

## Reboisement et dynamique naturelle dans les forêts sub-alpines (Haut-Verdon, Alpes du Sud, France)

## Reforestation and natural dynamics in the subalpine forests (Haut-Verdon, southern Alps, France)

## Wiederaufforstung und natürliche Dynamik in den subalpinen Wäldern (Haut-Verdon, Südalpen, Frankreich)

Christelle Belingard, Lucien Tessier et Jean-Louis Édouard

Volume 52, numéro 2, 1998

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/004767ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/004767ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0705-7199 (imprimé)

1492-143X (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Belingard, C., Tessier, L. & Édouard, J.-L. (1998). Reboisement et dynamique naturelle dans les forêts sub-alpines (Haut-Verdon, Alpes du Sud, France). *Géographie physique et Quaternaire*, 52(2), 227–236. <https://doi.org/10.7202/004767ar>

Résumé de l'article

Cette étude s'inscrit dans le courant des recherches sur la restauration des écosystèmes forestiers dégradés. En France, la forêt d'altitude, détruite au cours des siècles à des fins pastorales, a été replantée il y a environ 100 ans afin de stabiliser les sols alors très érodés. Avec presque un siècle de recul, nous avons tenté de dresser un bilan de ces opérations de reforestation pour un site des Alpes du Sud. L'objectif était de faire la part relative des processus naturels de recolonisation et de l'effet des opérations de reboisement (réussite ou échec) sur l'état actuel du couvert forestier près de ses limites supérieures. Deux analyses complémentaires sont mises en œuvre : 1) une analyse de documents d'archives concernant le déroulement du reboisement et l'évolution de la superficie boisée ; 2) une analyse dendrochronologique à la limite supérieure de la forêt et dans les peuplements situés au-dessus, pour évaluer l'âge des arbres et l'impact des principaux facteurs environnementaux sur leur croissance. Les espaces boisés situés au-dessus de la forêt se révèlent être des restes de la reforestation. La plupart des arbres plantés n'ont pas survécu. La régénération naturelle n'a pas pris le relais des plantations. Pourtant, les contraintes climatiques altitudinales ne peuvent être considérées comme des facteurs limitatifs majeurs de la croissance radiale sur le site. Il semblerait que la cause réelle de cet échec soit le changement de substrat, qui intervient à partir de 2000 m d'altitude. En dessous de cette barre, la restauration de la forêt est un succès, même sur les terrains difficiles à coloniser comme les anciennes prairies. À l'intérieur même des plantations, les processus naturels prennent le relais des opérations de reboisement.

# REBOISEMENT ET DYNAMIQUE NATURELLE DANS LES FORÊTS SUB-ALPINES (HAUT-VERDON, ALPES DU SUD, FRANCE)

Christelle BELINGARD, Lucien TESSIER, Jean-Louis ÉDOUARD, Institut méditerranéen d'Écologie et de Paléoécologie, Université d'Aix-Marseille, Faculté de Saint-Jérôme, boîte 451, 13397, Marseille, Cedex 20, France.

*Manuscrit reçu le 3 juillet 1997 ; manuscrit révisé et accepté le 27 mai 1998*

**RÉSUMÉ** Cette étude s'inscrit dans le courant des recherches sur la restauration des écosystèmes forestiers dégradés. En France, la forêt d'altitude, détruite au cours des siècles à des fins pastorales, a été replantée il y a environ 100 ans afin de stabiliser les sols alors très érodés. Avec presque un siècle de recul, nous avons tenté de dresser un bilan de ces opérations de reforestation pour un site des Alpes du Sud. L'objectif était de faire la part relative des processus naturels de recolonisation et de l'effet des opérations de reboisement (réussite ou échec) sur l'état actuel du couvert forestier près de ses limites supérieures. Deux analyses complémentaires sont mises en œuvre : 1) une analyse de documents d'archives concernant le déroulement du reboisement et l'évolution de la superficie boisée ; 2) une analyse dendrochronologique à la limite supérieure de la forêt et dans les peuplements situés au-dessus, pour évaluer l'âge des arbres et l'impact des principaux facteurs environnementaux sur leur croissance. Les espaces boisés situés au-dessus de la forêt se révèlent être des restes de la reforestation. La plupart des arbres plantés n'ont pas survécu. La régénération naturelle n'a pas pris le relais des plantations. Pourtant, les contraintes climatiques altitudinales ne peuvent être considérées comme des facteurs limitatifs majeurs de la croissance radiale sur le site. Il semblerait que la cause réelle de cet échec soit le changement de substrat, qui intervient à partir de 2000 m d'altitude. En dessous de cette barre, la restauration de la forêt est un succès, même sur les terrains difficiles à coloniser comme les anciennes prairies. À l'intérieur même des plantations, les processus naturels prennent le relais des opérations de reboisement.

**ABSTRACT** *Reforestation and natural dynamics in the subalpine forests (Haut-Verdon, southern Alps, France).* This study comes within the framework of the researches on the restoration of degraded forests. In France, the high altitude forest, which has been destroyed after centuries of pastoral use, was replanted 100 years ago in order to stabilize severely eroded soils. A century later, we try to measure the present state of reforestation on a southern Alps site. The objective was to point out the natural colonizing processes and the reforestation impacts (success or failure) on the present state of the forest at its upper limit. This research is based on two concerns: 1) analysis of some archives documents providing informations on the reforestation timing and wooded areas evolution; 2) dendrochronological analysis of the upper forest limit and tree-line stands to estimate the stand ages and the influence of some environmental factors on tree growth. The results indicate that outlying stands at the tree-line above the present forest limit are remnants of reforestation stages. Most of the planted trees did not survive on the mountain tops. Natural regeneration did not take over the plantation. The altitudinal climatic constraint cannot be accounted as a limiting growing factor at this site. It seems that the reforestation failure at higher altitudes was rather caused by substrate changes from 2000 m and above. Below this level, forest restoration has been successful even on unfavourable lands, like ancient pastures. Within the planted forest, natural processes contribute to reforestation.

**ZUSAMMENFASSUNG** *Wiederaufforstung und natürliche Dynamik in den subalpinen Wäldern (Haut-Verdon, Südalpen, Frankreich).* Diese Untersuchung fügt sich in die Welle von Forschungen über die Wiederherstellung der erodierten Wald-Ökosysteme ein. In Frankreich hat man den Hochwald, der für Weidezwecke im Lauf der Jahrhunderte zerstört worden war, vor ungefähr 100 Jahren wiederaufgeforstet, um die damals stark erodierten Böden zu stabilisieren. Fast ein Jahrhundert später haben wir versucht, für einen Platz in den Südalpen Bilanz über diese Wiederaufforstungsarbeiten zu ziehen. Das Ziel war dabei zu bestimmen, welchen relativen Einfluss die natürlichen Wiederbewuchsprozesse einerseits und die Aufforstungsarbeiten andererseits (Erfolg oder Scheitern) auf die gegenwärtige Bewaldung an ihrer oberen Grenze gehabt haben. Zwei komplementäre Analysen werden benutzt : 1) die Analyse von Archivmaterial über den Ablauf der Wiederaufforstung und die Entwicklung der bewaldeten Fläche ; 2) eine dendrochronologische Analyse an der oberen Waldgrenze und in den darüberliegenden Baumbeständen, um das Alter der Bäume und die Auswirkung der Hauptumweltfaktoren auf ihr Wachstum zu bestimmen. Die oberhalb des Waldes liegenden bewaldeten Flächen erweisen sich als Reste der Wiederaufforstung. Die Mehrzahl der gepflanzten Bäume hat nicht überlebt. Die natürliche Regeneration hat die Pflanzungen nicht abgelöst. Und doch können die klimatischen Zwänge der Höhe nicht als der Haupthinderungsfaktor für das radiale Wachstum an dem Platz angesehen werden. Es scheint eher, dass der wahre Grund für diesen Misserfolg der Wechsel im Substrat ist, der ab 2000 m Höhe auftritt. Unterhalb dieses Niveaus ist die Wiederaufforstung ein Erfolg, selbst auf den schwer zu bepflanzenden Gründen wie den alten Weiden. Innerhalb des gepflanzten Waldes treten die natürlichen Prozesse an die Stelle der Wiederaufforstungsarbeiten.

