifiant sa phénologie, par exemple les dates d'éclatement des bourgeons au printemps ou les dates de reproduction ou de départ en migration pour les oiseaux. Ces modifications de caractères, ou traits d'histoire de vie, relèvent de ce qu'on appelle la plasticité phénotypique selon laquelle un génotype donné change d'expression phénotypique en fonction de l'habitat où il se trouve. Par un effet d'acclimatation, l'individu ajuste en quelque sorte son cycle de vie en réponse aux changements de son environnement. Là encore, de nombreux exemples illustrent la réalité de ce type de réponse. On a montré par exemple par suivi individuel des oiseaux que les femelles de mésange charbonnière ajustent chaque année leur date de ponte en fonction de la température ambiante de l'année en cours (Charmantier *et al.*, 2008).

La troisième réponse consiste à réagir aux nouveaux régimes de sélection par microévolution : la structure génétique de la population change au cours du temps par sélection naturelle, favorisant les individus les mieux adaptés aux nouvelles conditions de leur environnement. Sous régime de réchauffement du climat, les individus qui se reproduiront plus tôt au printemps seront avantagés sur les autres ; ils survivront mieux et produiront davantage de descendants de sorte que la nouvelle configuration génétique de la population sera conservée et se transmettra aux générations suivantes.

Une question cruciale et récurrente est de savoir dans quelle mesure ces différents types de réponse, glissements d'aire de distribution, décalages phénologiques, réponses microévolutives seront suffisamment rapides et significatifs pour permettre une adaptation continue des populations (Visser, 2008). La réponse à cette question est encore largement inconnue.

Quelles références du passé pour comprendre le présent et anticiper le futur ?

L'environnement change, c'est un fait, mais comment évaluer ces changements et à quels termes de référence les comparer ? Les changements que subissent les écosystèmes ne datent pas d'aujourd'hui de sorte que l'expérience du passé peut être riche d'enseignements pour comprendre ce qui se passe actuellement et prévoir ce qui devrait se passer dans un futur prévisible. S'agissant d'un lointain passé, les données paléoclimatiques, paléobotaniques, paléontologiques et phylogéographiques sont assez nombreuses et précises pour nous donner une bonne image de la dynamique et de la mobilité des écosystèmes lors des fluctuations climatiques qui, au cours des deux derniers millions d'années, ont marqué l'histoire des ceintures de végétation et de leurs faunes associées. Sans entrer dans les détails, on peut retenir de ces fluctuations de très grande ampleur deux points essentiels : d'abord les communautés du passé n'ont pas d'équivalent dans les structures actuelles, chaque espèce répondant de manière singulière, voire idiosyncratique, aux sollicitations de son environnement. De fait, la comparaison des cartes phytogéographiques actuelles avec celles des végétations du passé dressées à partir des signatures palynologiques révèle une très mauvaise concordance des assortiments d'espèces. Ce que, dans la nomenclature phytosociologique, on appelait « association » n'a plus aucun sens quand on essaie d'appliquer le concept aux végétations du passé (Pons & Reille, 1986).

