Université de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *l'Institut National Polytechnique de Toulouse*
Discipline ou spécialité : *Ecologie, Biodiversité et Evolution*

Présentée et soutenue par *Ola MDAWAR*
Le *13 novembre 2009*

Titre : *Les accrus de frêne (Fraxinus excelsior L.) à l'interface environnement/sylviculture dans les Pyrénées Centrales : distribution spatiale et croissance*

JURY
M. Christopher Carcaillet, Directeur d'études EPHE, Montpellier (Rapporteur)
Mme Céline Meredieu, Chargée de recheches INRA, Pierroton (Examinatrice)
M. Gérard Balent, Directeur de recherches INRA, Toulouse (Directeur de thèse)
M. Alain Cabanettes, Chargé de recherches INRA, Toulouse (Co-encadrant)
M. Laurent Larrieu, Ingénieur CRPF, Tarbes (Membre invité)

Ecole doctorale : *Sciences Ecologiques, vétérinaires, Agronomiques, Bioingénieries*
Unité de recherche : *Dynamiques forestières dans l'espace rural*
Directeur(s) de Thèse : *Gérard Balent*
Rapporteurs : *Didier Alard, Professeur, Bordeaux I*
Hervé Jactel, Directeur de recherches INRA, Pierroton

Remerciements

Merci à Gérard Balent d'avoir dirigé cette thèse.

Merci à Alain Cabanettes pour avoir co-encadré ce travail. Je le remercie pour sa patience, ses conseils, sa relecture, ses remarques et ses doubles corrections scientifiques et linguistiques.

Merci à Jean-Jacques Brun, à Didier Bert et à Philippe Thévenet, membres de mon comité de thèse, pour leurs conseils et commentaires très utiles.

Merci à Didier Alard, Hervé Jactel et Christopher Carcaillet d'avoir accepté de juger ce travail comme rapporteurs.

Merci à Céline Meredieu, autre membre du jury pour avoir accepté le rôle d'examinatrice.

Je souhaite remercie également Laurent Larrieu, agent du CRPF de Midi-Pyrénées pour sa contribution dans le choix des arbres d'avenir pour le détourage.

Merci à André Gavaland de sa contribution efficace dans ce travail et de sa disponibilité malgré son temps chargé.

Merci à Georges Bertoni de son aide dans la partie nutrition minérale et aussi dans la préparation très longue de l'article.

Merci à tous les membres de l'UMR DYNAFOR pour leurs encouragements.

Merci à Laurent Burnel et Jérôme Willm, techniciens à l'UMR, pour m'avoir aidée à réaliser le travail long et dur de terrain. Sans eux je n aurais pas pu bien sur grimper ou couper les arbres.

Grand merci à Sylvie Ladet pour sa collaboration, sa bonne humeur et son enthousiasme.

Merci à Valérie Calvo, la secrétaire du laboratoire pour tout ce qui est administratif, mais aussi pour ses conseils concernant la grossesse et les bébés.

Merci à mes compagnons de bureau qui m'ont soutenue tout au long de ma thèse.

Je remercie aussi tous les propriétaires des parcelles sur lesquelles j'ai travaillé.

Enfin milles mercis à mes parents, Ali et Hady de m'avoir supportée, encouragée pendant ces dernières années loin de mon pays.

SOMMAIRE

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES CARTES

GLOSSAIRE

INTRODUCTION GENERALE 2

1. Contexte de l'étude 2

1.1. Contexte national 2

1.2. Contexte local 4

2. Connaissances scientifiques disponibles 7

2.1. Colonisation des pâturages par les ligneux 7

2.2. Croissance 8

2.3. Ecologie du frêne et ses relations avec les conditions stationnelles 11

2.3.1 Distribution naturelle du frêne 11

2. 3. 2. Facteurs abiotiques et leurs effets sur le frêne 12

2.3.3. Facteurs biotiques et leurs effets sur le frêne 14

2.4. Interets du frêne 15

2.4.1. Intérêt agro-pastoraL 15

2.4.2. Intérêt médical 17

2.4.3. Intérêt sylvicole 17

2.5. Sylviculture du frêne 18

3. Objectifs et démarches 19

3.1. Objectifs 19

3.2. Stratégie 19

3.3. Démarches 22

3.3.1. Démarches générales 22

3.3.2. Démarches pour l'étude à l'échelle locale 23

3.4. Organisation de la thèse 28

CHAPITRE 1 : REPARTITION SPATIALE DES ACCRUS DE FRENE 34

1. Introduction 35

1.1. Objectif général 35

1.2. Définition et détection des accrus de frêne 35

1.3. État des connaissances dans le département 65 37
1.3.1. Approche descriptive : cartographie de la végétation 37
1.3.2. Approche explicative 39
1.4. Stratégie et démarche adoptée 40
2. Recherche de critères de télédétection des accrus de frêne 40
2.1. Introduction 40
2.2. Méthodes et résultats 42
2.2.1. Utilisation de photos aériennes 42
2.2.2. Utilisation de scènes satellitales 44
2.3. Bilan et perspectives 45
3. Recherche de facteurs explicatifs de la présence du frêne aux échelles de la parcelle et du paysage 48
3.1. Materiel et Méthodes 48
3.1.1. Site d'étude 48
3.1.2. Stratégie d'échantillonnage 49
3.1.3. Modalités pratiques d'observation sur le terrain 54
3.1.4. Analyse des données 57
3.2 Résultats 60
3.2.1 Principales caractéristiques de l'échantillon et occurrence des accrus de frêne 60
3.2.2. Analyse exploratoire des données 61
3.2.3. Résultats de l'Analyse Discriminante 62
3.2.4. Résultats du modèle logistique 62
3.2.5. Résultats des arbres de régression 64
3.2.6. Qualité de la prédiction avec des simulations de Monte-Carlo 66
3.2.7. Représentation spatiale de la prédiction 67
3.3. Discussion 70
3.3.1. Le rôle prépondérant des variables géomorphologiques 70
3.3.2. Les prairies et leur gestion 71
3.3.3. Les autres variables 71
3.3.4 .Comparaisons des résultats obtenus avec les différentes méthodes 72
3.3.5. Conclusion 74
3.3.6. Recommandations et Propositions 75
4. Bilan et perspectives 75

CHAPITRE 2 : CROISSANCE - NUTRITION MINÉRALE 80
1. Introduction : 81
2. Matériel et méthodes : 81
2.1. Caractéristiques des peuplements étudiés : 81
2. 2. Croissance en hauteur 82
2. 3. Nutrition minérale 84
2. 4. Relation croissance- nutrition minérale 86
2.5. Analyse des relations nutritionnelles sol - plante 86
3. Résultats 88
3.1. Analyse de la variabilité de la croissance en hauteur des accrus (publication soumise à New Forests) 88
3.1.1. Introduction 89
3.1.2. Materials and methods 89
3.1.3. Results 93
3.1.4. Discussion 96
3.2. Résultats complémentaires sur la production et la nutrition minérale des peuplements 101
3.2.1. Biomasse ligneuse et surface terrière 101
3.2.2. Relation croissance-nutrition minérale 102
3.2.3. Relation sol - feuilles matures - feuilles sénescentes 103
3.2.4. L'azote minéral 105
3.2.5. Effet des caractéristiques du sol 107
4 - Conclusion 109

CHAPITRE 3 : CROISSANCE-CLIMAT 112
1- Introduction 113
2. Matériel et méthodes 116
2.1. Données climatiques 116
2.2. Calcul du bilan hydrique 117
2.3. Récolte et lecture des cernes d'accroissement 118
2.3.1. Échantillonnage 118
2.3.2. Lecture de cernes 119
2.3.3. Vérification de la datation des cernes 120
2.3.4. Autres paramètres 122
2.4. Analyse des relations entre le climat et la largeur des cernes 123
3. Résultats 124

3.1. Variabilité interannuelle du climat 124
3.1.1 Comparaison intravallée de la variabilité des paramètres climatiques 127
3.1.2 Années remarquables 127
3.1.3. Comparaison des vallées 129
3.2. Variabilité interannuelle de la croissance en diamètre 130
3.2.1. Variabilité inter-arbres de la croissance en diamètre 130
3.2.2. Variabilité inter-parcelles de la croissance en diamètre 134
3.3. Relation entre croissance et climat 137
3.3.1. Comparaison entre années extrêmes et années caractéristiques 137
3.3.2. Corrélations entre croissance et climat au niveau des parcelles 137
3.3.3. Comparaison entre parcelles au niveau des facteurs climatiques limitant la croissance 139
3.3.4. Comparaison entre caractéristiques climatiques des années caractéristiques et les facteurs climatiques limitant la croissance 139
3.4. Bilan hydrique 140
4- Discussion 141
4.1. Relation entre la croissance et les paramètres annuels du climat 141
4.2. Corrélation entre la croissance et les paramètres mensuels du climat 143
4.3. Bilan hydrique 145
4.4. Limites de l'étude 145
4.5. Recommandations et propositions 146

CHAPITRE 4 :CROISSANCE - COMPETITION 150
1. Introduction 151
2. Matériel et Méthodes 156
2.1. Caractérisation des peuplements 156
2.2. Éclaircies sylvicoles 157
2.2.1. Modalités et intensités des interventions 157
2.2.2. Choix des arbres désignés 159
2.2.3. Mesures des arbres désignés 160
2.3. Indice de voisinage Sd2 162
2.4. Analyses des corrélations 162
2.4.1. Relation croissance- indice de compétition 162
2.4.2. Réaction à l'éclaircie 163
2.4.3. Relation croissance- dimensions initiales 163