## INTRODUCTION

Dans plusieurs régions forestières du monde l'intérêt des scientifiques se polarise sur les problèmes de restauration des écosystèmes forestiers dégradés. L'utilité des plantations est souvent discutée. Dans la plupart des cas, elles semblent accélérer la restauration de la forêt en créant un environnement favorable à l'installation et la régénération des espèces primaires (Haggard *et al.*, 1997 ; Zhuang, 1997 ; Parrotta *et al.*, 1997). Toutefois la variété des espèces plantées semble conditionner de façon notable la biodiversité future de l'écosystème restauré (Parrotta *et al.*, 1997 ; Allen, 1997). Malheureusement, les initiatives de reforestations sont plutôt récentes (moins de 50 ans) et n'offrent que peu de recul pour apprécier leur efficacité. Dans ce contexte, les terrains de montagne du sud de la France, déboisés depuis des siècles à des fins pastorales puis reboisés il y a près de 100 ans, apparaissent comme des sites privilégiés pour une étude de l'évolution à moyen terme d'une forêt plantée.

À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, la plupart des versants des Alpes françaises du Sud étaient dépourvus de peuplements forestiers. Un siècle plus tard, même si la situation est inégale selon les zones géographiques, il n'est pas rare de rencontrer de très belles forêts que le promeneur non informé qualifie facilement d'espaces naturels. En fait, ces forêts sont le résultat du vaste effort de reboisement entrepris à la fin du XIX<sup>e</sup> sous l'impulsion de Surret (1872), ingénieur de la société d'État des Eaux et Forêts. L'objectif majeur, en restaurant le couvert végétal, était de stabiliser les sols et d'enrayer ainsi l'érosion massive des versants, qui entraînait des crues dévastatrices dans les vallées. Ce programme de grande envergure fut nommé : Restauration des Terrains de Montagne (RTM).

Le site d'étude (fig. 1) s'inscrit dans les aires géographiques ayant fait l'objet de ces grands travaux de reboisement. Les peuplements forestiers du bassin du torrent de Saint-Pierre, dans les Alpes de Haute-Provence, s'échelonnent entre 1300 et 2000-2100 m d'altitude, et sont actuellement constitués de sapins (*Abies alba* Mill.) et pins à crochet (*Pinus uncinata* L.) à basse altitude, de mélèzes (*Larix decidua* Mill.) et d'arolles (*Pinus cembra* L.) à haute altitude. Ils incluent, dispersés dans l'ensemble des versants, une cinquantaine d'arbres (mélèzes et sapins) pluricentennaires. On observe également, au-dessus de cette forêt, quelques petits groupes d'arbres. Différents travaux de recherche portant sur l'évolution du couvert forestier dans le contexte actuel du réchauffement planétaire, ont mis en évidence des changements substantiels dans les formes de croissance des arbres, la densité ou la progression des forêts aux plus hautes latitudes et aux plus hautes altitudes. Depuis la fin du Petit Âge glaciaire, les krummholzs de l'écotone forêt-toundra semblent évoluer vers une structure arborée à travers un développement accru des tiges verticales supranivales (Lavoie et Payette, 1994 ; Lescop-Sinclair et Payette, 1995 ; Hessler et Baker, 1997) et la densité des populations semble augmenter (Szeicz et MacDonald, 1995) sans qu'il y ait pour autant établissement de nouveaux individus issus de

graines dans la toundra. Cependant, dans certaines montagnes américaines, la fin du XIX<sup>e</sup> et le XX<sup>e</sup> siècle coïncident avec une période d'établissement de nouveaux arbres dans la zone subalpine (Taylor, 1995 ; Heikkinen, 1984).

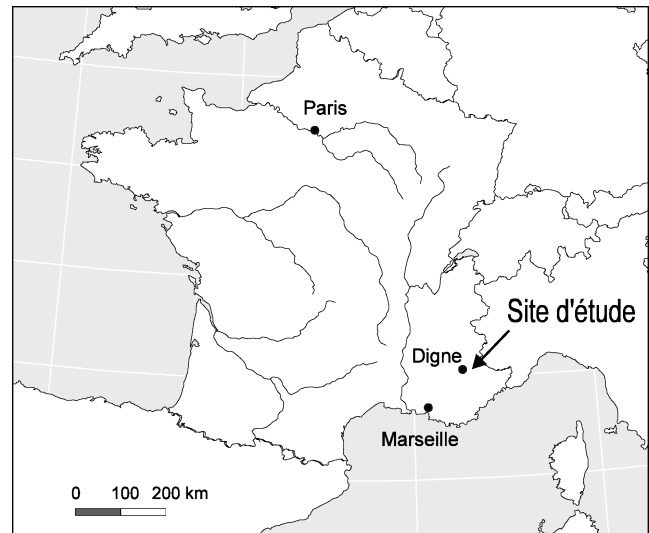


FIGURE 1. Localisation du site étudié.  
Location of the studied site.

Sachant que le site étudié a été restauré par plantation, il est impératif de connaître l'origine, naturelle (pionniers) ou plantée (résidus RTM), de ces arbres au-dessus de la forêt, afin de pouvoir dresser, avec 100 ans de recul, le bilan de cette opération de reforestation.

L'objectif de cette étude peut être résumé en trois points :

1. obtenir l'âge maximal des individus situés au-dessus de la limite supérieure actuelle de la forêt afin de savoir s'ils ont été plantés et constituent un reste des reboisements qui auraient alors échoué aux plus hautes altitudes du site, ou si leur installation est postérieure aux plantations et représente une poussée de colonisation susceptible d'être rattachée aux conditions climatiques favorables du XX<sup>e</sup> siècle.
2. Apprécier à travers la différence de production ligneuse en limite supérieure de la forêt et au-dessus de la forêt, quels sont les facteurs les plus limitatifs de la croissance sur le site. Avec un climat plus chaud, souvent invoqué pour expliquer l'augmentation de croissance radiale des cent dernières années pour plusieurs espèces d'arbres (Becker, 1989 ; Bert, 1992 ; Becker *et al.*, 1994 ; Picard, 1995 ; Cook, 1991 ; Nola, 1994 ; Belingard, 1996 ; Jacoby *et al.*, 1996 ; Villalba *et al.*, 1997), comment interpréter un éventuel échec des reboisements au-dessus de 2100 m d'altitude ?
3. Évaluer l'effet de l'amélioration des conditions climatiques sur la croissance des jeunes arbres en comparant, à âge cambial égal, la croissance radiale au cours du XX<sup>e</sup> siècle à celle d'autres siècles.

## MATÉRIEL ET MÉTHODE

Cette étude fait appel à deux sources d'information différentes. Dans le but de cerner la dynamique de l'étendue du couvert forestier sur le territoire étudié pour les 100 dernières années, les documents d'archives relatifs au déroulement des travaux de reboisements ont été rassemblés. Par ailleurs, certains groupes d'arbres ont été échantillonnés en vue d'une étude dendrochronologique.

### ANALYSE DES DOCUMENTS D'ARCHIVES

Le territoire étudié s'étend sur deux communes, celle de Beauvezer au nord du torrent et des gorges de Saint-Pierre, et celle de Thorame-Haute au sud. L'utilisation de plusieurs types de documents d'archives permet de rassembler un maximum d'information concernant l'occupation des terrains, avant, pendant et après les plantations, les espèces plantées, la chronologie et la localisation des plantations. Il est ainsi possible de retracer les variations de la superficie boisée (diminution ou augmentation), notamment aux plus hautes altitudes du site, depuis les premières plantations jusqu'à aujourd'hui.

\* Deux rapports de la Société des Eaux et Forêts datant de 1884, et rédigés à la suite d'une étude de terrain, présentent un état des lieux des communes (occupation des terrains, problèmes d'érosion, d'éboulements...) et précisent quels sont les terrains jugés prioritaires pour le reboisement. Ces rapports sont accompagnés de cartes à 1/20 000, dessinées d'après les plans cadastraux, et de quelques documents photographiques. Les terrains sont classés en trois types : « pâtures, vagues, arides ». En l'absence de toute définition, le mot « vague » a été interprété comme un stade intermédiaire entre les terrains utilisables par les troupeaux (« pâtures ») et ceux pratiquement dépourvus de végétation (« arides »). Les photographies datant de 1896 ne permettent pas de différencier ces terrains, mais confirment l'absence des arbres à l'exception des quelques vieux individus dispersés sur les versants.