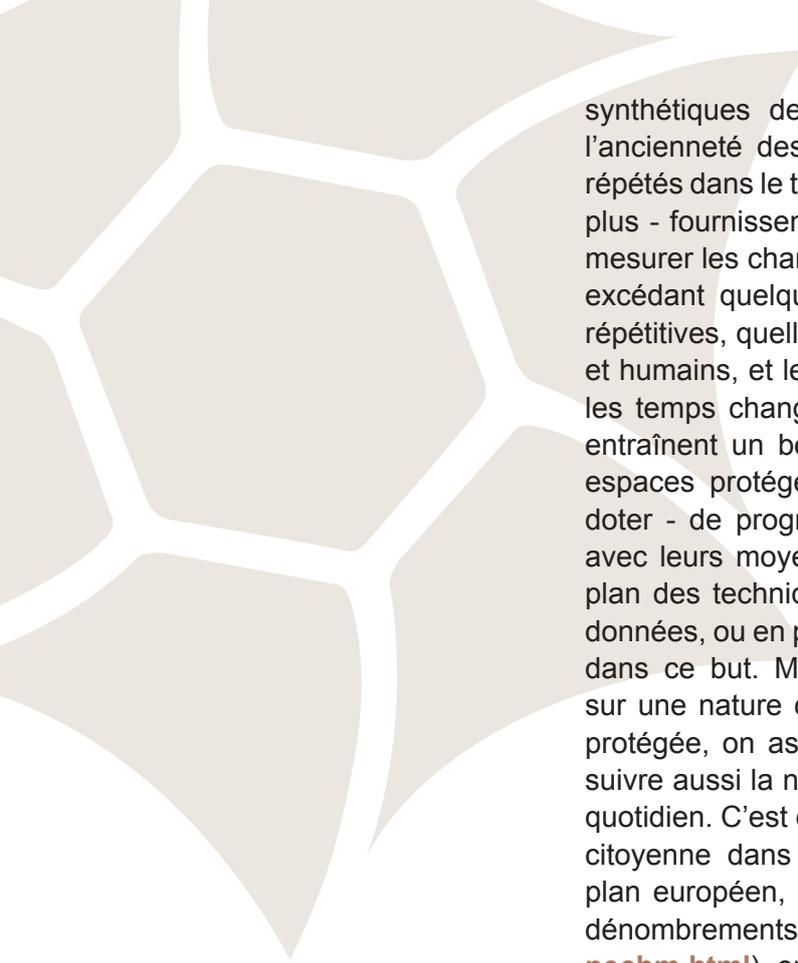
Deuxième point à souligner, la remarquable mobilité des taxons. La périodicité des alternances glaciaire-interglaciaire est de l'ordre de 100 000 ans de sorte qu'au cours des deux derniers millions d'années, ce sont quelque vingt pulsations climatiques qui ont exercé de gigantesque forçages sur les aires de distribution, entraînant les espèces à se déplacer sur des milliers de kilomètres. La palynologie (plantes) et la paléontologie (animaux), mais aussi l'ADN mitochondrial (ADNmt) pour les animaux et l'ADN chloroplastique (DNAcp) pour les plantes permettent de retracer et cartographier les mouvements de flux et de reflux des ceintures de végétation et de leurs faunes associées lors de leurs périodes de contraction puis d'expansion spatiale (Hewitt, 1999). Ces mouvements et changements d'aires ont eu de multiples conséquences : il y eu, certes, de multiples événements d'extinction aujourd'hui bien documentés (Latham & Ricklefs, 1993 ; Blondel *et al.*, 2010) mais les pressions de sélection auxquelles les organismes ont été soumis ont entraîné une variation considérable dans la diversité génétique des populations avec, en gros, un gradient nord-sud de diversité génétique croissante, les valeurs les plus élevées se trouvant en Europe du sud, notamment dans une série de refuges méditerranéens.

Un second aspect est l'aptitude à la mobilité. Périodiquement sollicités à se déplacer sous la pression de climats qui changent, les organismes ont développé une grande mobilité et, surtout, une aptitude génétiquement déterminée à changer de comportement migratoire. C'est au point que ces déplacements de grande ampleur qu'entreprennent les écosystèmes avec toutes leurs composantes sont de véritables migrations au plein sens de ce terme car ils impliquent un mouvement d'aller et retour entre deux aires géographiques distinctes mais qui restent les mêmes d'un épisode de migration à l'autre. Même si les vitesses et distances de migrations sont variables d'un taxon à l'autre, seules les échelles

de temps distinguent ce type de migrations des migrations classiques d'oiseaux, une année pour ces derniers contre 100 000 ans pour les mouvements glaciaires/interglaciaires. Comme l'ont noté Huntley & Birks (1983), « *De même que le bécasseau maubèche est capable de parcourir 10 000 à 15 000km, en deux ou trois étapes à une vitesse moyenne de 70km/heure afin de suivre les variations saisonnières du climat, les arbres et leurs faunes associées doivent être capables de migrer sur des distances du même ordre de grandeur, mais à des vitesses qui leur permettent de suivre les fluctuations à long-terme du climat (50-2000 m par an)*. Cette aptitude à la migration est un caractère évolutif majeur : elle signifie que les organismes ont le potentiel de répondre aux sollicitations exercées par le nouveau contexte climatique. Et de fait, dans une série d'expériences réalisées dans un laboratoire du Max Planck Institute, les chercheurs ont pu, en pratiquant une sélection directionnelle expérimentale, rendre totalement migrateur ou totalement sédentaire, en quelques générations seulement, un échantillon de fauvette à tête noire (Berthold *et al.*, 1992).