2.4.4. Relation croissance- dynamique passée de croissance 163
3. Résultats 164
3.1. Estimation de la pression de compétition dans les peuplements en place 164
3.1.1. Croissance en diamètre et densité à l'échelle de la parcelle 164
3.1.2. Croissance en diamètre à l'échelle individuelle en fonction du voisinage 166
3.1.3. Contribution des dimensions initiales des arbres à la compétition locale 172
3.2. Influence des interventions sylvicoles sur la croissance radiale du frêne 174
3.2.1. Résultats moyens à l'échelle de la parcelle 175
3.2.2. Variabilité inter-individuelle (à l'échelle de l'arbre) de la réaction à l'éclaircie 188
3.2.3. Récapitulation 198
4. Discussion 199
4.1. Effet de la compétition inter-individuelle au niveau de l'arbre dans les accrus de frêne. 199
4.1.1. Dans les peuplements en place 200
4.1.2. Dans les peuplements éclaircis 201
4.1.3. Comparaison des résultats avant et après éclaircie 203
4.2. Réaction aux interventions sylvicoles 203
4.2.1. Réaction comparée des effets des deux modalités d'éclaircie au niveau parcelle 203
4.2.2. Variabilité de la réaction aux éclaircies selon l'âge, la densité et la fertilité de la parcelle 204
4.2.3. Comparaison par parcelle des effets des deux modalités d'éclaircie 206
4.2.4. Changement du niveau de compétition sous l'effet de l'éclaircie forte 207
4.2.5. Évolution de la croissance après éclaircie 207
4.3. Vers un modèle de croissance de réponse à la compétition 208
4.4. Conclusion 209
4.5. Limites de l'étude 209
4.6. Recommandations et propositions 210

DISCUSSION ET CONCLUSION GENERALES 214
1. Réponses apportées aux questions de départ 216
2. Limites de l'étude 224
3. Perspectives 224
4. Propositions de gestion des accrus de frêne dans les Pyrénées centrales 227
Conclusion générale 230

Liste des tableaux

INTRODUCTION GENERALE

Tableau 1 : Données agricoles cumulées sur les trois communes étudiées (source : RGA). 4
Tableau 2: Parcelles utilisées pour les chapitres relatifs à la croissance. 25
Tableau 3 : Les précipitations annuelles (mm) et la température moyenne annuelle 27
Tableau 4 : Données topographiques des parcelles étudiées. 27

CHAPITRE 1 : REPARTITION SPATIALE DES ACCRUS DE FRENE

Tableau 1 : Principales essences forestières présentes dans les boisements spontanés 36
Tableau 2 : Comparatif des surfaces en accrus sur la commune de référence 39
Tableau 3 : Comparaison de la surface d'accrus photo-interprétés avec la surface réelle 43
Tableau 4 : Comparaison de la surface d'accrus classés avec la surface réelle 45
Tableau 5 : Variables géomorphologiques utilisées dans notre étude 51
Tableau 6 : Variables d'occupation du sol utilisées dans notre étude 51
Tableau 7 : Variables paysagères utilisées 52
Tableau 8 : Détails des notations et des mesures effectuées 54
Tableau 9 : Relations entre la présence/absence d'accurs de frêne et les variables explicatives 61
Tableau 10 : Matrice de confusion 62
Tableau 11 : Valeur de l'estimation et seuil de signification 62
Tableau 12 : Ensembles des modèles de regression logistique multiple 63
Tableau 13 : Résumé des résultats des arbres de regression 65
Tableau 14 : Bilan des valeurs explicatives des variables selectionnées 72

CHAPITRE 2 : CROISSANCE ET NUTRITION MINÉRALE

Table 1: Main characteristics of the soils of the sites investigated 89
Table 2: Main characteristics of the stands 92
Table 3: Nutrient concentrations in the mature leaflet fraction of ash 95
Tableau 1 : Caractéristiques supplémentaires des peuplements étudiés. 101
Tableau 2 : Relations entre l'indice de croissance et les teneurs en éléments minéraux . 102
Tableau 3 : Quantités des éléments minéraux dans les sols 103
Tableau 4 : Coefficient de la corrélation de Spearman entre sol et feuilles 103
Tableau 5 : Coefficient de la corrélation de Spearman entre feuilles et caract. du sol 108

CHAPITRE 3 : CROISSANCE-CLIMAT

Tableau 1: Caractéristiques de l'échantillonnage des arbres, des carottes et des rondelles 119
Tableau 2: Années extrèmes dans les 2 vallées 127
Tableau 3 : Pourcentage d'arbres présentant des autocorrélations d'ordre 1 132
Tableau 4 : Années caractéristiques dans les 3 parcelles 135

CHAPITRE 4 : CROISSANCE-COMPETITION

Tableau 1 : Caractéristiques des peuplements des 3 parcelles étudiées. 164
Tableau 2 : Relations croissance- densité et croissance- âge 165
Tableau 3 : Relations entre les résidus de la relation croissance- âge, et les densités 165
Tableau 4 : Corrélations entre les croissances et l'indice de voisinage 167
Tableau 5 : L'indice C calculé 168
Tableau 6 : Analyse des variations de l'indice C 169
Tableau 7 : Correlations entre les résidus Sd2-croissance et les dbh initiaux 171
Tableau 8 : Coefficienst de regressions linéaires pour les corrélations significatives 173
Tableau 9 : Test de Kruskal-Wallis de la croissance des arbres selon modalité d'intervention 174
Tableau 10 : Comparaison globale de la croissance moyenne annuelle 175
Tableau 11 : Test de Kruskal-Wallis de la croissance des arbres pour modalités EF et D 177
Tableau 12 : Comparaison de croissance des arbres non détourés avec témoin 179
Tableau 13 : Comparaison de la croissance des arbres D-TD/ EF-TEF 180
Tableau 14 : Résultats du test de Wilcoxon sur la différence interannuelle de croissance 184
Tableau 15 : Résultats du test de Kruskal-Wallis sur la différence de la croissance 186
Tableau 16 : Comparaison de la croissance après éclaircie entre les parcelles et les années 186
Tableau 17 : Relations entre Sd2 et croissance en parcelle B6. 188
Tableau 18 : Relations entre Sd2 et croissance dans la parcelle M2. 189
Tableau 19 : Relations entre Sd2 et croissance dans la parcelle Pr1. 190
Tableau 20 : Corrélations entre les résidus des corrélations croissance-Sd2 et dbh initial 191
Tableau 21 : Corrélations entre la croissance suite aux interventions et dbh initial 194
Tableau 22 : Corrélations entre la croissance suite modalité EF et dbh initial 194
Tableau 23 : Corrélations entre la croissance suite modalité EF et surface de houppiers 195
Tableau 24 : Résultats du test de Wilcoxon pour la relation accroissement avant et après EF 196
Tableau 25 : Résultats du test de Wilcoxon pour le sens des différences entre classements 197

Liste des figures

INTRODUCTION GENERALE

Figure 1 : Carte de l'évolution du taux de boisement (%) (source : IFN). 3
Figure 2 : Schéma représentant les 4 volets du programme de recherche de DYNAFOR 6
Figure 3 : Contribution du SIG dans le programme de recherche de DYNAFOR 6
Figure 4 : Succession végétale après abandon. 7
Figure 5 : Zones de distribution de frêne commun en Europe 11
Figure 6 : Expansion des boisements spontanés de frêne sur la commune de Villelongue 20
Figure 7 : Positionnement de la parcelle d'expérimentation « M2 ». 24

CHAPITRE 1 : REPARTITION SPATIALE DES ACCRUS DE FRENE

Figure 1: Schéma d'interprétation des accrus de frêne au stade perchissur photo aérienne 43
Figure 2: Position des différentes capteurs le long du spectre 47
Figure 3: Signature spectrale de différentes espèces de feuillus 47
Figure 4: Exemple de fiche de terrain 55
Figure 5: Atlas cartographique 56
Figure 6: Distribution des variables géomorhologiques 60
Figure 7: Arbre de regression pour présence/absence des accrus de frêne 64
Figure 8: Arbre de regression pour le pourcentage d'accrus de frêne 65
Figure 9: Qualité prédictive du modèle logistique 66
Figure 10: Distribution des probabilités de présence d'accrus dans les 9 communes 69
Figure 11: Histogramme de distribution des probabilités de présence/ absence d'accrus 73

CHAPITRE 2 : CROISSANCE ET NUTRITION MINÉRALE

Figure 1: Filet collecteur de feuilles sénescentess 84
Figure 1: Comparison of the growth kinetics 93
Figure 2: Relationships between height and age 94
Figure 2 : Relation entre l'indice de site (SI) et le pH 107

CHAPITRE 3 : CROISSANCE-CLIMAT

Figure 1 : Courbes des ERC 121
Figure 2 : Variation des précipitations annuelles, des températures min et max. 125
Figure 3 : Variation des paramètres climatiques mensuels 126
Figure 4 : Evolution de la température minimale corrigée 129
Figure 5 : Evolution de la température maximale corrigée 129
Figure 6 : Evolution de la surface moyenne des cernes en fonction de l'âge 131

Figure 7 : Arbres de croissance initiale lente et rapide 131
Figure 8 : Arbres à croissance maximale en diamètre précoce et tardive 132
Figure 9 : Histogramme de la répartition des valeurs de la sensibilité individuelle (Sj) 133
Figure 10 : Histogramme de la répartition des valeurs d'autocorrélation d'ordre 1 134
Figure 11 : Surface moyenne des cernes des arbres de la parcelle M2 en fonction de l'âge 135
Figure 12 : Comparaison des paramètres des largeurs de cernes entre les 3 parcelles. 136
Figure 13 : Corrélations entre surfaces des cernes des arbres de B6, M2 et Pr1 et climat 138
Figure 14 : Evolution moyenne de la réserve utile en eau calculée 140

