

## Résumé

Depuis le minimum forestier atteint vers 1850 en France, une expansion générale des forêts est observée. Dans les montagnes, l'expansion peut se traduire par une remontée de la limite supérieure des forêts, transition entre les étages subalpin et alpin. Le réchauffement global, la répartition des essences forestières, l'abandon pastoral, et le développement du tourisme interagissent pour moduler la dynamique de la limite des forêts. La remontée de la limite des forêts modifie les anciennes pelouses alpines et ses communautés végétales patrimoniales. Les plantes forestières peuvent coloniser la forêt nouvellement installée avec retard, alors que les plantes des pelouses alpines peuvent s'éteindre plus ou moins rapidement. Le premier objectif de cette thèse est de quantifier le déplacement altitudinal de la limite des forêts à l'échelle des Pyrénées et des Alpes du Nord françaises depuis 1850. Un second objectif est de comprendre les effets des facteurs climatiques, socio-économiques, paysagers et forestiers, déterminant les variations de la dynamique de la limite des forêts depuis 150 ans. Un troisième objectif est de quantifier les effets de la remontée de la limite des forêts sur la diversité taxonomique et fonctionnelle des communautés végétales. Pour retracer la dynamique, la limite des forêts a été estimée par commune à l'aide de cartes d'usage des sols historiques et récentes, qui ont permis de délimiter deux périodes dans les Pyrénées (1851-1993 et 1993-2010) et trois périodes dans les Alpes (1860-1951, 1951-1995 et 1995-2007). Nous avons comparé les altitudes des limites des forêts entre les dates et les communes pour explorer les patrons spatio-temporels. Les effets des facteurs topographiques, climatiques, socio-économiques, paysagers et forestiers sur ces patrons spatio-temporels ont également été explorés. Enfin, nous avons analysé la distribution de la diversité taxonomique et fonctionnelle des communautés végétales des forêts anciennes jusqu'aux pelouses alpines grâce à des relevés stationnels et botaniques, effectués pendant l'été 2023 dans la vallée de la Maurienne. Les résultats montrent une dynamique contrastée : la limite des forêts s'est élevée de 174 m entre 1851 et 2010 dans les Pyrénées, avec une accélération entre 1993 et 2010, alors qu'elle s'est élevée de 166 m uniquement entre 1951 et 1995 dans les Alpes du Nord, donc de façon plus tardive mais plus rapide. La dynamique temporelle coïncide avec celle du réchauffement global dans les Pyrénées, mais avec un délai de réponse. Au contraire dans les Alpes, la remontée est limitée entre 1995 et 2007, et la limite des forêts s'est même abaissée de  $5 \text{ m.an}^{-1}$  en Haute-Savoie. Les variations spatiales de la dynamique coïncident avec celles de l'abandon pastoral en France. De plus, l'hétérogénéité spatiale récente dans les Alpes est liée aux variations de pressions pastorales et touristiques contemporaines. Le contexte forestier joue également un rôle majeur. Dans les Pyrénées notamment, la remontée observée est plus rapide à l'Est de la chaîne, où la limite est formée par le pin à crochets, une espèce pionnière présentant de bonnes capacités de colonisation. L'analyse de la diversité floristique par groupe écologique montre un crédit (ou lag) de colonisation de 30% des espèces spécialistes de forêt ancienne dans les forêts récentes. Une dette d'extinction pour 27% des espèces de pelouses alpines est observée dans les landes, et descend à 8% dans les forêts établies depuis plus de 70 ans. La dette d'extinction des espèces de pelouses alpines est payée plus vite que le crédit de colonisation des espèces de forêts anciennes. Cette étude régionale à une profondeur temporelle inédite montre comment les facteurs globaux et régionaux interagissent sur le long terme pour moduler les paysages au niveau des écotones entre la forêt subalpine et les pelouses alpines, et souligne les compromis à y trouver entre conservation de la biodiversité et exploitation des ressources.

## Abstract

Since the minimum forest extent around 1850 in France, forests are generally expanding. In the mountains, this expansion can result in a rise in the upper forest line, the transition between the subalpine and alpine belts. Global warming, forest species distribution, pastoral abandonment and tourism development interact to modulate the dynamics of the forest line. The rise of the forest line modifies the ancient alpine grasslands and their plant communities, presenting high conservation value. After the afforestation at higher elevation, forest plants may colonise with a delay, while alpine grassland plants may disappear more or less quickly. The first objective of this PhD thesis is to quantify the altitudinal shift of the forest line in the French Pyrenees and Northern Alps since 1850. A second objective is to understand the effects of climatic, socio-economic, landscape and forestry factors in determining variations in forest line dynamics over the last 150 years. A third objective is to quantify the effects of the rise in forest line on the taxonomic and functional diversity of plant communities. To reconstruct the dynamics, the forest line was estimated for each municipality using historical and recent land-use maps, which delimited two periods in the Pyrenees (1851-1993 and 1993-2010) and three periods in the Alps (1860-1951, 1951-1995 and 1995-2007). We compared the elevations of forest lines between dates and municipalities to explore spatio-temporal patterns. The effects of topographical, climatic, socio-economic, landscape and forest factors on these spatio-temporal patterns were also explored. Finally, we analysed the distribution of the taxonomic and functional diversity of plant communities from ancient forests to alpine grasslands using stationary and botanical surveys carried out during the summer of 2023 in the Maurienne valley. The results show contrasting dynamics: the forest line rose by 174 m between 1851 and 2010 in the Pyrenees, with an acceleration between 1993 and 2010, whereas it rose by 166 m only between 1951 and 1995 in the Northern Alps, i.e. later but faster. The temporal dynamic coincides with global warming in the Pyrenees, but with a delayed response. In contrast, in the Alps, the rise was limited between 1995 and 2007, and the forest line even shifted downward by  $5 \text{ m.yr}^{-1}$  in Haute-Savoie. The spatial variations in the dynamics coincide with those of pastoral abandonment in France. Moreover, recent spatial heterogeneity in the Alps is linked to variations in contemporary pastoral and tourist pressures. The forest context also plays a major role. In the Pyrenees in particular, the observed upward shift is faster to the east of the range, where the limit is formed by mountain pine, a pioneer species with high colonisation capacities. Analysis of floristic diversity by ecological group shows a colonisation credit (or lag) of 30% of ancient forest specialist species in recent forests. An extinction debt for 27% of alpine grassland species is observed in heathlands, and decreases to 8% in forests established more than 70 years ago. The extinction debt of alpine grassland species is being paid off faster than the colonisation credit of ancient forest species. This regional study at an unprecedented temporal depth shows how global and regional factors interact over the long term to shape landscapes in the ecotones between subalpine forests and alpine grasslands, and highlights the trade-offs that need to be made between biodiversity conservation and resources exploitation.