Sur des périodes plus courtes, de l'ordre de quelques décennies, qui nous préoccupent plus directement, l'évaluation de l'ampleur et de la vitesse des changements que subit la biodiversité est une question récurrente qui renvoie à la difficile question des termes de comparaison. En effet la perception que chacun a de l'altération de son environnement est limitée à la toute petite fraction d'espace-temps qui l'entoure, de sorte que ce que nous savons repose nécessairement sur la confiance que nous accordons à l'information reçue des autres. Une sorte d'amnésie collective se manifeste dès lors que disparaissent les témoins d'un état que la nature présentait à un moment donné de son histoire. On ne peut, en effet, regretter la disparition de quelque chose qu'on n'a jamais connu. Se référant à la profusion de vie qui peuplait les mers d'autrefois, Pauly (1995) souligne que cette amnésie historique donne lieu à un « syndrome de glissement des termes de références » (*shifting baselines*) par lequel notre perception de « ce qui est naturel » se déplace peu à peu, sans qu'on s'en rende compte, vers quelque chose de différent, en l'occurrence de plus dégradé.

Ma référence est ce que j'ai sous les yeux et que j'appréhende avec ma sensibilité, mais celle de mes enfants sera ce qu'ils auront sous leurs yeux et qu'ils appréhenderont avec leur propre sensibilité. Entre-temps, les choses auront changé, mais ce changement n'est pas objectivable de sorte que je ne pourrai leur transmettre mon expérience. Ce glissement des références rend intransmissible le souvenir d'un état donné de la nature de sorte que l'érosion de la biodiversité passe largement inaperçue. D'où l'importance de disposer de moyens de calibrage qui puissent servir de base de référence pour le long terme. C'est dans cette optique que sont conçus les programmes de monitoring et de suivi de la biodiversité qui se développent aujourd'hui un peu partout et qui permettent d'inventorier cette dernière, de mesurer ses changements et de développer des stratégies de conservation. Malgré une longue tradition d'observations naturalistes, nous connaissons mal la nature et l'ampleur des changements que subissent les systèmes écologiques, de même que les directions que prennent certaines de leurs trajectoires parce que dès lors qu'on veut obtenir une image de l'évolution d'écosystèmes qui aille plus loin que les simples suivis d'espèces ou groupes d'espèces particulières, il n'existe pas d'indices



synthétiques de biodiversité. Il faut bien reconnaître que malgré l'ancienneté des observations, dénombrements et échantillonnages répétés dans le temps, peu de programmes - quelques dizaines tout au plus - fournissent des bases de référence utilisables pour réellement mesurer les changements que présente la biodiversité sur des durées excédant quelques dizaines d'années. Car la collecte de données répétitives, quelles qu'elles soient, est coûteuse en moyens financiers et humains, et leur utilité n'est pas toujours reconnue. Heureusement les temps changent et les inquiétudes sur l'état de l'environnement entraînent un besoin grandissant de le surveiller de près. Tous les espaces protégés sont aujourd'hui dotés - ou sont en train de se doter - de programmes de veille de leur environnement. Ils le font avec leurs moyens propres, de manière plus ou moins élaborée au plan des techniques d'acquisition, de stockage et de traitement des données, ou en partenariat avec des structures de recherche équipées dans ce but. Mais au-delà de ces pratiques généralement ciblées sur une nature considérée comme « extraordinaire » puisqu'elle est protégée, on assiste à une prise de conscience de la nécessité de suivre aussi la nature dite « ordinaire », celle de notre environnement quotidien. C'est dans ce contexte qu'on observe une forte mobilisation citoyenne dans des programmes de science dite participative. Au plan européen, on peut citer les programmes de cartographie et de dénombrements des populations d'oiseaux (<http://www.ebcc.info/pecbm.html>) ou de suivis démographiques de certaines espèces sensibles (<http://www.euring.org/>). En France, le programme Vigie-Nature (<http://vigienature.mnhn.fr/>), fondé et porté par le Muséum national d'histoire naturelle et mené en partenariat avec le ministère chargé de l'environnement et plusieurs fondations, est l'exemple typique d'un projet de veille écologique mis en œuvre par des réseaux d'observateurs volontaires regroupant aujourd'hui plus de 100 000 personnes. Dans le sillage du programme STOC (Suivi temporel des oiseaux communs), fondé en 1989, plusieurs initiatives ont été lancées sur des groupes très divers. On pourrait en citer bien d'autres, tels les programmes ODS (Observatoire des saisons) ou Phénoclim (évolution de la phénologie de quelques espèces d'arbres de montagne) qui invitent le public à mesurer l'impact des changements climatiques sur la végétation.