CHAPITRE 4 : CROISSANCE-COMPETITION

Figure 1 : Modalité détourage des arbres d'avenir. 157
Figure 2 : Modalité éclaircie forte. 158
Figure 3 : Parcelle M2. avant et après intervention 159
Figure 4 : Mesure de la surface de projection de houppier. 161
Figure 5 : Rrépartition spatiale des arbres de la parcelle B6 166
Figure 6 : Quelques relations significatives entre croissance - Sd2 et variables de croissance 168
Figure 7 : Boxplots des valeurs du coefficient « C » 171
Figure 8 : Quelques corrélations significatives entre dbh initiaux et résidus Sd2-croissance 173
Figure 9: Comparaison des gains de croissance pour Det EF par rapport à T 176
Figure 10 : Tendance moyenne de la croissance des arbres D et EF au cours du temps 177
Figure 11 : Comparaison de la croissance annuelle entre parcelles 178
Figure 12 : Relation entre la croissance moyenne annuelle et G 179
Figure 13 : Croissance moyenne annuelle des arbres désignés dans les 3 parcelles 182
Figure 14 : Croissance de l'année 2007 des arbres désignés dans les 3 parcelles 183
Figure 15 : Croissance de l'année 2008 des arbres désignés dans les 3 parcelles 184
Figure 16 : Tendance de la croissance des arbres désignés D et EF en fonction du temps 187
Figure 17 : Relation entre la croissance de la 1ère année suivant l'éclaircie et dbh initial 193

Liste des cartes

INTRODUCTION GENERALE

Carte 1 : Localisation de la zone des 3 vallées dans el département 65 21
Carte 2 : Les 3 communes contenant les parcelles étudiées 22
Carte 3: Localisation des parcelles B6 et B10 25
Carte 4: Localisation des parcelles M2 et Pr1 26
Carte 5: Localisation des parcelles A3 et A4 26

CHAPITRE 1 : REPARTITION SPATIALE DES ACCRUS DE FRENE

Carte 1 : Cartes des types de formations végétales sur le PNP en 1994 38
Carte 2 : Résultat de classification supervisée sur la commune de référence 44
Carte 3 : Répartition des 300 mailles sur les 9 communes 49
Carte 4 : Carte de la grille d'1 hectare apposée sur Villelongue 50
Carte 5 : Cartographie des probabilités de colonisation dans les 3 vallées 67
Carte 6 : Cartographie des probabilités de colonisation dans Villelongue 68

Glossaire

- Arbres dominants : les 100 plus gros arbres à l'hectare.
- BD ORTHO : ensemble d'orthophotographie, couleur, numérisées à la résolution de 50 cm, disponibles sur la France entière, en 2001 et 2006 pour le département des Hautes-Pyrénées
- Boisement lâche : peuplement clairière (à couvert boisé <40%) ou irrégulier ou par taches aux limites floues ou accrue ou peuplement chétif (hauteur adulte<7m) ou formation intermédiaire entre bois et lande
- Boisement morcelé : peuplement de composition diverse à structure parcellaire morcelée et située prés des champs ou des habitations ou forêt galerie ou parc rural
- Capacité au champ : la capacité de rétention maximale en eau du sol. Elle correspond plus précisément à la quantité d'eau retenue, après 48 heures d'égouttement de l'eau libre vers la nappe phréatique, par un sol préalablement gorgé d'eau (par des pluies ou un arrosage intensif)
- Classification non-supervisée : classification de données d'image numérique, par traitement informatique uniquement basé sur les statistiques d'image sans recours à des échantillons d'entraînement. La classification produit un regroupement naturel des pixels de l'image que l'on nomme "classe". Ainsi, on présume que les régions de l'image ayant une même signature spectrale ont un type d'utilisation du sol similaire. L'analyste doit ensuite déterminer l'identité de ces regroupements spectraux
- Corine Land Cover : source cartographique au 1/100 000e à l'échelle européenne établie sur la base d'images satellitaires mise à jour périodiquement. Le maître d'ouvrage an France est l'Institut français de l'environnement (IFEN)
- Données cadastrales : documents dressant l'état de la propriété foncière d'un territoire. Ils sont disponibles sous 2 formes : les plans cadastraux (carte papier avec le parcellaire dessiné et en étiquettes le numéro unique de la parcelle) et les matrices cadastrales (tableau avec liste des parcelles et en autres la nature de la parcelle : bois, pré, terre…)
- GIP ECOFOR : Groupement d'Intérêt Public ECOsystèmes FORestiers
- Hauteur totale : la distance entre le bourgeon terminal d'un arbre et son pied, mesurée parallèlement à l'axe de sa tige
- Hauteur de bille : la distance entre la branche la plus basse du houppier de l'arbre et le niveau de sol, mesurée parallèlement à l'axe de sa tige
- IGN : Institut Géographique National
- Indice NDVI : Normalized Difference Vegetation Index. Il donne un gradient d'activité végétale, la valeur de chaque pixel allant du 0 (sol nu) au 1 (couvert végétal maximal)
- Inter-déciles : intervalle entre les bornes d'un intervalle des valeurs contenant 10 % de l'effectif total
- LAI : Leaf Area Index : Surface de feuilles d'un arbre ou d'un peuplement par unité de surface de sol.
- Néocanaux : Canal issue du traitement numérique (addition, division…) des canaux bruts d'une image initiale et pouvant être utilisée également à nouveau dans un processus de traitement d'image
- Perchis : stade de développement d'un peuplement équienne, précédent celui du futaie, dont les tiges ont un diamètre moyen de 10 à 15 cm

- Photo-interprétation : elle consiste à observer une photographie aérienne à l'aide d'une loupe stéréoscopique ou directement sur l'écran de l'ordinateur et à dessiner sous forme vecteur les éléments qui nous intéressent
- RENECOFOR : Réseau National de suivi à long terme des ECOsystèmes FORestiers
- RGA : Recensement Général Agricole
- Signature spectrale : Il s'agit de l'émission électromagnétique caractéristique d'un objet en fonction du spectre des longueurs d'ondes. Chaque type d'arbres possède une signature spectrale unique qui dépend de sa croissance, mais aussi des conditions et contraintes environnementales (humidité, température, etc.)
- SPOT 5 : satellite de télédétection civil d'observation du sol terrestre à la résolution de 10m en mode multispectral
- TERUTI : Territoire Utilisation

INTRODUCTION GENERALE

1. CONTEXTE DE L'ETUDE

1.1. CONTEXTE NATIONAL

Depuis un siècle, beaucoup de milieux ouverts sont colonisés par des arbustes ou arbres suite aux changements d'utilisation des terres et plus particulièrement aux changements des activités agricoles. Selon les cas et les lieux, ces changements peuvent correspondre à une intensification des pressions pastorales (Moleele *et al.*, 2002) ou à un abandon de ces activités (Mariott *et al.*, 2004). En Europe, c'est la déprise agricole qui représente le facteur principal responsable de la colonisation (Prévosto *et al.*, 2000; Curt *et al.*, 2004). L'abandon des terres agricoles a surtout été remarqué à la suite des deux guerres mondiales où l'exode rural a touché beaucoup de départements français. Ensuite, cet abandon a augmenté lors de la mise en place de la Politique Agricole Commune (PAC). Le rôle de l'agriculture moderne, à ce moment-là, est conditionné par la loi d'Orientation Agricole de 1962 qui a pour objectif la modernisation de l'agriculture pour atteindre une autosuffisance agroalimentaire de la France. Les politiques agricoles nationales ont mis en œuvre des moyens pour aider à arriver à une modernisation rapide par la mise à la retraite des agriculteurs âgés, l'agrandissement des surfaces exploitées, la mécanisation, l'intensification des terres et l'amélioration de l'efficacité du travail. Cela a entraîné un abandon des terres peu productives et des zones d'accès difficiles et en particulier les zones de montagnes (Chassany, 1999; Mariott *et al.*, 2004).

Les prairies de montagne en France comme dans toute l'Europe, sont concernées par ce phénomène d'abandon et pour beaucoup rapidement colonisées par des espèces ligneuses forestières conduisant à une transformation de ces zones en formations végétales ligneuses (Bozon *et al.*, 1994; Bozon, 1995; Julien, 2006) qu'on appelle accrus ou boisement spontanés (Brun, 1994; Gauberville, 1997; Curt *et al.*, 2004).

Selon l'Inventaire Forestier National (IFN), entre 1820 et 2002, la surface boisée est passée en France de 9 millions d'ha à 15 millions d'ha. 87% de cette augmentation est due aux boisements spontanés (Curt *et al.*, 2004). Pendant la période 1992-2002, un gain de 97000 ha/an des surfaces boisées est du à ce phénomène en France (Mottet *et al.*, 2007). De même, l'IFN constate une augmentation du boisement spontané entre 1984 et 1996 à l'échelle des départements (Figure 1, IFN, 2009).

Ces accrus représentent une grande diversité d'essences forestières (chêne pédonculé, merisier, érable sycomore, frêne, saules, bouleau, pin d'Alep, pin sylvestre…). L'essence qui constituera ces nouveaux peuplements sera différente selon la zone géographique, l'étage climatique et la présence de cette essence près de la zone concernée (Bozon *et al.*, 1994; Prévosto *et al.*, 2003; Curt *et al.*, 2004).

Ces peuplements posent en fait plusieurs enjeux :

- enjeux écologiques : modification de la biodiversité des milieux ouverts transformés en peuplement forestier. La flore et la faune de ces milieux peuvent disparaître, et l'enjeu devient surtout important quand ces peuplements contiennent des espèces menacées (Douchet, 1999).

- enjeux sociaux : disparition des zones d'activités agricoles.
- enjeux paysagers : banalisation du paysage et perte d'une identité régionale avec la fermeture des paysages.
- enjeux économiques : ces nouveaux peuplements peuvent avoir un intérêt économique non négligeable lorsqu'ils se composent d'espèces précieuses pouvant servir de bois d'œuvre mais aussi de bois de chauffage (Guyon, 1999).