\* Des inventaires (dates, nombres de plants et de graines de chaque espèce mis en terre) permettent de suivre les étapes du reboisement dans les deux communes, mais sans préciser quelles parcelles recevaient ces différentes séries de plantations. Cependant, une planification des reboisements, proposée en 1884 sous la forme d'une carte à 1/20 000, accompagnait ces inventaires. Elle présente un découpage du territoire en zones auxquelles une date de plantation a été attribuée.

\* Deux cartes (toujours des dessins d'après plan cadastral à 1/20 000) complètent en partie ces inventaires ; elles ont été réalisées en 1913 pour Beauvezer et en 1923 pour Thorame-Haute, et constituent le premier bilan connu sur le résultat des travaux de restauration. On y trouve des parcelles « reboisées complètement ou déjà réfectionnées », d'autres « à réfectionner présentement » et enfin des parcelles « à reboiser » ; ce qui laisse à penser que beaucoup de plants n'avaient pas pris. Apparemment, les forestiers utili-

saient le terme « à réfectionner » pour désigner les terrains sur lesquels il était nécessaire d'effectuer de nouvelles séries de plantations.

\* Une feuille de la carte topographique d'État Major de 1900 à 1/20 000, dans sa version révisée de 1932, couvrait également le territoire étudié. Bien que les limites des forêts ne soient pas tracées, un symbole permet d'identifier les zones boisées et celles qui ne le sont pas.

Un dernier document a été considéré pour mieux apprécier le résultat de ces reboisements. Il s'agit de la carte à 1/25 000 de l'Institut géographique national, réalisée en 1990 ; elle permet d'apprécier l'étendue actuelle des espaces boisés. Elle a également servi de fond pour reporter les informations fournies par les documents cartographiques d'archives (fig. 2 A, B, C et D).

### ANALYSE DENDROCHRONOLOGIQUE

La dendrochronologie permet, par le comptage des cernes, d'obtenir de façon objective et précise l'âge d'un échantillon d'individus, et par la mesure de ces cernes, de comparer la production ligneuse d'un groupe d'individus à un autre. Elle devrait apporter une réponse aux questions suivantes :

1. Les mélèzes situés au-dessus du mélézin ont-ils été plantés ou se sont-ils établis après les dernières plantations ? Certaines cartes sont peu précises (par ex., celle de 1932) et il importe de vérifier que l'âge des arbres soit cohérent avec la répartition des forêts donnée par ces documents d'archives.
2. Quels sont les facteurs - altitude, exposition, fermeture du milieu, climat - qui influent le plus sur la croissance radiale en altitude, dans la forêt et sur les sommets ? Dans quelle mesure expliquent-ils soit un échec de la restauration de la forêt au-dessus de 2100 m, soit une vague de colonisation depuis la nouvelle forêt plantée vers les sommets ?

Cinq groupes d'arbres ont été échantillonnés (tabl. I), trois de mélèzes et deux de sapins. Les arbres ont été sondés à la tarière Pressler, à raison de deux carottes prises parallèlement à la courbe de niveau.

Pour répondre à la première question (âge des arbres) et évaluer l'influence sur la croissance radiale, des facteurs tels que l'altitude, l'exposition et la fermeture du milieu, trois populations de mélèzes croissant dans des milieux différents, en limite supérieure de la forêt et dans les espaces boisés au-dessus de la forêt, ont été sélectionnées (tabl. I). Les arbres les plus gros ont été sondés pour obtenir l'âge maximal de chaque population :

- 12 arbres dans le mélézin (limite altitudinale de la forêt), à 2000 m d'altitude, en exposition nord (L2).
- 12 arbres dans un peuplement mixte de mélèzes et d'arolles situé au-dessus de la forêt, à 2300 m d'altitude, en exposition sud (L1).
- 12 arbres dans une formation ouverte de mélèzes située au-dessus de la forêt, à 2350 m d'altitude, en exposition sud-ouest (L3).

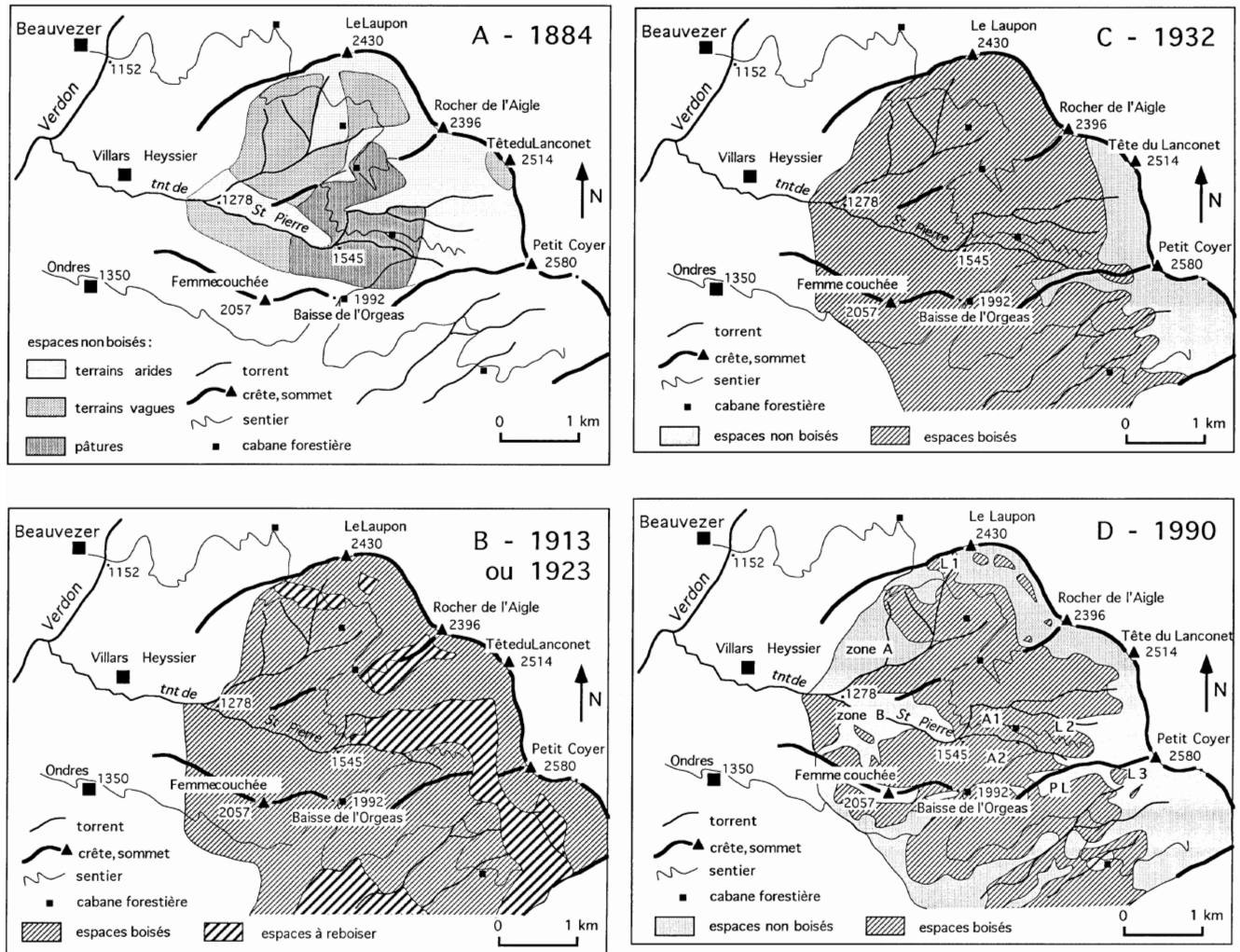


FIGURE 2. Évolution des superficies boisées sur les versants du torrent de Saint-Pierre. Les informations fournies par les différents documents d'archives ont été reportées sur la carte de l'Institut géographique national à 1/25 000 (3540 Ouest). A) Occupation des terrains en 1884. B) État des plantations en 1913 (commune de Beauvezer, moitié nord) ou en 1923 (commune de Thorame-Haute, moitié sud). « Espaces boisés » : terrains sur lesquels les premières plantations ont été un succès et les terrains ayant fait l'objet de nouvelles plantations après l'échec partiel des premières. « Espaces à reboiser » : terrains sur lesquels les plantations sont à refaire. C) Étendue de la forêt en 1932, après les dernières plantations. D) Étendue actuelle (1990) de la forêt et localisation des peuplements échantillonnés pour l'analyse dendrochronologique.