A quoi sert la biodiversité ? Quelles fonctions pour quels services

Les exigences de conservation, voire de restauration, de la biodiversité vont bien au-delà du souci – au demeurant légitime et nécessaire – de protéger la nature pour elle-même ou par obligation morale. Car sa dégradation peut avoir de sérieuses conséquences sur le fonctionnement même des écosystèmes. La logique de l'approche est de répertorier ce que fait la biodiversité dans les écosystèmes, à savoir ses fonctions telles que la pollinisation, la dispersion des diaspores végétales, la régulation du climat, la purification de l'air, le contrôle des agents pathogènes, la production primaire et une myriade d'autres. Ces fonctions sont à l'amont de ce qu'on appelle les services écosystémiques, à savoir ce que les humains puisent dans la nature en le faisant si possible de manière partagée et équitable. Ces services sont de deux ordres : les services d'approvisionnement dont nous dépendons directement (nourriture, fibres végétales, énergie, médicaments), et les services culturels.

La plupart des fonctions et par conséquent des services qu'elles sous-tendent reposent fondamentalement sur des réseaux d'interactions entre éléments de biodiversité et ce, à tous les niveaux des hiérarchies biologiques. Un exemple est l'ensemble des processus écologiques et biochimiques qui transforment l'herbe des alpages de nos montagnes en fromage, tomme ou reblochon. Lors de son passage progressif dans les différents compartiments du système digestif de la vache, cette substance indigeste qu'est la cellulose est cassée et métabolisée par des milliers de milliards de bactéries dont les souches sont différentes au fur et à mesure qu'elle passe de la panse au bonnet puis au feuillet, et enfin à la caillette. Le lait qui résulte de toute cette alchimie sera à son tour travaillé par autant de milliards de micro-organismes qui le transformeront en fromage, puis un autre travail, du même ordre, sera effectué dans notre propre tube digestif dont le « microbiome » - comme on l'appelle - aura pour travail de nous permettre de digérer sans encombre cette substance potentiellement toxique qu'est le fromage. Au total ce sont des centaines de milliers de milliards de bactéries qui participent à tous ces travaux. Leur masse atteint 14 kg dans le ventre d'une vache et 2 kg dans le nôtre. Deux choses sont à retenir de ces ensembles de processus, la première est qu'en matière de biodiversité fonctionnelle l'essentiel est invisible et la seconde est que la diversité biologique est moins une somme d'entités, gènes, populations, espèces etc. que des réseaux d'interactions dans et entre ces entités.

Nous sommes donc loin d'une vision idyllique, « grand public », de la biodiversité, celle des belles fleurs, de beaux oiseaux et de prestigieux mammifères, bref d'une biodiversité « remarquable » parce que remarquable, correspondant à des entités que la société a identifiées comme ayant une valeur intrinsèque et non instrumentale. D'où une sorte de dualisme entre la biodiversité « extraordinaire » et la biodiversité « ordinaire », celle qui n'a pas de valeur intrinsèque identifiée comme telle – les bactéries qui font le fromage – mais qui assure le fonctionnement des écosystèmes et la production des services qu'y trouve la société. Inutile de dire que ces deux approches de la diversité biologique sont non seulement légitimes mais complémentaires et non exclusives l'une de l'autre de sorte que mettre l'accent sur la diversité fonctionnelle n'empêche nullement, bien loin de là, de se préoccuper de celle dont les fonctions paraissent moins immédiatement vitales. C'est dans cette perspective de fonctionnalité qu'ont été identifiés cinq faits étroitement associés aux variations d'état de la biodiversité (Cardinale *et al.*, 2012) :