Les perceptions de ces accrus et les enjeux qu'ils posent sont différentes selon les utilisateurs de l'espace. Concilier les différents acteurs en assurant un multi-usage de ces zones doit donc être un des objectifs de la gestion de ces accrus. Cette gestion est absente pour le moment car elle peut se heurter à plusieurs contraintes : l'absence de motivation chez les propriétaires, le morcellement de la propriété et l'absence de politique nationale adaptable à la multiplicité des enjeux et à la difficulté dans certaines régions à définir des objectifs prioritaires. En outre, cette gestion demande une bonne connaissance de ces peuplements peu étudiés.

Pour mieux connaître ces accrus en tenant compte de leur développement récent et rapide, particulièrement dans les zones montagneuses, et face aux enjeux que ce phénomène pose (Curt et *al.*, 2004), la Recherche est interrogée sur les causes, les dynamiques et les conséquences écologiques et socio- économiques de ce phénomène. Un premier travail a été réalisé par le CEMAGREF et publié dans le numéro spécial Ingénierie/Eau, Agriculture et Territoire sur ces boisements, à partir duquel quelques études ont été réalisées même si elles sont peu nombreuses (Bozon, 1995; Curt et *al.*, 2004; Prévosto et *al.*, 2003; Julien, 2006).

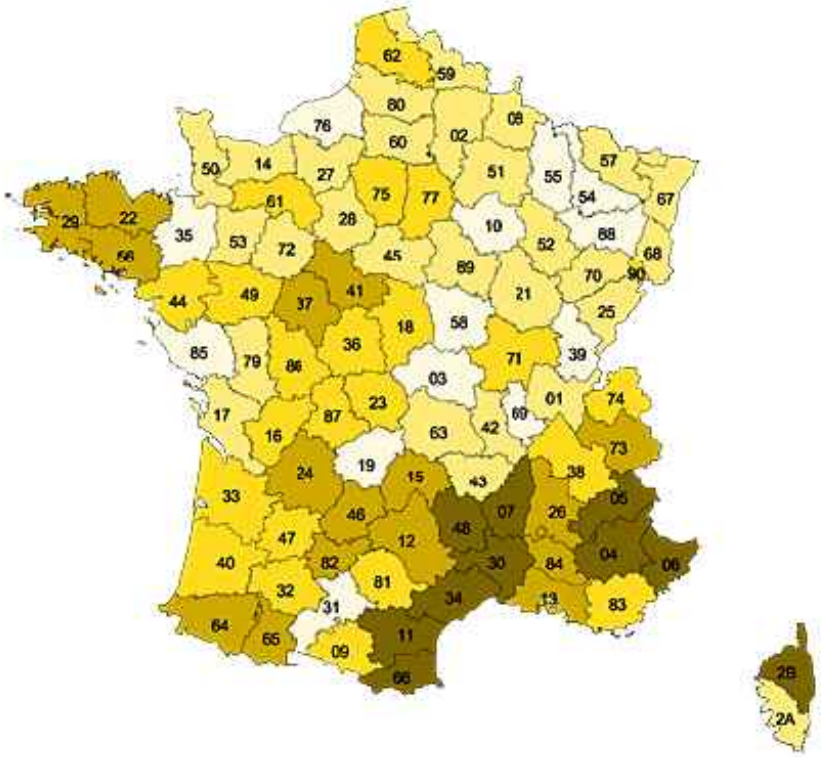


Figure 1 : Carte de l'évolution du taux de boisement (%) dans chaque département pour la période comprise entre 1984 et 1996 (source : IFN).

Parmi les départements concernés par l'augmentation des boisements essentiellement spontanés, c'est le département des Alpes-Maritimes qui semble être le plus touché (+ 7,9 %) (IFN, 2009). Le département des Hautes Pyrénées (65) fait partie des départements qui sont les plus touchés par ce phénomène avec une augmentation de la surface boisée de 2 à 4% (Figure 1).

1.2. CONTEXTE LOCAL

Dans les Pyrénées centrales, on note depuis le début du siècle, une diminution des surfaces fréquentées par les animaux (ovins et bovins) et une régression importante de la surface agricole utilisée (Balent & Duru, 1984) et et une diminution des surfaces fréquentées par les animaux (ovins et bovins) (Tableau 1).

Tableau 1 : Exemple des données agricoles cumulées sur les trois communes étudiées : Villelongue, Baudéan et Arreau (source : RGA).

Années de recensement	**Superficie Agricole utilisée (ha)**	**Nombre d'animaux**
1 979	511	1748
1988	547	1986
2000	408	1696
Différence (2000-1979)	-103	-52

Après la seconde guerre mondiale, ces changements se sont intensifiés. Les parcelles les moins accessibles et les parcelles les moins mécanisables ont été abandonnées ou extensifiées au niveau de leur utilisation. Ce qui a conduit à une colonisation de ces zones par des espèces ligneuses.

Les zones de moyenne montagne situées dans la zone périphérique du Parc National des Pyrénées (PNP) ont été soumises à cette colonisation.

Les élus des communes de la zone périphérique du PNP ont alerté la direction du Parc sur la question de la fermeture du paysage et le PNP a alors décidé de financer des équipes de recherches pour travailler sur cette question. L'UMR DYNAFOR (DYNAmiques FORestières dans l'espace rural) a été sollicitée pour ce travail. Pour DYNAFOR, il s'agissait d'étudier et de comprendre les causes, les processus et les conséquences du boisement spontané par le frêne en zone périphérique du PNP. Les finalités de l'étude sont de fournir des références et des outils pour l'appui au développement durable de ces territoires. La recherche de DYNAFOR dans ce domaine s'inscrit dans une démarche de travail multidisciplinaire car elle s'intéresse aux :

- caractéristiques des peuplements spontanés pour la recherche forestière ;

- invasions des communautés prairiales ;

- dynamiques écologiques des paysages et aux changements de la biodiversité ;

- organisations et dynamiques territoriales des activités agricoles et des systèmes d'élevage en milieu défavorable pour l'agriculture et l'élevage.

Le choix du frêne a été décidé pour les raisons suivantes :

- Il représente l'espèce principale des accrus dans la zone périphérique du PNP. Cette espèce est l'une des espèces les plus prépondérantes dans les accrus en France (Brun, 1994; Curt *et al.*, 1998);
- C'est une espèce utilisée traditionnellement dans le système agro-pastoral dans les Pyrénées. Il est utilisé comme arbre fourrager dans les zones étudiées comme dans la partie espagnole des Pyrénées pour la nourriture hivernale des animaux (Gomez & Fillat, 1984). Son bois est utilisé comme bois de chauffage, dans la fabrication d'outils et dans la construction. C'est pourquoi on le trouve autour des parcelles, des granges et le long des chemins ;
- Le frêne est une espèce précieuse dont le bois peut être de bonne qualité. Il représente un potentiel sylvicole important qui mériterait une valorisation.

Le programme de recherche sur les causes, les processus et les conséquences du boisement spontané, s'est concentré sur les objectifs suivants :

- Etudier les processus de colonisation des prairies par le frêne et les conséquences écologiques de cette colonisation surtout au niveau de la biodiversité des prairies. Cette étude a constitué le sujet de thèse de Marie Pierre Julien (2006).

- Modéliser la transformation des systèmes d'élevage qui ont conduit à l'abandon des terres agricoles et à l'apparition des accrus de frêne.

- Elaborer des outils de simulation et de visualisation de scénario de gestion de l'espace et d'évolution des paysages en fonction de différentes options politiques. Cet objectif a fait l'objet d'un post-doctorat (Gonzales *et al.*, 2005). La suite de ce travail s'inscrit aujourd'hui dans le cadre du projet ADD-ANR TRANS (projet Agriculture Développement Durable sur les transformations de l'élevage et les dynamiques des espaces, financé par l'Agence Nationale de la Recherche) (Gibon *et al.*, 2009).

- Evaluer le potentiel forestier des accrus de frêne car ils représentent des peuplements monospécifiques denses qui pourraient être valorisés. Ce volet correspond à mon sujet de thèse.

Ma thèse s'inscrit donc dans ce programme de recherche sur les boisements spontanés (les accrus) démarré en 2001 en zone périphérique du Parc National des Pyrénées (PNP), initiateur de ce programme. Les études antérieures à ce programme concernaient surtout cette zone périphérique située en grande partie dans le département des Hautes-Pyrénées. Ce département a connu une augmentation de la surface boisée de 8 % entre 1949 et 1997 (Mottet, 2005), aussi on a élargi la zone d'étude pour prendre en compte 3 vallées dans ce département. On a gardé la même espèce en raison de son importance évoquée ci-dessus et parce que l'UMR dispose de quelques bases de données acquises sur les accrus de cette espèce lors d'études précédentes.

De plus, à DYNAFOR, une Base de Données (BdD) spatiales et temporelles, associée à un Système d'Information Géographique (SIG) a été réalisée (Figures 2 et 3). La coordination de la base de données et du SIG est assurée par l'ingénieur géomaticienne du laboratoire, Sylvie Ladet. Tout le travail de ma thèse en rapport avec ces outils a été réalisé avec sa collaboration.