Evolution of wooded areas on the slopes of the Saint-Pierre torrent. The information provided by the old documents has been transferred to the present I.G.N. (National Geographical Institute) map ; scale 1/25000 - 3540 W. A) Land occupation for 1884. B) Result of the 1913 (Beauvezer district, northern part) or 1923 (Thorame-Haute district, southern part) plantings. "Espaces boisés" : lands where the first plantings were a success plus the lands where the first plantings were not a success and that were replanted. "Espaces à reboiser" : lands needing replanting. C) wooded areas in 1932, after the last plantings. D) Present (1990) wooded areas and location of the sampled stands of the dendrochronological analysis.

TABEAU I

Caractéristiques du matériel dendrochronologique

Chronologie	L1	L2	L3	A1	A2
Espèce	<i>Larix decidua</i>	<i>Larix decidua</i>	<i>Larix decidua</i>	<i>Abies alba</i>	<i>Abies alba</i>
Effectif	7	8	11	9	6
Altitude (m)	2300	2000	2350	1750	1750
Exposition	Sud	Nord	Sud-Ouest	Nord	Nord
Type de peuplement	mixte mélèze-arolle	mélézin	formation ouverte de mélèzes	sapinière	inconnu (pour la période analysée)

Les séries de cernes ont ensuite été interdatées ; après repérage des cernes diagnostiques sous une loupe binoculaire, les cernes ont été comptés afin d'attribuer à chacun l'année de sa formation (Fritts et Swetnam, 1986), puis mesurés avec une précision théorique de 1/100 mm grâce à la machine d'Eklund. En fonction de la hauteur des sondages, 5 à 10 ans ont été ajoutés à la date du premier cerne pour obtenir l'âge réel de l'arbre (date de germination) et lorsque la moelle n'apparaissait pas sur les carottes, le nombre de cernes manquant a été estimé à l'aide d'une cible, selon la méthode utilisée par les forestiers (Motta, 1996).

L'appréciation de l'influence du réchauffement climatique du XX<sup>e</sup> siècle sur la croissance des jeunes arbres passe par la comparaison de la production ligneuse actuelle avec celle des siècles précédents. Une telle comparaison nécessite la mise en œuvre de chronologies construites à partir de vieux arbres. De longues chronologies de cernes, établies lors d'une étude antérieure (Belingard, 1996 ; Belingard et Tessier, sous presse), à partir de carottes prélevées sur les quelques individus pluricentennaires du site, ont été exploitées.

Cependant, il existe entre les sujets jeunes, matures ou sénescents, des différences importantes de comportement et de sensibilité aux facteurs environnementaux (Bert, 1992 ; Picard, 1995). Seule une comparaison à âge cambial égal permet de s'affranchir de cette tendance d'âge.

Dans le cas présent, la comparaison devait porter sur les 100 premières années de vie des arbres. On s'est alors heurté à un problème de disponibilité des mesures des premiers cernes de croissance pour les vieux individus (centre des troncs pourris) et l'âge cambial du premier cerne mesuré a dû être estimé pour chaque arbre. Un calcul simple mettant en jeu le rapport entre le rayon (calculé à partir de la circonférence) et le nombre de cernes correspondants, de l'arbre incomplet et d'un arbre de référence complet (c'est-à-dire avec la moelle) a permis d'estimer pour chaque sujet, le nombre de cernes manquant entre la première mesure et la moelle (Belingard et Tessier, sous presse). Bien sûr, les arbres incomplets et les arbres de référence avaient vécu au moins en partie à la même époque et les chronologies correspondantes étaient parfaitement interdatées.

La comparaison à âge cambial égal s'est révélée impossible pour les mélèzes car les premiers cernes mesurés chez les vieux individus correspondaient à un âge cambial de plus de 100 ans. En revanche, elle était réalisable pour les sapins. L'âge cambial du premier cerne mesuré est inférieur à 100 ans pour six sapins (A2) (tabl. I). Le premier cerne mesuré de l'individu le plus vieux est daté de 1680 et le 100<sup>e</sup> cerne mesuré du sapin le plus jeune (hors plantation) est daté de 1806, ce qui permet de comparer les conditions de croissance du XX<sup>e</sup> siècle à celles du XVIII<sup>e</sup> siècle.

Pour mener à bien la comparaison, douze des sapins plantés ont été sondés, interdatés et mesurés (A1) (tabl. I). Ils ont été choisis parmi les plus gros dans une sapinière en exposition nord, à 1750 m d'altitude (même exposition et même altitude que les vieux sapins).

Toutes les chronologies présentées dans cette étude sont des chronologies de surface de cernes. À défaut de pouvoir calculer le volume de bois produit chaque année, la surface des cernes donne une meilleure image de la production annuelle de bois que la largeur des cernes. La transformation des largeurs en surfaces permet surtout de s'affranchir du patron de croissance classique, selon lequel la largeur des cernes diminue quand l'âge cambial augmente, simplement parce que la quantité de bois produite est répartie sur un périmètre plus grand (facteur géométrique). Les chronologies de surfaces de cernes sont calculées à partir des chronologies individuelles de largeurs de cernes (c'est-à-dire la moyenne des deux ou trois carottes prélevées sur le même arbre). Les anneaux de croissance annuels sont supposés être concentriques. À partir de la surface du disque correspondant au cerne initial et par incrémentation du rayon, la surface de l'anneau de bois produit chaque année est calculée. Si le centre de la carotte est absent, la circonférence de l'arbre et l'épaisseur de l'écorce sont alors mesurées ; dans ce cas, le calcul commence par l'évaluation de la surface de la section du tronc (sans l'écorce). Les surfaces des cernes successifs sont ainsi calculées de proche en proche par soustraction.

Un certain nombre de carottes ont été rejetées au cours de ces opérations (problèmes à l'interdatation, patrons de croissance anormaux...) ; le taux de rejet est de 27 % pour l'ensemble de l'échantillon.

Pour chaque chronologie moyenne de surfaces, la valeur du cerne moyen (mm<sup>2</sup>) sur une partie ou toute la longueur de la chronologie a été calculée. Cette variable permet d'approcher globalement les productivités des peuplements pour les périodes considérées et de les comparer statistiquement.

## RÉSULTATS

### RECONSTITUTION DU DÉROULEMENT DES TRAVAUX DE REBOISEMENT ET ÉVOLUTION DE LA SURFACE BOISÉE

Les quatre cartes (fig. 2 A, B, C et D) dessinées d'après les documents d'archives ont permis de reconstituer l'évolution de la surface boisée sur le site au cours des 100 dernières années. La carte de 1884 montre quelle était l'occupation des terrains avant les plantations. Celles de 1913 - 1923 puis de 1932 constituent un bilan des surfaces boisées 15 à 20 ans après les premières plantations et à la fin de l'opération après les dernières plantations. La carte de 1990 permet quant à elle d'apprécier l'évolution naturelle de l'étendue de la jeune forêt en 60 ans.

La carte de 1884 (fig. 2A) révèle que la plus grande partie du territoire étudié était dépourvue de végétation. Sur cette zone, très dégradée par l'érosion (terrains vagues ou arides), seulement un quart de la superficie était encore utilisable comme pâturage. Il n'est pas surprenant que les forestiers aient jugé que les sols devaient être stabilisés et que la zone ait été classée prioritaire pour la restauration de son couvert végétal. D'après les inventaires et la carte de

planification, tous les versants auraient été plantés ou semés jusqu'au sommet en sapin, mélèze, pin cembro et pin à crochet selon l'altitude.

La carte de 1913-1923 (fig. 2 B) permet d'apprécier la réussite des reboisements entre 15 et 25 ans après le début des travaux. La plupart des versants sont entièrement reboisés ou ont déjà été « réfectionnés » (espaces boisés sur la fig. 2B) ; rappelons que les zones « réfectionnées » correspondent aux terrains pour lesquels les plantations avaient peu ou pas réussi et qui ont dû être plantées à nouveau. Les zones à reboiser en 1923 correspondent grossièrement aux terrains qui étaient pâturés avant le début des travaux. En comparant les figures 2D et 2B, on s'aperçoit que le secteur de la population L1, constituée aujourd'hui de mélèzes et arolles (2300 m), était déjà boisé en 1913, mais que les parcelles situées à 2000 m et correspondant au mélézin actuel (L2), celles situées à 2350 m (L3), et la sapinière située à 1750 m (A1) étaient encore en partie ou complètement à reboiser en 1923.