1. L'érosion de la biodiversité réduit l'efficacité des écosystèmes à utiliser les ressources, produire de la biomasse, décomposer et recycler les nutriments,
2. L'érosion de la diversité biologique diminue la stabilité des fonctions écosystémiques,
3. L'impact de la diversité biologique sur un processus écosystémique donné n'est ni linéaire ni saturant ; les changements de trajectoires s'accélèrent au fur et à mesure que la biodiversité s'érode avec une forte probabilité de basculement des systèmes vers de nouvelles trajectoires, le plus souvent indésirables,
4. Plus les communautés sont diversifiées plus elles sont productives, d'abord parce qu'elles contiennent des espèces clé ayant une

(1) On ne parle pas d'espèce chez les procaryotes en raison de l'absence de barrières à l'interfécondité.

grande influence sur la productivité et surtout parce que les différences entre traits fonctionnels augmentent la quantité totale de ressources mobilisées,

5. Les pertes de diversité biologique entre niveaux trophiques ont davantage d'impact sur les fonctions écosystémiques que les pertes de biodiversité au sein de chaque niveau. Autrement dit, l'intégrité des pyramides trophiques garantit mieux la réalisation de ces fonctions que l'abondance des populations à chaque niveau. Le débat actuel sur les grands prédateurs, terrestres et marins, en est une belle illustration.

C'est avec ces nouveaux regards sur la biodiversité que se développe une approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes.

L'approche économique de la biodiversité

Dans le sillage de ce que véhicule le concept de service écosystémique mis en avant par le Millenium Ecosystem Assessment, l'approche économique de la diversité biologique entre aujourd'hui de plain pied dans les modèles de gestion de cette dernière. Si l'exercice ne va pas sans soulever de nombreuses questions et polémiques, notamment dans le domaine de l'éthique environnementale, il a le mérite d'apporter une justification aux nouvelles normes de gestion qu'on s'efforce de lui appliquer. Malgré leur diversité et leur complexité les modèles économiques ont tous un point commun, celui d'être directement ou indirectement liés à des choix et des comportements socio-économiques. Indépendamment des difficultés et des limites de l'évaluation économique de la biodiversité et des services écosystémiques, l'analyse économique des comportements qui sont à l'origine de sa dégradation est un préalable essentiel à toute politique de conservation. Il n'est pas question d'entrer ici dans les détails de la modélisation économique (voir Salles, 2014) mais, pour rester dans l'épure d'un propos qui se veut fondamentalement axé sur la gestion et la conservation, quelques points se doivent d'être soulignés.

Qu'on s'en félicite ou qu'on le déplore, le concept de service écosystémique modifie en profondeur la perception de la nature et légitime son instrumentalisation par les sociétés humaines. La logique économique est de dire qu'au lieu de considérer la préservation de la nature comme une exigence pour laquelle une part du bien-être de la société doit être sacrifiée, par exemple en soustrayant des espaces à leur valorisation économique en les transformant en réserves, l'environnement est désormais conçu comme un capital naturel (Liu *et al.*, 2010), ce terme, loin d'être anodin, inscrivant l'idée dans une logique résolument anthropocentrique et utilitariste. Se pose alors immédiatement la question de la valeur qu'on attribue à la diversité biologique et du sens qu'on donne à ce mot. Car la valeur peut être instrumentale, devenant un moyen pour servir d'autres fins qu'elle-même, mais elle peut aussi être intrinsèque, le vivant étant en lui-même une fin en soi comme le soulignent plusieurs courants de l'éthique environnementale (voir Callicott, 1999). Quand on parle de la valeur d'une chose, elle peut soit relever d'une mesure chiffrée à partir d'un métrique appropriée, par exemple dans le cadre d'une transaction marchande, soit se référer à une règle ou une référence morale. Le principe de valorisation par le biais des services écosystémiques a