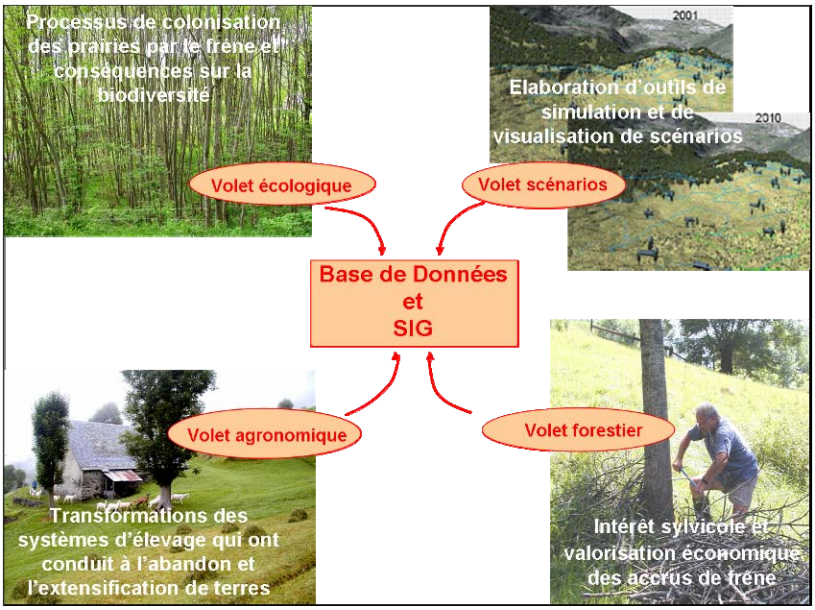


Figure 2 : Schéma représentant les 4 volets du programme de recherche de l'UMR DYNAFOR sur les accrus de frêne, articulés autour d'une Base de données et d'un SIG (d'après Mottet, 2005 (non publié)).

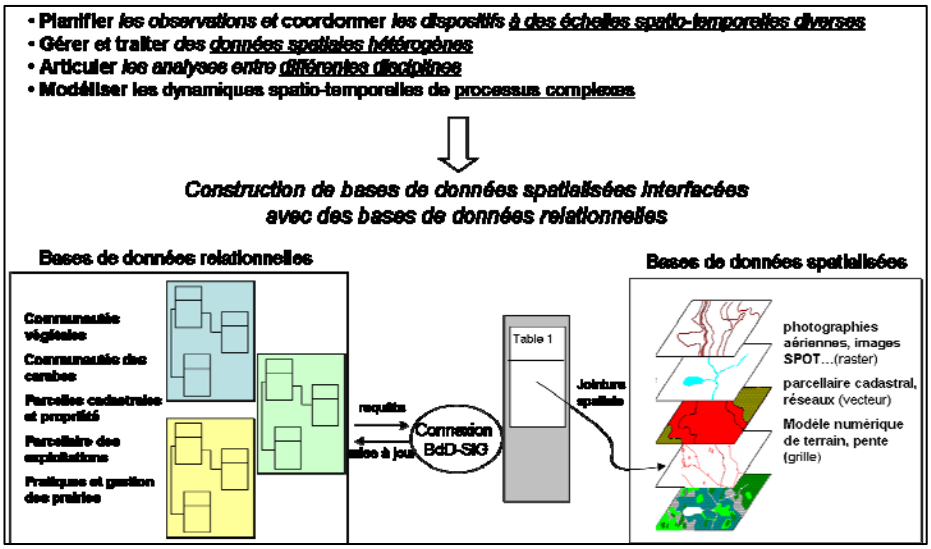


Figure 3 : Contribution du SIG dans le programme de recherche de l'UMR DYNAFOR sur les accrus de frêne (d'après Ladet (non publié)).

2. CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES DISPONIBLES

2.1. COLONISATION DES PATURAGES PAR LES LIGNEUX

La colonisation ligneuse des zones en déprise agricole suit généralement une succession végétale qu'on appelle secondaire car il s'agit d'une colonisation issue d'une perturbation sur une végétation déjà existante, contrairement à la succession primaire qui arrive sur des substrats pauvres en matière organique (Julien, 2006). Cette succession, qui commence sur des terres abandonnées ou des terres où l'utilisation est extensive, se dirige vers un stade forestier. Elle passe par une phase herbacée, puis arbustive et enfin par une phase forestière (Figure 4, Gauberville, 1997; Curt et *al.*, 2004).

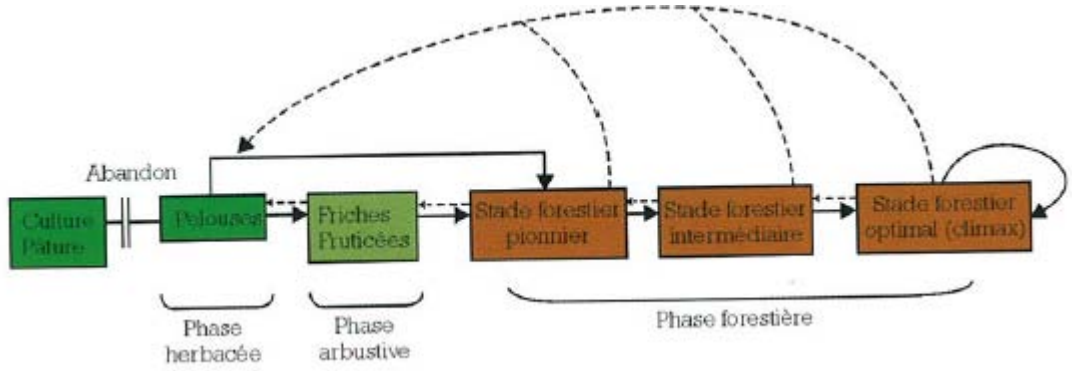


Figure 4 : Succession végétale après abandon. Les flèches pleines indiquent les principaux sens d'évolution et les flèches en pointillés les possibilités de régression suite à une perturbation. Les boisements spontanés se rencontrent dans les premiers stades de la phase forestière (Curt *et al.*, 2004).

Avec les perturbations menées surtout par l'homme (pâturage, feu…), la succession peut se bloquer à un stade donné ou régresser vers un stade antérieur (Figure 4, Rameau, 1999).

On peut distinguer 3 phases de la colonisation :

- l'arrivée qui est déterminée par la quantité des graines produite et disséminée dans le paysage. Cela est déterminé par les conditions climatiques (Wardle, 1959) qui influencent aussi avec les conditions de sol la germination des graines (Steinbauer, 1937);

- l'établissement qui correspond à la survie et la croissance de l'espèce. Cette phase dépend des conditions biotiques (compétition avec les herbacées) et abiotiques (climat, sol) et de processus comme la prédation (Wardle, 1959 ; Merton, 1970, Grime 1979 in Tapper, 1992, Prach *et al.*, 1996) ;

- **l'expansion** qui représente la capacité d'une espèce à étendre son aire de répartition dans les milieux qui ne sont pas encore colonisés, et qui dépend de l'écologie des graines et des facteurs environnementaux favorisant la présence de l'espèce (Julien, 2006).

L'existence et donc la répartition des peuplements des espèces colonisatrices et leur arrivée à un stade forestière avancé sont donc modulées par différents facteurs (conditions stationnelles, compétition, facteurs humaines…).

Comme les espèces pionnières possèdent un pouvoir de dissémination élevé (graines légères et nombreuses en général), elles ne sont pas nécessairement en station favorables sur les sols qu'elles colonisent (Gauberville, 1997). Ainsi, la bonne croissance des accrus et donc leur durabilité ne sont pas garanties. L'arrivée à la phase forestière (accrus) suite à la colonisation des parcelles agricoles abandonnées ne signifie donc pas la durabilité de ces accrus. De ce fait, il est particulièrement important d'étudier la croissance des différents accrus d'une même espèce pour connaître l'influence des facteurs du milieu sur leur croissance passée et à venir surtout qu'on a vu au-dessus l'importance des conditions stationnelles et de la compétition dans la croissance des espèces colonisatrices.

Le frêne est une espèce à croissance rapide, capable de produire une quantité de graines élevée et régulièrement distribuée (Julien, 2004). Avec toutes ces caractéristiques, il peut envahir le milieu durablement si les conditions stationnelles et biotiques lui sont favorables. Par rapport au schéma de la figure 4, dans le cas du frêne on passe directement d'une prairie pâturée à un stade préforestier monospécifique caractérisé dès le départ par une forte densité de jeunes tiges.

2.2. CROISSANCE

Sauf en cas d'accident sanitaire ou autre, la croissance d'un arbre d'âge donné dépend, outre son appartenance à une espèce (à un génotype) donnée, des potentialités stationnelles (sol, climat…) et des effets de la compétition. La croissance est donc le résultat de l'interaction entre ces différents facteurs.

Dans les peuplements forestiers, croissance et compétition sont très liées. La compétition résulte de la croissance des arbres, et inversement elle impose des contraintes et des limites à cette croissance (Dreyfus, 1988).

L'étude de la croissance d'une espèce ligneuse en relation avec les conditions stationnelles se fait par l'étude de la croissance en diamètre et en hauteur

Modélisation de la croissance

Dans les forêts, le système modélisé est constitué d'individus de grande taille, dont certaines dimensions sont difficiles à mesurer précisément et dont la durée de vie est longue. L'étude de la croissance se fait à travers différentes dimensions (hauteur, diamètre).

Le modèle de croissance est une fonction mathématique utilisée pour représenter l'évolution de la taille d'un organisme ou d'un organe en croissance en fonction du temps (Debouche C., 1979).

Dans la méthodologie de base des études sur la croissance, l'influence du milieu sur l'évolution moyenne de la croissance est prise en compte en introduisant sous forme de « facteurs », dans cette fonction mathématique, les variables du milieu supposées influer sur la croissance (l'alimentation en eau, l'alimentation minérale, le régime thermique, la pente, l'exposition, etc...). Pour simplifier, ces facteurs sont généralement considérés comme indépendants entre eux lors du traitement statistique, et leurs effets sur la croissance comme additifs (Millier, 1973 (in Le Goff et Levy, 1984)). C'est pourquoi, afin de tenir compte des interactions de ces facteurs dans la nature et de leur mode d'action réel sur la croissance, ils doivent être introduits dans le modèle sous une forme adaptée. (Le Goff & Levy, 1984).

Il est ensuite intéressant de pouvoir mesurer la contribution propre de chacune des variables explicatives entrant dans le modèle final en présence de l'ensemble des autres variables. L'examen des « résidus partiels d'estimation » permet de faire cette mesure (Le Goff & Levy, 1984).