La carte d'État Major de 1932 (fig. 2C) fournit un état des lieux après les dernières restaurations effectuées. Le symbole de la forêt figure sur tous les versants ; seules, certaines zones parmi les plus escarpées telles que la Tête du Lançonnet et le Petit Coyer, et le plateau de Pisse-en-l'air (PL, voir fig. 2D) semblent déjà dépourvus de forêt. Toutefois, cette carte ne comporte aucune information concernant la densité des peuplements, et on ignore à partir de quelle concentration d'arbres les terrains ont été répertoriés comme boisés.

Entre 1932 et 1990, la superficie de la forêt a diminué. D'une manière générale, les arbres n'ont pas survécu sur les sommets - la limite supérieure de la forêt a encore perdu de l'altitude par rapport à 1932 - et le long des vallons (fig. 2D).

#### L'ÂGE DES ARBRES ATTESTE QUE LES PEUPELEMENTS ÉCHANTILLONNÉS ONT ÉTÉ PLANTÉS

Les documents d'archives semblent indiquer que tout le secteur a été planté, sommets compris. Incapable de perdurer aux plus hautes altitudes, la forêt aurait ensuite perdu du terrain. Mais en 60 ans (1932-1990) la forêt plantée a pu complètement disparaître des sommets puis, à la faveur de conditions environnementales plus favorables, réapparaître sous la forme de petits groupes pionniers. La détermination de l'âge maximal des arbres en limite supérieure de la forêt (L2 et A1) et dans les boisés situés au-dessus (L1 et L3) a permis de lever le doute (tabl. II). Les dates des premiers cernes mesurés sont comprises entre 1902 et 1959 ; en tenant compte de la hauteur du prélèvement par rapport au collet, on a estimé que les premiers cernes de croissance avaient été formés entre 1892 et 1949.

Les arbres échantillonnés dans le mélézin à 2000 m (L2), dans la sapinière à 1750 m (A1) et dans le peuplement mixte de mélèzes et d'arolles à 2350 m (L1) ont tous été plantés : leur première année de croissance est antérieure à 1932. En

TABLEAU II

*Années du premier cerne mesuré et premières années de croissance pour les arbres impliqués dans les chronologies L1, L2, L3 et A1*

Chronologie	L1	L2	L3	A1
Année du premier cerne mesuré	1902 à 1926	1906 à 1931	1935 à 1958	1918 à 1959
Première année de croissance	1892 à 1916	1900 à 1926	1927 à 1949	1908 à 1925

revanche, une partie des mélèzes situés à 2300 m (4 sur 11) n'ont pu être plantés car leur première année de croissance est postérieure à 1932 ; ces individus sont forcément le produit d'une régénération naturelle.

#### FACTEURS LIMITANT LA CROISSANCE RADIALE DES ARBRES EN ALTITUDE

Les chronologies de surfaces de cernes et leurs effectifs sont présentés en figure 3 A et B. Les principales caractéristiques de la population correspondant à la chronologie ainsi que l'intervalle de confiance de la surface du cerne moyen sont précisés dans la légende. Les chronologies des mélèzes sont exprimées en fonction du temps par ex., la valeur du cerne de 1950 de L1 est la moyenne des cernes produits en 1950 ; les chronologies des sapins sont exprimées en fonction de l'âge cambial par ex., la valeur du cerne 51 de A1 est la moyenne des cernes produits à 51 ans).

La comparaison des cernes moyens des différentes populations de mélèzes et de sapins est résumée en figure 4. Avec 5 % de risque d'erreur, on peut dire que :

- la croissance moyenne des mélèzes dans le peuplement mixte situé à 2300 m (L1 - exposé sud) est inférieure à celle des mélèzes du mélézin à 2000 m (L2 - exposé nord) et des mélèzes à 2350 m (L3 - exposé sud-ouest).
- par contre, la croissance radiale moyenne de la population L2 n'est pas différente de celle de L3.
- la croissance des jeunes sapins du XX<sup>e</sup> siècle (A1) est supérieure à celle des jeunes sapins au XVIII<sup>e</sup> siècle (A2).

L'altitude ne semble donc pas être un facteur limitatif majeur pour la croissance radiale du mélèze, puisque la population la plus élevée (L3, 2350 m) présente un accroissement radial moyen au moins équivalent à celui de la population en limite supérieure de la forêt (L2, 2000 m). Il est difficile de mettre en évidence le rôle de l'exposition dans la mesure où la palette des expositions est restreinte. Cependant, il faut noter que L1 (mélèzes et arolles, 2300 m, sud) et L3 (mélèzes, 2350 m, sud-ouest), pour des altitudes et des expositions comparables, ont des croissances moyennes différentes.

Pour une altitude et une exposition données, les conditions environnementales susceptibles de varier dans le temps (climat ? compétition ?) sont plus favorables à la croissance radiale des sapins au XX<sup>e</sup> siècle qu'elles ne l'étaient au XVIII<sup>e</sup> siècle.

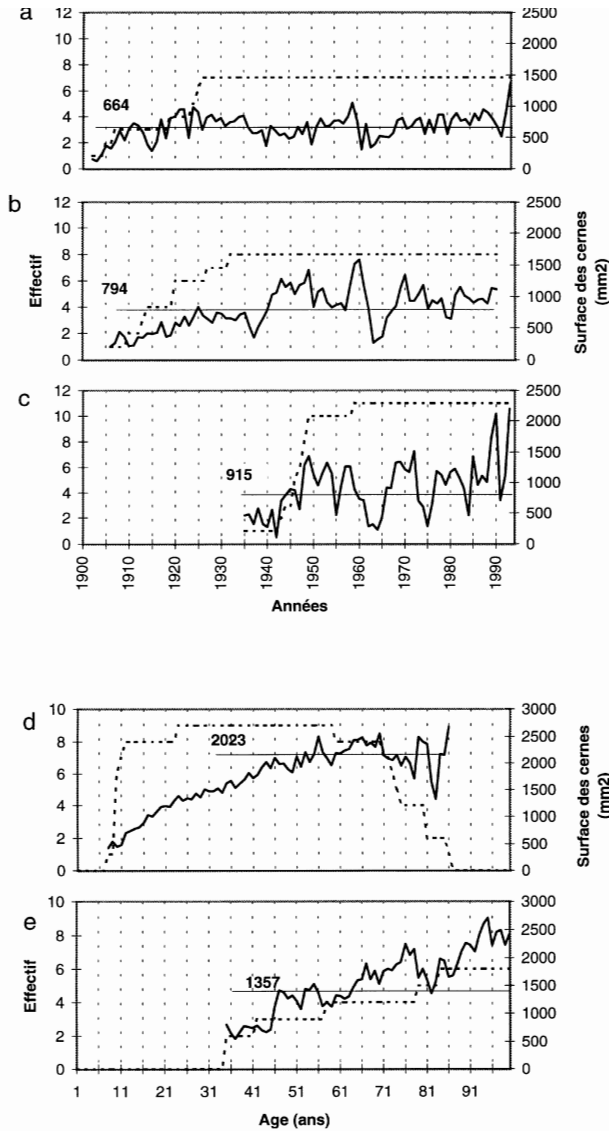


FIGURE 3. Chronologies moyennes des surfaces des cerne et leurs effectifs. a, b, c : Croissance des mélèzes (a) dans le peuplement mixte d'arolles et de mélèzes situé au dessus de la forêt (2300 m - L1) ; P ( $621 \text{ mm}^2 < \text{cerne moyen (CM)} < 707 \text{ mm}^2$ ) = 95 %. (b) Dans le mélèzin, en limite supérieure de la forêt (2000 m - L2) ; P ( $725 \text{ mm}^2 < \text{CM} < 863 \text{ mm}^2$ ) = 95 %. (c) Dans le peuplement ouvert de mélèzes situé au dessus de la forêt (2350 m - L3) ; P ( $804 \text{ mm}^2 < \text{CM} < 1026 \text{ mm}^2$ ) = 95 %. Le cerne moyen (CM) est calculé sur la longueur de chaque chronologie. d et e : croissance, à âge cambial égal, des sapins (d) Au XX<sup>e</sup> siècle sur la période 1918-1994 pour les jeunes sapins plantés (A1) ; P ( $1943 \text{ mm}^2 < \text{CM} < 2103 \text{ mm}^2$ ) = 95 %. (e) au XVIII<sup>e</sup> siècle, de 1680-1806, c'est-à-dire pour la période juvénile des vieux sapins (A2) ; P ( $1177 \text{ mm}^2 < \text{CM} < 1556 \text{ mm}^2$ ) = 95 %. Le cerne moyen (CM) est calculé entre 35 et 100 ans.