ouvert un boulevard à l'approche économique de la biodiversité sur laquelle on n'insistera pas ici (voir par exemple Chevassus-au-Louis, 2009 ; Salles, 2014). Pour rendre compte de la complexité de la notion de valeur, les modèles économiques reconnaissent deux types de valeurs, les valeurs d'usage, ce qu'on prélève dans la nature, et les valeurs de non usage qui peuvent être des valeurs d'usage par procuration si nous valorisons la préservation d'écosystèmes au motif que d'autres en tirent un bénéfice, des valeurs d'héritage quand il s'agit de léguer aux générations futures des écosystèmes sains et fonctionnels, enfin des valeurs d'existence si l'on reconnaît aux organismes vivants un droit intrinsèque et imprescriptible à la vie.

Le résultat de cette vision instrumentalisée de la biodiversité a d'importantes conséquences pratiques sur les politiques publiques en matière de gestion de l'environnement, ces politiques s'orientant désormais davantage sur la gestion des ressources qu'à la protection de la nature. D'où un glissement de la perception qu'on a des relations entre nature et société. Alors que l'écologie des années 1960 dissociait (opposait) les activités humaines des processus écologiques régulateurs de la biodiversité en protégeant la nature contre l'homme par la création de réserves et de Parcs nationaux, les années 2000 voient un glissement épistémologique du concept de nature vers celui de ressources naturelles, lesquelles comprennent certes des espèces rares qu'il convient de protéger, mais surtout des ressources appropriables par les humains, puis celui de patrimoine naturel, et enfin celui de biodiversité. Il convient dans ce contexte de distinguer la diversité biologique de la biodiversité bien qu'étymologiquement les deux expressions disent la même chose : alors que la première désigne un état du vivant, l'état d'être divers, tel qu'il est décrit et analysé par le biologiste et tel que ce dernier veut le protéger dans son intégrité, la biodiversité se réfère à cette diversité biologique en tant qu'elle est instrumentalisée par les humains, pour le meilleur quand ces derniers l'utilisent pour leur bien-être, mais aussi pour le pire quand ils la saccagent. Alors que la diversité biologique relève du discours des sciences de la vie, celui de la biodiversité est un terme polysémique qui relève de ce discours, certes, mais surtout de celui des sciences de l'homme et de la société (Blondel, 2012). Alors que les efforts de conservation ont traditionnellement porté sur la définition et la gestion d'espaces protégés qu'il fallait soustraire aux influences humaines, ou sur la conservation d'espèces rares, menacées ou emblématiques à un titre ou à un autre, un nouveau regard est porté aujourd'hui sur ce qu'on désigne par nature « ordinaire », celle de notre environnement quotidien. On en vient à réfuter l'antagonisme traditionnel entre activités humaines et conservation de la nature, antagonisme qui fut à l'origine de la création des parcs et des réserves : on créait ces derniers pour protéger la nature contre l'homme alors qu'il s'agit désormais de la protéger avec et pour l'homme. A noter que cette distinction de valeur entre deux types de diversité biologique pose à l'évidence un problème éthique tout comme le fait la notion d'espèce patrimoniale qui établit une hiérarchie totalement arbitraire entre les taxons. N'est extraordinaire ou patrimonial que ce que l'humain considère subjectivement comme tel. De fait, la loi française de 1976 sur la protection de la nature, pour bénéfiques qu'aient globalement été ses effets, a eu pour conséquence de territorialiser les espaces, de les figer géographiquement, et d'établir des hiérarchies subjectives et scientifiquement infondées sur le vivant.

La tendance actuelle est donc de substituer au paradigme des espaces protégés une conception plus ouverte qui élargit délibérément le champ des préoccupations de conservation et de gestion à la nature dite « ordinaire », telle qu'elle existe dans les espaces habités et gérés pour les services qu'on attend d'eux.