Un modèle de croissance peut être utilisé comme un outil de prévision de l'évolution temporelle d'un peuplement. Il existe deux catégories principales de modèles de croissance selon l'unité modélisée : modèles de type « peuplement » et modèles de type « arbre ».

- Les modèles de peuplement : ils sont fondés sur une description globale des peuplements. Les variables dont on modélise l'évolution, sont les caractéristiques moyennes et/ou dominantes du peuplement. Ces modèles sont donc convenables pour des peuplements relativement homogènes, monospécifiques et équiennes.
- Les modèles d'arbres : ils sont basés sur la croissance de chaque arbre constituant le peuplement. On modélise donc la croissance individuelle des arbres et on procède ensuite par agrégation pour arriver au niveau peuplement. Ces modèles permettent d'obtenir des informations détaillées en intégrant des données plus complexes. Ils peuvent être dépendants ou indépendants des distances. Dans un modèle de croissance de type arbre, la croissance est considérée comme le produit d'un potentiel (station, ou station et âge) et de deux « réducteurs », l'un reflétant la concurrence globale au niveau du peuplement, l'autre la notion de concurrence à l'échelle de l'arbre. Ces deux réducteurs représentent la compétition par la densité et la compétition individuelle (Meredieu, 1998).

Dans les modèles dépendants des distances, chaque arbre est localisé par ses coordonnées spatiales. Pour relier la croissance et la compétition, des indices basés sur l'espace vital spatialisé de chaque arbre ont été constitués. Ces indices nécessitent la localisation des arbres les uns par rapport aux autres et ils peuvent aussi prendre en compte les dimensions relatives des arbres voisins et leur distance à l'arbre cible (Dreyfus, 1988). Les modèles de ce type constituent des outils d'étude importants pour des peuplements où la répartition des arbres

n'est pas régulière ou pour des peuplements mélangés. Ils peuvent aussi être intéressants dans le cas de peuplements monospécifiques et équiennes, comme outil stratégique permettant d'explorer des scénarios sylvicoles sur des placettes dont la répartition des arbres à conserver sera choisie par l'utilisateur (espacement à un âge donné, sylviculture d'arbres d'avenir).

Dans les modèles indépendants des distances, on caractérise le peuplement par des arbres et leurs dimensions, sans référence à leur localisation spatiale. Les sorties de ces modèles permettent d'effectuer des simulations sur des parcelles réelles dont on a fait l'inventaire pour choisir le meilleur scénario par rapport à un objectif donné. Ces modèles sont les plus courants car ils utilisent comme variables d'entrée des données issues d'inventaires classique (le diamètre à 1,30 m). Ex. le modèle pin noir (Dreyfus, 1988), le modèle développé par Dhôte (1990) pour le hêtre.

La plupart des modèles de croissance forestiers de type arbre établissent une relation basée sur le diamètre du tronc mesuré à 1,30 m du sol, qui est la variable la plus étudiée, en raison à la fois de sa facilité de mesure et de sa sensibilité à la compétition et aux conditions stationnelles (Meredieu, 1998).

Choix du modèle

Dans les Pyrénées centrales, les propriétaires s'interrogent sur l'intérêt des accrus et sur la méthode sylvicole nécessaire pour les gérer. On sait que la rapidité de la croissance du frêne et les qualités mécaniques de cette espèce ne peuvent être atteintes que dans des conditions optimales (Le Goff et Levy, 1984). Pour cette raison, et pour pouvoir répondre aux questions sur la valeur d'avenir des accrus, il faut un outil capable de répondre à la question : qu'est ce qui se passe si … ? et donc de permettre une prévision de l'évolution de la parcelle pendant une durée donnée. Mais cet outil doit aussi permettre de choisir la façon d'intervenir pour arriver à un objectif sylvicole donné, en enregistrant les effets sur la croissance de différents modes d'interventions, afin d'aider à la gestion sylvicole de ces peuplements dans des conditions stationnelles données. La structure de cet outil peut donc être constituée d'un modèle de croissance intégrant à la fois les facteurs stationnels majeurs et la compétition, qui module la croissance et caractérise la sylviculture. Pour construire le modèle, il faut mobiliser deux catégories d'informations : les données récoltées et la connaissance biologique et écologique de l'espèce.

Un modèle de type arbre est l'outil le plus adapté pour répondre à la demande d'informations détaillées dans un objectif de production de bois. L'hétérogénéité de la répartition des arbres dans nos peuplements naturels et le mode d'intervention réalisé (intervention en faveur des arbres d'avenir) exige l'utilisation d'un modèle arbre dépendant des distances. Ainsi, notre travail s'adresse d'abord aux individus, surtout à leurs tiges, puis à la détermination de la potentialité des peuplements à travers ces individus.

2.3. ECOLOGIE DU FRENE ET SES RELATIONS AVEC LES CONDITIONS STATIONNELLES

2.3.1 DISTRIBUTION NATURELLE DU FRENE

Le frêne est présent sur une large gamme de conditions climatiques (climats océaniques à continentaux) et d'altitude (600 dans le nord d'Europe et 1650m dans les Alpes ; Marigo et *al.*, 2000. il peut même atteindre 1800m dans le Caucase) en Europe (Figure 5). En France, il n'est absent qu'au bord de la Méditerranée. Le frêne commun est une espèce très sensible aux incendies, c'est pourquoi il est absent des zones où se produisent des incendies répétés (Tinner *et al.*, 1999).

L'expansion du frêne commun en Europe est un phénomène récent. La distribution du frêne s'est développée en fonction de facteurs historiques naturels et anthropogéniques (Marigo *et al.*, 2000). Suite aux activités (perturbations) humaines, le frêne a connu de nouveaux environnements et sa fréquence a évolué en fonction du temps et de l'espace. Grâce à son ubiquité, il a été favorisé pendant les dernières décades sur les surfaces agricoles abandonnées.

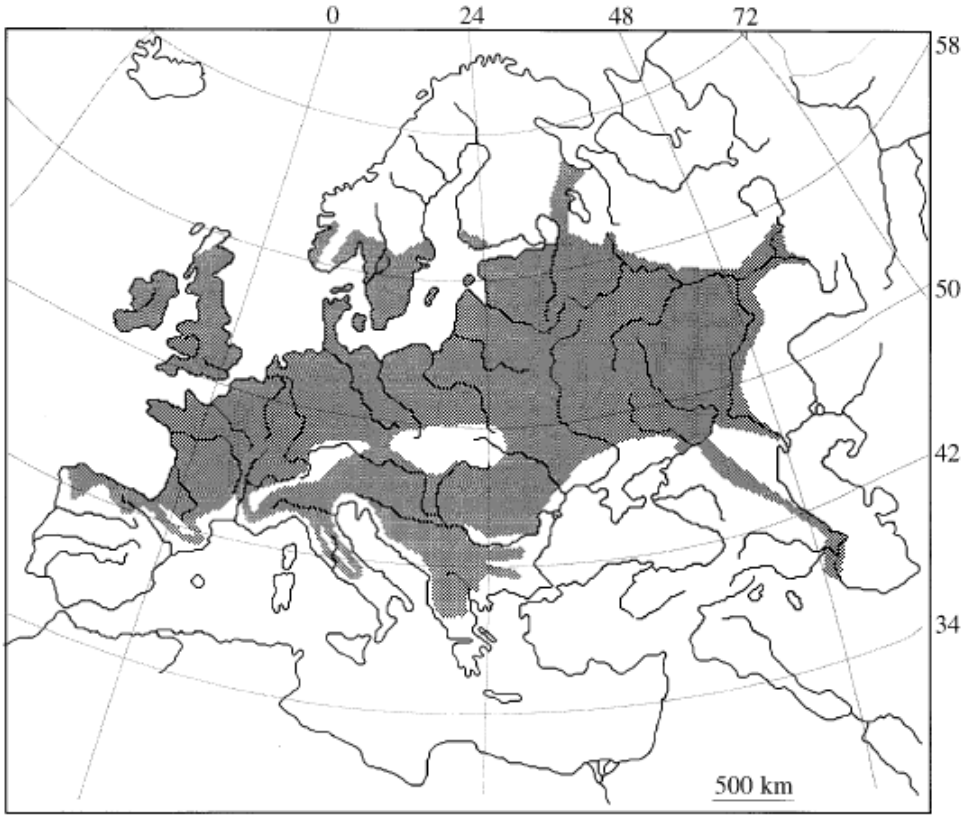


Figure 5 : Zones de distribution de frêne commun en Europe **(source : Marigo *et al.*, 2000)**.

2. 3. 2. FACTEURS ABIOTIQUES ET LEURS EFFETS SUR LE FRENE

2. 3. 2. 1. Facteurs édaphiques

Les stations optimales pour le frêne sont les stations fraîches, sur sol bien drainé à bonne structure et si possible à substrat calcaire. L'idéal est un sol brun, limoneux, profond, bien alimenté en eau, avec roche mère crayeuse ou calcaire. Les sols alluviaux de fond de vallons, même sans ruisseaux ou des vallées de rivières et de fleuves conviennent également très bien. Les plus belles frênaies ont été vues sur des terres agricoles et sur des sols colluviaux ou alluviaux riches et profonds (Faure *et al.*, 1975; Claessens, 1997; Poulain, 2000; Armand & Courrivault , 2003; Kerr & Cahalan, 2004). Dans ces conditions, le frêne peut atteindre environ 27 m en hauteur à l'âge de 50 ans en Belgique (Kerr & Cahalan, 2004). Pour les arbres dominants* [1], une relation a été établie entre la croissance en hauteur et la profondeur du sol (Watt, 1924; Le Goff & Levy, 1984). De même, en Belgique, la productivité du frêne (la croissance en hauteur à l'âge de 50 ans) a été reliée aux conditions édaphiques du site (profondeur, eau disponible…) (Claessens *et al.*, 1999).