Mean ring area chronologies and strength of the samples. a, b, c : larches growth (a) In the *Pinus cembra* and *Larix decidua* stand situated above the forest (2300 m - L1) ; P ( $621 \text{ mm}^2 < \text{average ring (AR)} < 707 \text{ mm}^2$ ) = 95 %. (b) In the larch forest at timberline (2000 m - L2) ; P ( $725 \text{ mm}^2 < \text{AR} < 863 \text{ mm}^2$ ) = 95 %. (c) In the open larch stand above the forest (2350 m - L3) ; P ( $804 \text{ mm}^2 < \text{AR} < 1026 \text{ mm}^2$ ) = 95 %. The average ring (AR) is calculated for the whole chronology. d and e : firs growth, at the same cambial age. (d) during the 20th century from 1918 to 1994 for the young firs planted (A1) ; P ( $1943 \text{ mm}^2 < \text{AR} < 2103 \text{ mm}^2$ ) = 95 %. (e) During the 18th century from 1680 to 1806, i.e. the youth period of the old firs (A2) ; P ( $1177 \text{ mm}^2 < \text{AR} < 1556 \text{ mm}^2$ ) = 95 %. The average ring (AR) is calculated between 35 and 100 years.

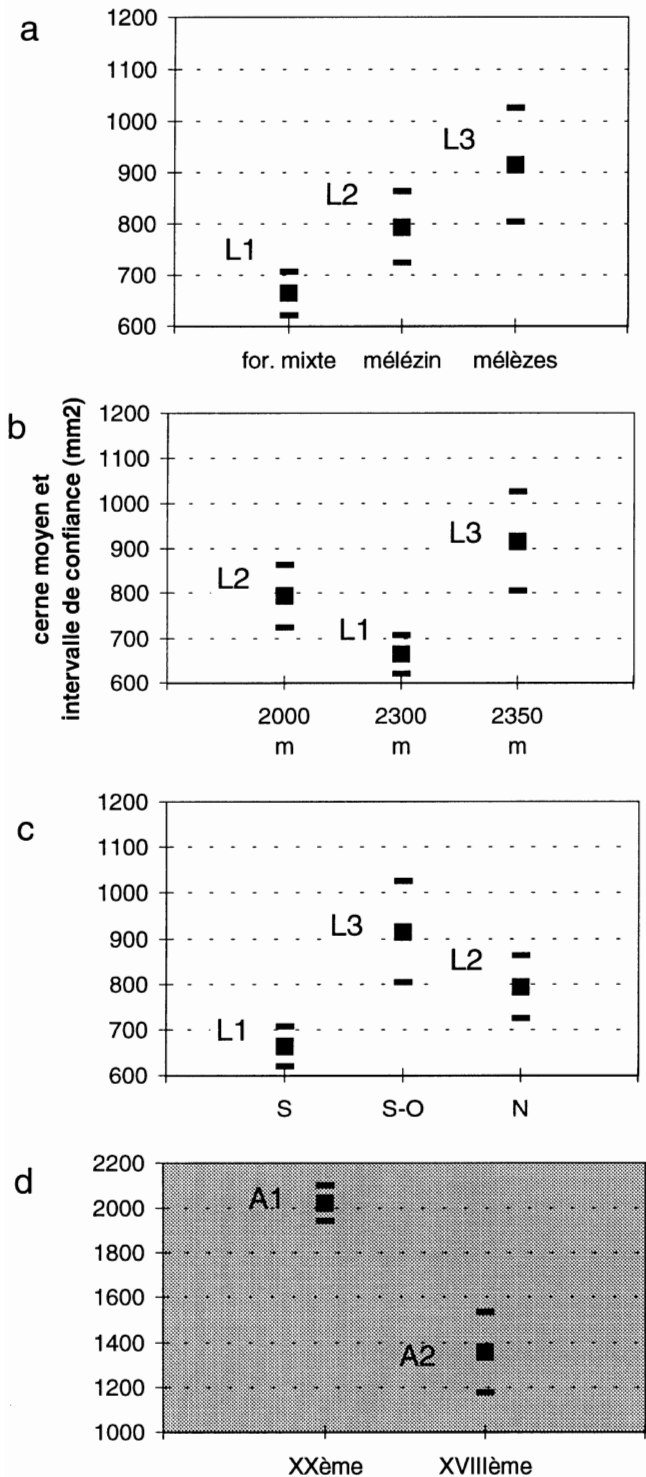


FIGURE 4. Figure de synthèse : croissance des mélèzes (L1, L2 et L3 à la fig. 3) en fonction (a) du type de peuplement, (b) de l'altitude et (c) de l'exposition. Croissance des sapins à âge cambial égal (A1 et A2 à la fig. 3) en fonction du siècle (d).  
Synthesis figure: larches growth (L1, L2 and L3, cf. Fig. 3) depending on stand structure (a), elevation (b) and exposition (c). Firs growth, at the same cambial age (A1 and A2, cf. Fig. 3), depending on the century (d).



## DISCUSSION

### LA RESTAURATION DE LA FORÊT A ÉCHOUÉ AU-DESSUS DE 2100 M D'ALTITUDE

La confrontation des données issues de l'analyse des documents d'archives et de l'analyse dendrochronologique montre que L1, L2 et A1 ne comportent que des individus issus des reboisements, certains plantés lors des premiers travaux, d'autres plus tard pendant les « réfectionnements ». En revanche, les dernières plantations ayant été réalisées en 1932, seuls les plus vieux arbres du peuplement de mélèzes situé à 2350 m (L3) ont pu être plantés, les plus jeunes sont des individus de régénération naturelle.

Dans la mesure où les individus les plus gros ont été échantillonnés, il n'est pas possible d'affirmer que les peuplements en place au-dessus de la limite de la forêt ne comprennent pas des arbres issus d'une régénération naturelle. Mais en aucun cas, l'ensemble du peuplement ne peut être considéré comme un groupe d'arbres pionniers, signe d'une extension de la forêt en altitude.

Si la restauration de la forêt est un succès jusqu'à environ 2000 m d'altitude, les quelques zones boisées qui se sont maintenues au-dessus témoignent d'un échec du reboisement sur les sommets. Dans la zone sommitale est du territoire, la manifestation de cet échec est probablement apparue assez rapidement car les espaces déjà cartographiés comme étant déboisés sur la carte de 1932 correspondent bien aux espaces déboisés en 1990. Par la suite (entre 1932 et 1990), la forêt s'est fragmentée sur les crêtes entre le Laupon et le Rocher de l'Aigle et elle a disparu sur les sites les plus escarpés (zones A et B) et dans l'axe des ravins.

En dessous de 2000 m, la forêt a pu être restaurée, certes non sans mal (espaces à reboiser de la fig. 2B), pour des terrains difficiles à coloniser comme les anciennes pâtures (Fourchy, 1952). Au-dessus de 2000 m, l'échec est patent et on peut se demander quelles en sont les raisons.

### L'ALTITUDE ET L'EXPOSITION NE SONT PAS DES FACTEURS LIMITATIFS MAJEURS DE LA CROISSANCE RADIALE SUR LE SITE

Sur le site étudié, ni l'altitude ni l'exposition ne peuvent être a priori considérés comme des facteurs limitatifs majeurs. D'une part, la population la plus en altitude (L3, 2350 m) présente un accroissement radial moyen au moins équivalent à celui de la population à la limite supérieure de la forêt (L2, 2000 m). D'autre part, à des altitudes et des expositions comparables, les populations L1 (2300 m, sud) et L3 (2350 m, sud-ouest) ont des croissances radiales différentes.