L'intégration des zones protégées dans un tissu socio-économique et écologique local se concrétise dans les réserves de biosphère, les parcs naturels régionaux et, depuis la loi du 14 avril 2006, les parcs nationaux. Ces espaces deviennent alors des laboratoires de mise en œuvre d'une nouvelle forme de développement. La conservation devient alors un processus social et politique, aussi bien qu'écologique et environnemental. C'est dans ce contexte que se développa la notion de solidarité écologique (Mathevet, 2012) telle qu'elle apparaît dans la loi de 2006 puisque cette loi reconnaît « la solidarité écologique, économique et sociale de fait » entre le cœur de cet espace d'exception qu'est un parc national, et son environnement géographique immédiat, notamment son « aire d'adhésion ». Le sens profond de l'introduction dans le droit de l'environnement du concept de solidarité écologique est que l'homme n'est plus systématiquement au centre de la délibération morale sur le statut du vivant, la solidarité impliquant un lien moral entre humains et non-humains (dans l'intérêt des humains). Ce concept renvoie à une éthique écocentrique qui est une éthique du vivre-ensemble. D'un point de vue pratique, la mise en connexion des espaces protégés et la création de corridors de dispersion pour relier les habitats dans les paysages fragmentés, ce que proposent le programme Natura 2000 de l'Union européenne et la Trame verte et bleue du Grenelle de l'environnement dénotent clairement une prise de conscience des enjeux écologiques par le monde politique. La loi du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement dispose en effet que « la trame verte et la trame bleue ont pour objectif d'enrayer la perte de biodiversité en participant à la préservation, à la gestion et à la remise en bon état des milieux nécessaires aux continuités écologiques, tout en prenant en compte les activités humaines, et notamment agricoles, en milieu rural. »

Remarquons pour finir que si cette évolution des pratiques de gestion et de conservation présente de nombreux avantages en remettant du lien entre les humains et le milieu naturel, elle n'est pas sans dangers. De nombreuses voix s'élèvent pour dénoncer ce que certains dénoncent comme une trahison, affirmant que le ciblage du champ des sciences de la conservation vers une valorisation de l'environnement au seul bénéfice des humains, est synonyme de marginalisation, voire d'abandon de la cause traditionnelle d'une protection de la nature pratiquée dans l'intérêt exclusif de la vie sauvage (Doak *et al.* 2014).

Conclusion

Dans ce monde en mutation dans tous les domaines, la question qui se pose à la communauté scientifique est celle-ci : comment valoriser au mieux cette gigantesque « expérience naturelle » que représentent les changements globaux, non pas pour la simple satisfaction académique de produire de nouveaux savoirs, mais pour identifier, puis accompagner les mécanismes d'adaptation et réponses évolutives des organismes au monde incertain dans lequel nous vivons. De nombreuses questions

se posent : comment améliorer les modèles bioclimatiques qui simulent la dynamique des aires de distribution ? Quels sont les mécanismes qui déterminent les valeurs phénotypiques des traits et leur plasticité ? Quelle sont la nature et l'ampleur des réponses évolutives et phénotypiques au changement (normes de réaction) ? Pour aborder ces questions, les longues séries temporelles sont nécessaires car elles seules permettent d'élucider les mécanismes de réponse ou de non réponse au changement. Elles sont nécessaires aussi pour mesurer les changements que subissent les fonctions qui opèrent au sein des écosystèmes car la connaissance des variations de fonctionnalité sont un préalable à la définition d'une gestion adaptative au changement. Pour répondre à ces différents points, un agenda de recherche-action pourrait consister à i) affiner l'inventaire de la biodiversité d'état et de la biodiversité fonctionnelle dans le but ii) de valoriser les fonctions génératrices de services écosystémiques, et iii) de mettre en œuvre le principe de solidarité écologique et économique pour promouvoir un nouveau vivre-ensemble entre le vivant humain et le vivant non-humain.