La littérature scientifique parle de l'humidité du sol et de la richesse en éléments nutritifs comme facteurs édaphiques les plus déterminants de la distribution et de la croissance du frêne avec quelques réactions au pH dont l'impact ne se réduit pas à déterminer l'existence ou l'absence du frêne mais aussi sa croissance et la structure du peuplement.

- pH :

Le pH est un facteur limitant de l'existence du frêne. Son impact est dû à différentes raisons, notamment le fait que les racines ne peuvent pas vivre dans des sols d'acidité élevée (pH < 4,2 ; (Wardle, 1961). Dans les « Sussex Downs » (au Sud-est de la Grande Bretagne), l'acidité élevée du sol de quelques zones semblerait être la cause de l'absence du frêne dans ces zones. Les seuils maximum et minimum de pH sont différents d'un site à l'autre. Dans le « Lake District » (Grande Bretagne), il est de 4,38- 4,98 au minimum. Le maximum est de 8 sur quelques sites, 8,26 voire 9 au sud d'Angleterre (Gordon, 1964). En outre, il semble que l'acidité jusqu'à 7,6 peut favoriser la croissance du frêne. On ne sait pas si cet effet est liée à une relation entre le pH et le ratio C/ N, notamment une cessation de nitrification a été notée quand le pH était inférieur à 3,8 (Gordon, 1964).

- Alimentation en eau et relation avec la croissance en hauteur

La croissance du frêne diminue quand il rencontre des vents forts qui entraînent une perte d'eau et des sols secs (Watt, 1924; Wardle, 1961). Selon Carlier et al. (1992), le frêne transpire une grande quantité d'eau sur les sites qui ont une bonne alimentation en eau, alors que sur des sites plus secs, le frêne est moins exigeant en eau. Bien que le frêne préfère les sols humides, il peut montrer une tolérance à la sécheresse grâce à l'ajustement osmotique et élastique (Peltier and Marigo, 1997). Cependant, cette tolérance est limitée dans le cas d'un stress hydrique qui influence négativement la photosynthèse et donc la croissance (Aussenac, 2000). Wardle (1961)

[1] L'étoile * signifie un renvoi au glossaire

a vu que le frêne demeure à l'état d'arbuste quand l'alimentation en eau est très limitée (Kerr & Cahalan, 2004).

Du fait de la différence de disponibilité en eau entre le bas et le haut de pente, la croissance du frêne varie selon la position sur la pente : la croissance des arbres qui se situent sur le bas de la pente (alluvial, riche) est plus rapide que celle des arbres du haut de la pente (Merton, 1970). Il est donc évident que le frêne exige des conditions humides du sol, mais il ne faut pas oublier qu'il ne supporte pas l'inondation, ni les sols compactés. Une analyse des cernes de frêne à Chippenham (Grand-Bretagne) a montré une corrélation entre la croissance importante du frêne et les périodes de drainage (Kassas, 1950).

- Nutrition minérale et relation avec la croissance en hauteur

Le frêne préfère les sols fertiles, c'est pourquoi on constate que ses feuilles sont riches en éléments minéraux (Wardle, 1961). L'étude de la relation entre la composition foliaire et la hauteur (le niveau de croissance en hauteur a été estimé en utilisant la hauteur moyenne des arbres dominants et co-dominants à l'âge de 50 ans) en Grande Bretagne (dans l' « English Lake District »), a mis en évidence qu'il y a une relation entre la croissance en hauteur et la composition en N et P, mais pas avec la composition en Ca et K. L'examen détaillé montre que l'azote a un effet avéré indépendant sur la croissance du frêne, et qu'il n'y a pas d'effet du phosphore indépendant de celui de l'azote (Gordon, 1964). Sur les montagnes des Vosges, le frêne n'apparaît que sur les sols de C/ N< 15 et de saturation de base (BS) > 30 (BS : $(Mg^{++} + Ca^{++} + K^{+})/ (Mg^{++} + Ca^{++} + K^{++} Al^{+++}+H^{+})$) (Pinto & Gégout, 2005). Cependant, ces relations sont différentes d'un site à l'autre. Au sud d'Angleterre, Manshard (1933) (in Kerr, 1995) a montré que le frêne est plus exigeant en éléments nutritifs que le hêtre et le chêne, surtout pour l'azote et le potassium. Sur la même région, Evans (1986) a noté une augmentation de diamètre du frêne suite à une fertilisation en N et K. Sur un site à sol fertile en Irlande, les feuilles sont riches en azote et en potassium, mais le niveau de phosphore est sous optimal, et la croissance rencontre des problèmes (Joyce, 1998). Par contre, en Nord Picardie, une étude a montré que la nutrition minérale n'intervient pas sur la croissance du frêne dans cette région (Le Goff & Levy, 1984). En Belgique, la composition chimique des sols n'influence pas non plus les indices de fertilité des sites (Claessens *et al.*, 1999).

2.3.2.2. Le climat

Peu d'études ont été faites sur la relation entre le frêne et les facteurs climatiques. Des allusions apparaissent parfois dans quelques études. Wattel a trouvé que le frêne connaît actuellement une baisse de son potentiel de croissance due à des causes climatiques, notamment un manque d'eau, mais aussi à une baisse d'exploitation (Wattel, 1998). En Grande Bretagne, des chercheurs ont classifié le territoire anglais en 336 zones en fonction du climat, de la richesse de sol et de son humidité. Ils ont trouvé que le frêne est optimal sur les sites de climat à la fois chaud et humide, avec des sols riches et humides. A l'âge de 50 ans, il atteint 21,5 m de hauteur sur ces sites (Kerr & Cahalan, 2004). Le climat contrôle donc la distribution, l'existence et la croissance du frêne. L'absence de frêne dans les prairies de l'Est de la France et dans les basses zones de la région méditerranéenne peut s'expliquer par l'été chaud dans ces régions (Wardle, 1961). Sur

plusieurs sites calcaires où les précipitations sont élevées, on peut trouver des peuplements de frêne (Watt, 1924). Une sensibilité du frêne vis-à-vis des précipitations en mai même dans des sites où il y a de hydromorphie pendant l'hiver a été notée en Angleterre (Derbyshire) (Wardle, 1961). Dans le massif de Vosges, une étude met en évidence une relation entre la distribution des arbres (dont les frênes) et les conditions climatiques et nutritives. La disponibilité en eau est le facteur climatique le plus déterminant des espèces arborescentes (Pinto & Gégout, 2005). Cela n'annule pas le rôle de la température, un autre facteur important qui conditionne aussi la germination du frêne (Steinbauer, 1937). Il est donc évident que la température et les précipitations sont les facteurs les plus importants, mais on ne peut pas négliger d'autres facteurs comme le gel.

Le frêne montre une sensibilité importante à ce facteur. Ex. -3 C° pour 18 heures cause la fourchaison du frêne (Kerr & Cahalan, 2004). La résistance au froid est différente d'une saison à l'autre. Le gel tardif est très dommageable, alors qu'en hiver il doit être très fort (-27 °C pour au moins 6 heures) pour que les lésions du bourgeon terminal commencent à apparaître (Ningre *et al.*, 1992). Les bourgeons des semis ont été tués par la température de -3° C pendant 17,5 heures au printemps (avril et mai), alors qu'en octobre rien n'a été altéré par -3° C (Wardle, 1961).

L'impact du climat sur le frêne est donc différent d'un site à l'autre mais il reste un facteur important qui peut influencer la distribution, la croissance, la forme du tronc et donc la qualité du bois.

2.3.3. FACTEURS BIOTIQUES ET LEURS EFFETS SUR LE FRENE

2.3.3.1. Ennemis naturels

Plusieurs ennemis naturels peuvent influencer négativement le frêne (Bertrand, 2001). Les cervidés abroutissent les plantules et les jeunes pousses et piétinent les plantules et les jeunes plants. Les lièvres et les lapins causent aussi des dégâts sur les pousses. La destruction des populations des lapins en Grande Bretagne suite à la myxomatose en 1950 a entraîné une augmentation énorme des plantules de frêne (Thomas, 1960). Merton (1970) indique qu'une régénération importante de frêne commun a accompagné cette crise. Les insectes aussi peuvent endommager le frêne par des prélèvements de morceaux d'aubier provoquant son dépérissement (frelon, *Vespa crabo*), ou par une consommation des bourgeons qui retarde le développement des pousses ou encore par une consommation des feuilles qui dépare la plante et peut ralentir la croissance (charançon du frêne, *Streonychus fraxini*) (Alford *et al.*, 1994). De plus, des bactéries comme *Pseudomonas savastanoi* et des champignons comme *Nectria galligena* (Abras *et al.*, 2005) peuvent provoquer des chancres qui endommagent surtout le bois (Duflot, 2002).

2.3.3.2. Compétition

La compétition interspécifique pour la lumière, l'eau ou la nutrition minérale peut être un facteur principal qui influence la structure et la dynamique de la communauté végétale. Elle influence aussi la croissance des espèces de cette communauté. La compétition racinaire entre les plantules de frêne et les herbacés peut entraîner une diminution de 90 % de la biomasse du frêne (Bloor *et al.*, 2008). En ce qui concerne la compétition du frêne avec les autres espèces ligneuses, il montre une bonne croissance et donc une dominance lors de la compétition avec le chêne et le hêtre. Il peut même « sacrifier » sa croissance en diamètre en faveur de sa croissance en hauteur pour conserver son statut social (sa dominance). Ce cas a été noté pour un peuplement mixte de frêne et de merisier (Kerr, 2004). La compétition interindividuelle (intraspécifique) a aussi un effet important sur la croissance du frêne, qui semble sensible à ce type de compétition (Wattel, 1998), mais on a peu de références sur ce point.