Le facteur qui semble le mieux expliquer la faible croissance de L1 par rapport à L2 et L3 est probablement celui de la compétition, car les mélèzes L1 sont les seuls à avoir été échantillonnés dans un peuplement mixte (mélèze - arolle) dont les arbres sont en place depuis le début du siècle (espace boisé en 1913). Les arbres des populations L2

et L3 ont probablement grandi dans des formations moins denses puisqu'elles correspondent à des espaces à reboiser (au moins en partie) en 1923.

### LES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES DU XX<sup>e</sup> SIÈCLE SONT PLUS FAVORABLES À LA CROISSANCE DES ARBRES D'ALTITUDE QU'AUX SIÈCLES PRÉCÉDENTS

Pour une altitude (1750 m) et une exposition données (nord), la croissance radiale des jeunes sapins est actuellement supérieure à ce qu'elle était au XVIII<sup>e</sup> siècle (fig. 4). Le rôle possible de différents facteurs (compétition, fertilisation des sols par apports azotés atmosphériques, conditions climatiques plus favorables pour le XX<sup>e</sup> siècle ou effet direct de l'augmentation du taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère) a été discuté de façon détaillée par différents auteurs pour expliquer l'augmentation de la croissance radiale constatée pour différentes espèces dans de nombreuses régions depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle : *Abies alba* Mill. en France, dans les Vosges (Becker, 1989) et le Jura (Bert, 1992), *Larix decidua* Mill. dans le Valmenco, en Italie (Nola, 1994), *Nothofagus pumilio* dans les Andes de Patagonie (Villalba *et al.*, 1997) et *Pinus sibirica*, en Mongolie (Jacoby *et al.*, 1996).

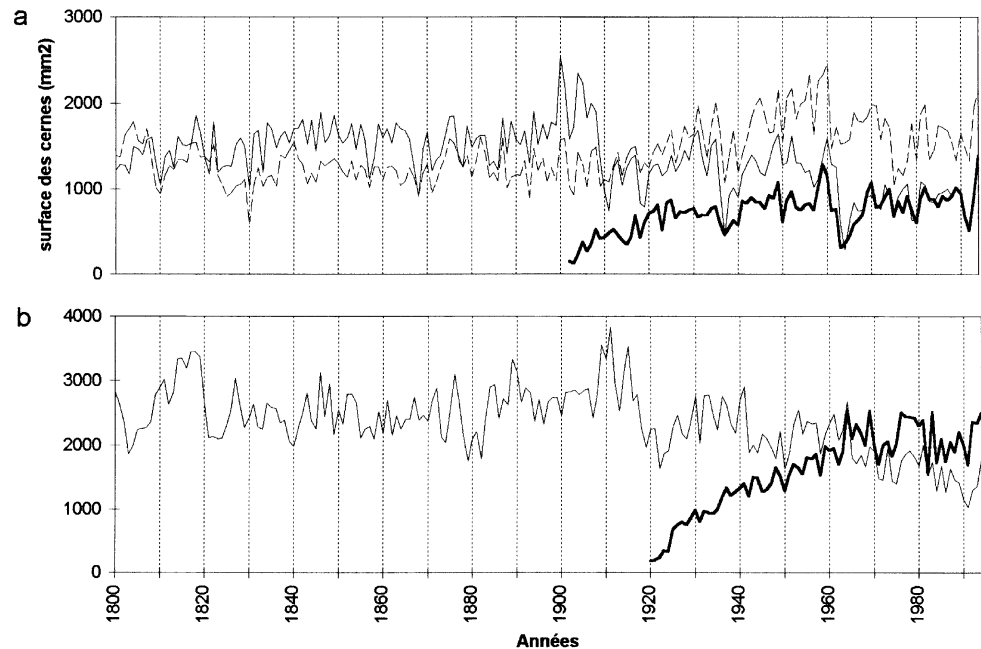
Compte tenu de l'importance de l'activité pastorale sur le site depuis le Moyen Âge (Sclafert, 1959 ; Douguedroit, 1976) et de l'état des terrains à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle (fig. 2A), il est peu probable que la sapinière (spontanée) du XVIII<sup>e</sup> siècle ait pu être plus dense que la sapinière plantée du XX<sup>e</sup> siècle. Dans la mesure où le site étudié est éloigné des centres industriels émetteurs d'éléments azotés, l'effet direct de l'augmentation des taux de CO<sub>2</sub> ou l'amélioration climatique liée à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre est l'hypothèse la plus plausible pour expliquer les gains de croissance constatés sur les populations de sapins.

Si on admet que la compétition est un facteur limitatif majeur de la croissance radiale pour le sapin comme pour le mélèze, cela signifie que le potentiel de croissance du sapin est actuellement très élevé (croissance plus forte qu'il y a deux siècles malgré une compétition plus importante). La présence, dans le mélèzin, de nombreux jeunes sapins de 30 cm à 2 m de haut semble même indiquer que cette espèce tend à sortir de l'espace que lui avaient attribué les forestiers.

Ces déductions concernant l'influence majeure de la compétition sur la croissance radiale et le rôle possible des changements globaux liés aux gaz à effet de serre sont appuyés par une confrontation entre la croissance radiale des vieux arbres du site (pour les deux derniers siècles, voir la fin des chronologies) et celle des arbres plantés (fig. 5).

Il apparaît clairement que la croissance radiale des vieux individus inclus dans les reboisements (sapins aussi bien que mélèzes) diminue à partir du moment où, dès lors qu'ils sont entourés des plantations, la compétition pour les ressources trophiques augmente. La chute de croissance est de 29 % pour les mélèzes et de 18 % pour les sapins (com-

FIGURE 5. Confrontation des chronologies issues des arbres plantés (traits épais) avec celles des vieux individus (traits fins) déjà en place avant la reforestation. (a) Les mélèzes : - 18 arbres, exposés au nord ou nord-ouest, à 2000 m d'altitude au milieu de la forêt plantée (trait fin continu), - 9 arbres, exposés au nord-ouest, à 2000 m d'altitude hors de la forêt plantée (trait fin pointillé) et - la population L2 (trait épais). (b) Les sapins : - 10 arbres, exposés au nord, à 1750 m d'altitude au milieu de la forêt plantée (trait fin) et la population A1 (trait épais). La plus grande compétition entraîne une chute de croissance pour les vieux arbres. Les vieux mélèzes restés hors de la nouvelle forêt montrent depuis un siècle une meilleure croissance que l'on pourrait relier au réchauffement de la planète ou à l'augmentation du taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique.



*Comparison between the chronologies established with the planted trees (thick lines) and the ones built with the old trees (thin lines) already on the slopes, before reforestation. (a) the larches: - 18 trees, facing north - north west, at an elevation of 2000 m, included in the planted forest (straight thin line), - 9 trees, facing north west, at an elevation of 2000 m, out of the planted forest (dotted thin line) and - stand L2 (thick line). (b) The firs: - 10 trees, facing north at an altitude of 1750 m, included in the planted forest (thin line) and - stand A1 (thick line). The increasing competition leads to the growth decrease of the old trees. The old larches stands out of the young forest (dotted thin line) show a better growth during the last century; it could be linked to global warming and/or the increased atmospheric CO<sub>2</sub>.*

paraison des cernes moyens des périodes 1800-1910 et 1910-1994). En revanche, la croissance des vieux mélèzes actuellement hors de la forêt augmente de 31 %.

#### LA FORÊT N'A PAS PU ÊTRE RESTAURÉE AU-DESSUS DE 2100 M D'ALTITUDE, PROBABLEMENT À CAUSE DE LA NATURE DU SUBSTRAT

L'échec de la restauration de la forêt au-dessus de 2000 m ne pouvant être attribué à la péjoration des conditions climatiques en altitude, d'autres explications doivent être évoquées. En fait, le facteur limitatif majeur de la croissance au-dessus de 2000 m pourrait être d'origine édaphique. En effet, cette limite altitudinale coïncide avec une discontinuité édaphique. Au-dessus de cette altitude, les calcaires du Crétacé supérieur laissent la place à des calcaires marneux et des calcschistes, et plus haut, aux grès d'Annot (Kerckhove et Monjuvent, 1979). Ces substrats différents, associés au pendage horizontal des couches sont moins favorables à l'installation d'un sol apte à retenir l'humidité nécessaire à la germination des graines (Fourchy, 1952) et au développement des jeunes plants.