Bibliographie

- ALROY J., 2001. A multispecies overkill simulation of the end-Pleistocene megafaunal mass extinction. *Science* 292 :1893-1896.
- BERTHOLD, P., HELBIG, A. J., MOHR, G. & QUERNER, U., 1992. Rapid microevolution of migratory behaviour in a wild bird species. *Nature* 360: 668-669.
- BLONDEL, J., 2012. L'Archipel de la Vie. Essai sur la diversité biologique et une éthique de sa pratique. Buchet-Chastel, Paris.
- BLONDEL, J., ARONSON, J., BODIOU, J.-Y. & BOEUF, G., 2010. The Mediterranean Region: Biodiversity in Space and Time. Oxford, Oxford University Press.
- CARDINALE, B. J., DUFFY, J. E., GONZALEZ, A., HOOPER, D. U., PERRINGS, C., VENAIL, P., NARWANI, A., MACE, G. M., TILMAN, D., WARDLE, D. A., KINZIG, A. P., DAILY, G. C., LOREAU, M., GRACE, J. B., LARIGAUDERIE, A., SRIVASTAVA, D. S. & NAAEM, S., 2012. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature* 486: 59-64.
- CALLICOTT, J. B., 1999. Beyond the Land Ethic. State Univ. of New York Press, New York.
- CHARMANTIER, A., MCCLEERY, R. H., COLE, L. R., PERRINS, C. M., KRUK, L. E. B. & SHELDON, B. C., 2008. Adaptive phenotypic plasticity in response to climate change in a wild bird population. *Science* 320 : 800-803.
- CHEVASSUS-AU-LOUIS, B., 2009. Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes. Paris, Centre d'Analyse stratégique.
- CHUINE, I. & THUILLER, W., 2005. Impact du changement climatique sur la biodiversité. *Le Courrier de la Nature* 223: 20-26.
- CRUTZEN, P. J. & STOERMER, E. F., 2000. The «Anthropocene». *Global Change Newsletter* 41 : 12-13.
- DEVICTOR, V., JULLIARD, R., COUVET, D. & JIGUET, F., 2008. French birds lag behind climate warming. *Proc. R. Soc. Lond. B* 275 : 2743-2748.
- DOAK, D. F., BAKKER, V. J., GOLDSTEIN, B. E. & HALE, B., 2014. What is the future of conservation? *Trends Ecol. Evol.* 29(2) : 77-81.

- HEWITT, G. M., 1999. Post-glacial recolonisation of European biota. *Biol. J. Linn. Soc.* 68 : 87-112.
- HUNTLEY, B. & BIRKS, H. J. B., 1983. *An Atlas of Past and Present Pollen Maps for Europe: 0-13000 years ago.* Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- LATHAM, R. E. & RICKLEFS, R. E., 1993. Continental comparisons of temperate-zone tree species diversity. Pages 294-314 in R. E. Ricklefs and D. SCHLUTER (eds.), *Species diversity in ecological communities: historical and geographical perspectives.* Chicago Univ. Press, Chicago.
- LIU, S., COSTANZA, R., FARBER, S. & TROY, A., 2010. Valuing ecosystem services. *Ann. New York Acad. Sci.* 1185 : 54-78.
- MATHEVET, R., 2012. *La Solidarité écologique. Ce lien qui nous oblige,* Actes Sud, Arles.
- MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends.* Washington DC, Island Press.
- PARMESAN, C., 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 37: 637-669.
- PAULY, D., 1995. Anecdotes and the shifting baseline syndrome of fisheries. *Trends Ecol. Evol.* 10 : 430p.
- PONS, A. & REILLE, M., 1986. Nouvelles recherches pollenanalytiques à Padul (Granada): la fin du dernier glaciaire et l'Holocène. Pages 405-420 in *Proc. Sympos. Climatic Fluctuations during the Quaternary in the Western Mediterranean Region.*
- SALA, O. E., STUART CHAPIN III, F. S., ARMESTO, J. J., BERLOW, E., BLOOMFIELD, J., DIRZO, R., HUBER-SANWALD, E. et al., 2000. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* 287: 1770-1774.
- SALLES, J.-M., 2014. La modélisation économique peut-elle aider à préserver la biodiversité ? In M. GAUTHIER-CLERC, F. MESLÉARD & J. BLONDEL. *Sciences de la Conservation.* De Boeck, sous presse.
- VISSER, M. E., 2008. Keeping up with a warming world; assessing the rate of adaptation to climate change. *Proc. R. Soc. Lond B* 275 : 649-659.
- VITOUSEK, P. M., 1994. Beyond global warming: ecology and global change. *Ecology* 75 : 1861-1876.