### CONCLUSION

Tel qu'il apparaît de nos jours, le paysage du territoire étudié est le résultat des travaux de restauration des terrains de montagne (RTM) entrepris à la fin du siècle dernier, corrigé par les facteurs naturels. Si le mélèzin a pu être imposé

sur les anciennes prairies de pâturage par plantation, là où la régénération par germination est quasiment inexistante, le reboisement s'est avéré un échec dans les zones où la nature du substrat ne s'y prêtait pas.

Même si une évolution vers un climat plus chaud (rapport IPCC, 1995) est susceptible d'augmenter le potentiel de croissance de certaines espèces d'altitude, il est difficile de préciser si cette évolution climatique aura une action aussi bénéfique sur les processus de reproduction et, en particulier, de germination. Apparemment les facteurs limitatifs locaux tels que le sol et l'utilisation antérieure des terrains (pastoralisme) peuvent se révéler bien plus déterminants.

Dans ces conditions, on peut se demander quelle sera l'évolution de la forêt sur le territoire étudié. Une extension du mélèzin en altitude paraît donc peu probable dans l'immédiat à cause du substrat. Toutefois, il serait souhaitable de pousser plus loin l'étude des peuplements résiduels situés au-dessus de la forêt. Une analyse dendrochronologique des individus les moins gros, a priori d'implantation postérieure aux reboisements, permettrait sans doute d'évaluer la capacité de régénération au sein même de ces îlots boisés. Si l'amélioration des conditions de croissance se poursuit, et en supposant qu'elle ait aussi une action bénéfique sur la germination des graines, au point de permettre au mélèze de passer outre la barrière édaphique, ces peuplements résiduels de la reforestation pourraient alors accélérer la colonisation des sommets en servant de postes avancés.

Le sapin semble posséder actuellement un très bon potentiel de croissance et les observations de terrain révèlent une bonne capacité de régénération y compris port le mélèze jusque vers 1800 m d'altitude. Il est donc envisageable que dans quelques décennies le sapin puisse s'établir graduellement en position dominante dans les reboisements en dessous de 2000 m.

### REMERCIEMENTS

Ce travail s'inscrit dans le cadre du programme national français E.G.P.N. « Histoire, évolution et dynamique des limites supraforestières en relation avec les changements climatiques et l'action de l'homme », subventionné par le ministère de l'Environnement. Nous remercions les lecteurs, MM. Martin Jean, Claude Lavoie et un lecteur anonyme, pour leurs très utiles suggestions.

### RÉFÉRENCES

- Allen, J.A., 1997. Reforestation of bottomland hardwoods and the issue of woody species diversity. *Restoration Ecology*, 5 (2) : 125-134.
- Becker, M., 1989. The role of climate on present and past vitality of silver fir in the Vosges mountains of northern France. *Canadian Journal of Forest Research*, 19 : 1110-1117.
- Becker, M., Nieminen, T.M. et Gérémy, F., 1994. Short-term variations and long-term changes in oak productivity in northeastern France. The role of climate and atmospheric CO<sub>2</sub>. *Annales des Sciences forestières*, 51 : 477-492.
- Belingard, C., 1996. Étude dendroécologique de la dynamique de la limite supérieure de la forêt dans les Alpes du Sud, en relation avec les facteurs climatiques et anthropiques. Thèse de Doctorat. Université d'Aix-Marseille 3, 103 p.
- Belingard, C. et Tessier, L., sous presse. Trees, man and climate over the last thousand years in southern french Alps. *Dendrochronologia*.
- Bert, G.D., 1992. Influence du climat, des facteurs stationnels et de la pollution sur la croissance et l'état sanitaire du sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) dans le Jura. Étude phytoécologique et dendrochronologique. Thèse. Université de Nancy 1, 200 p.
- Cook, E.R., 1991. Tree rings as indicators of climatic change and the potential response of forests to the greenhouse effect, p. 56-64. In: R.L. Wyman, éd., *Global Climate Change and Life on Earth*. Routledge, Chapman and Hall, New York.
- Douguedroit, A., 1976. Les paysages forestiers de Haute-Provence et des Alpes Maritimes. *Édisud*, Aix-en-Provence, 550 p.
- Fourchy, P., 1952. Écologie du mélèze, particulièrement dans les Alpes françaises. *Annales Éc. Nat. des Eaux et Forêts*, 13 (1).
- Fritts, H.C. et Swetnam, T.W., 1986. *Dendroecology : A tool for evaluating variations in past and present forest environments*. Utility Air Regulatory Group Acid Deposition Committee, Hunton & Williams, Washington, D.C., 61 p.
- Haggard, J., Wightman, K. et Fisher, R., 1997. The potential of plantations to foster woody regeneration within a deforested landscape in lowland Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 99 : 55-64.
- Heikkinen, O., 1984. Forest expansion in the subalpine zone during the past hundred years, Mount Baker, Washington, U.S.A. *Erdkunde*, 38 : 194-202.
- Hessl, A.E. et Baker, W.L., 1997. Spruce-fir growth form changes in the forest-tundra ecotone of Rocky Mountain National Park, Colorado, USA. *Ecography*, 20 : 356-367.
- Jacoby, G.C., d'Arrigo, R.D. et Davaajamts, T., 1996. Mongolian tree rings and 20th-century warming. *Science*, 273 : 771-773
- Kerckhove, C. et Monjuvent, G., 1979. Carte géologique de la France au 1/250 000, coupure de Gap, Bureau de Recherche géologiques et minières, Orléans.
- Lavoie, C. et Payette, S., 1994. Recent fluctuations of the lichen-spruce forest limit in subarctic Quebec. *Journal of Ecology*, 82 : 725-734.
- Lescop-Sinclair, K. et Payette, S., 1995. Recent advance of the arctic treeline along the eastern coast of Hudson Bay. *Journal of Ecology*, 83 : 929-936.
- Motta, R., 1996. Metodi e problemi nella determinazione dell'età di alberi viventi in studi ecologici o di dinamica forestale. E. M. *Linea Ecologica*, 1 : 28.
- Nola, P., 1994. A dendroecological study of larch at timberline in the Central Italian Alps. *Dendrochronologia*, 12 : 77-91.
- Parrotta, J.A., Knowles, O.H. et Wunderle, J.M., 1997. Development of floristic diversity in 10-year-old restoration forests on a bauxite mined site in Amazonia. *Forest Ecology and Management*. 99 : 21-42.
- Picard, J.F., 1995. Évolution de la croissance radiale du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) dans les Vosges. Premiers résultats sur le versant lorrain. *Annales des Sciences forestières*. 52 : 11-21.
- Rapport IPCC., 1995. Potential Ecological Impacts of Climate Change in the Alps and Fennoscandian Mountains. An annex to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Second Assessment Report, Working Group II-C (Impacts of Climate Change on Mountain Regions). A. Guisan, J.I. Holten, R. Spichiger et L. Tessier, éd., Genève, 194 p.
- Sclafert, T., 1959. Cultures en Haute-Provence - Déboisements et pâtures au Moyen Age. *Les Hommes et la Terre*. IV, S.E.V.P.E.N., 271 p.
- Surrel, A., 1872. Étude sur les torrents des Hautes Alpes (2<sup>e</sup> éd.). Dunod, Paris, 386 p.
- Szeicz, J.M. et MacDonald, G.M., 1995. Recent white spruce dynamics at the subarctic alpine treeline of north-western Canada. *Journal of Ecology*, 83 : 873-885.
- Taylor, A.H., 1995. Forest expansion and climate change in the Mountain Hemlock (*Tsuga mertensiana*) zone, Lassen volcanic national Park, California, U.S.A. *Arctic and Alpine Research*, 27 (3) : 207-216.
- Villalba, R., Boninsegna, J.A., Veblen, T.T., Schmelzer, A. et Rubulis, S., 1997. Recent trends in tree-ring records from high elevation sites in the Andes of northern Patagonia. *Climatic Change*, 36 : 425-454.
- Zhuang, X., 1997. Rehabilitation and development of forest on degraded hills of Hong Kong. *Forestry Ecology and Management*, 99 : 197-201.