2.4. INTERETS DU FRENE

2.4.1. INTERET AGRO-PASTORAL

Le frêne est une espèce qui existe largement dans le paysage français. Il est utilisé depuis longtemps dans les montagnes comme complément de bois de chauffe et de fourrage (Gomez & Fillat, 1984). La valeur fourragère de ses feuilles est très élevée. Elles ont une forte digestibilité et un nombre élevé d'éléments minéraux (Robbe, 2005; Bertrand, 2001). Ces utilisations du frêne expliquent les formes principales sur lesquelles on le rencontre dans le paysage français : en têtard et en arbre d'émonde (Photo 1). Le frêne en têtard ne dépasse pas les deux mètres de hauteur, et il est taillé tous les 15-20 ans pour le bois de chauffage et tous les 3 ans pour le fourrage. L'arbre d'émonde, comme le têtard, fournit du fourrage, du bois de chauffage et aussi du bois d'œuvre. Pour cela, il est taillé plus haut, entre 5 et 7 mètres, tous les 5 à 10 ans. Une autre forme de frêne peut être rencontrée, l'arbre de haute tige qui ne fournit que du bois d'œuvre après abattage à pleine maturité.

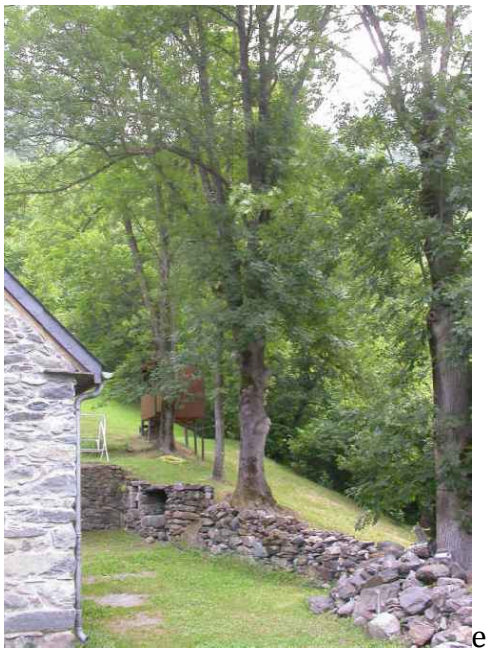
Dans notre zone d'étude comme dans toutes les Pyrénées, le frêne se trouve surtout en forme d'arbre d'émonde autour des granges et en bordure des parcelles (Photo 1). La forme têtard est très peu rencontrée.


a


b


c


d


e


f

Photo 1 : Différentes figures de frêne : exemples d'un frêne têtard (a et b) ; Frênes autour des granges (c et d) ; Vieux frêne émondé (e) ; Frêne récemment émondé (f).

2.4.2. INTERET MEDICAL

Les propriétés thérapeutiques des feuilles, des fruits et de l'écorce du frêne sont depuis très longtemps connues des populations paysannes. Ainsi, ils ont longtemps constitué un ingrédient incontournable des remèdes utilisés contre de nombreux maux. Les feuilles de frêne ont des propriétés inti-inflammatoires et aussi laxatives. Depuis longtemps, l'écorce a été utilisée pour ses propriétés fébrifuges (qui diminuent la fièvre). La médecine à base de frêne a connu son heure de gloire avant l'apparition de nos médicaments modernes, et ce jusqu'à la seconde Guerre Mondiale. Cependant, on trouve actuellement encore dans les pharmacies des tisanes, granules et gélules contenant du frêne (Robbe, 2005).

2.4.3. INTERET SYLVICOLE

L'attraction du frêne est sa capacité à donner du bois de qualité en rotations courtes (Kerr, 1995; Kerr & Cahalan, 2004). C'est un bois dur, élastique et moyen en rétractibilité (Nepveu, 1992). Cette qualité justifie l'utilisation du bois de frêne en menuiserie et justifie aussi la classification de frêne comme espèce précieuse.

Les enjeux les plus importants posés par le bois de frêne sont :

1) la rectitude (Armand & Courrivault, 2003).

2) la fourchaison : le gel tardif, le gel précoce, la compétition herbacée pour l'eau et parfois des facteurs biotiques comme les insectes, sont les facteurs principaux qui causent ce phénomène. La fourchaison a des conséquences négatives sur la rectitude du tronc et la qualité du bois (Ningre *et al.*, 1992).

3) l'altération du bois par :

- Les chancres déformant les tiges et les branches et altérant le bois.
- le cœur noir qui n'affecte pas les qualités technologiques mais est un inconvénient pour le marché. Les causes de ce phénomène ne sont pas certaines. Evans (1984) a trouvé que le cœur noir est lié aux sols humides marécageux et aussi aux arbres âgés (80 ans) de croissance lente et aux arbres issus de rejets de souche (Kerr, 1995). En général, il apparaît à partir de 70-80 ans.

Dans l'objectif d'une exploitation sylvicole du frêne afin d'obtenir du bois de qualité, il faudrait donc surtout accélérer sa croissance (Faure *et al.*, 1975; Bessières, 1992; Claessens, 1997). Cette croissance rapide éviterait d'avoir le cœur noir et elle fournirait davantage de « bois d'été », lequel confère au bois de frêne sa résistance grâce à sa densité, et son 'élasticité qui permet une utilisation de son bois pour les outils (Joyce, 1998). En revanche, quand les conditions peu favorables, la croissance se ralentit. On doit attendre longtemps dans ce cas pour avoir des dimensions importantes, ce qui augmente le risque d'avoir un cœur noir (Soulères, 1997) et le bois devient plus facile à casser (Joyce, 1998).

Ces informations montrent l'importance des interventions sylvicoles, qui peuvent conduire à une croissance et à une qualité plus importantes, et peuvent répondre aux demandes des propriétaires pour valoriser ces accrus (Guyon, 1999).

2.5. SYLVICULTURE DU FRENE

Pour le frêne, le but des gestionnaires de forêts privées est d'obtenir des arbres de 70 cm de diamètre à 75-85 ans. Aucun peuplement respectant cette exigence n'a été trouvé même dans des stations apparemment favorables. Le manque de dépressages et d'éclaircie fortes dans les 50 premières années dans les peuplements issus de régénération naturelle pourrait expliquer le non respect de cette exigence (Faure *et al.*, 1975). L'éclaircie améliore en fait, les conditions du milieu et donc la croissance (Pouderoux *et al.*, 2001) ; et l'éclaircie précoce permet un développement des racines et de la tige et donc une amélioration de la stabilité du peuplement (Aussenac, 2000).

Pour l'éclaircie, la plupart des études confirment l'importance de l'éclaircie précoce pour éviter de freiner la croissance du peuplement et éviter les risques sanitaires et de chablis (Pichard, 2002). Pichard (2002) montre que l'éclaircie des plantations est bénéfique dès qu'ils atteignent 8- 10 m de hauteur totale*. Kerr (1995) propose que l'éclaircie doit être faite dès que l'arbre atteint 6- 7 m de hauteur pour une densité de 2500 arbres/ ha. Dans le même sens, Claessens (1997) trouve qu'une éclaircie forte et précoce dès que possible permet d'avoir une circonférence de 150 cm dès 50 ans dans les meilleures conditions stationnelles. Les normes pour déterminer l'âge d'exploitation peuvent changer selon les conditions du sol et le diamètre final souhaité pour les arbres. Selon Pichard (2002), cet âge se situe aux alentours de 50-70 ans pour une densité de 60-120 arbre/ha. Kerr (1995) estime que le bois de qualité doit avoir un tronc droit de 6 m de hauteur et de 40- 60 cm de diamètre et que dans de bonnes conditions stationnelles, le frêne peut y arriver à l'âge de 50 ans.

La modalité d'éclaircie recommandée est aussi différente d'une étude à l'autre. Kerr (1995) propose de faire des éclaircie successives en passant d'abord de 2500 arbres/ha à 300-350 arbres/ ha pour aboutir à une récolte finale de 120- 150 arbres/ ha. Dans les peuplements fermés, Joyce propose une éclaircie en suivant le système de coupe progressive (« shelterwood ») avec une ouverture légère du peuplement en forme de cercle (30 m) pour la lumière. Ainsi, les semis s'établissent. On étend progressivement ces zones (direction opposée au vent dominant). Petit à petit, tout le peuplement va être coupé et régénéré (Joyce, 1998).

D'autres interventions sylvicoles comme la taille de formation sont aussi importantes pour le frêne. La taille en vert (réalisée mi-juin après les dernières gelées de printemps) est importante selon Poulain (2000) pour corriger les fourches avant qu'elles ne déforment l'axe de l'arbre (Poulain, 2000). Kerr (1995) pense qu'il faut éliminer les fourches et les grosses branches jusqu'à arriver à 5 m de hauteur (entre janvier et novembre) (Kerr, 1995). Une étude en Irlande a montré également un impact positif de la taille de formation sur la qualité des arbres plantés à 1.5 X 1.5m où à 2.5 X 2.5m. 85% des arbres taillés sont de bonne qualité. En ce qui concerne la croissance, la taille de formation a un impact positif sur la croissance en hauteur du frêne, mais peut avoir un effet négatif sur la croissance en diamètre (Bulfin & Radford, 1998).

3. OBJECTIFS ET DEMARCHES

3.1. OBJECTIFS

Le travail de cette thèse vise à estimer et à prédire la répartition et la croissance des accrus de frêne dans les Pyrénées Centrales afin d'évaluer le potentiel forestier de ces peuplements et à leur avenir. On cherche en premier lieu à évaluer l'ampleur de ce phénomène dans les Pyrénées Centrales et à expliquer l'existence des accrus dans une perspective de prédiction des zones susceptibles d'être envahies par des accrus de frêne. Puis, on cherche à caractériser le développement du frêne en relation avec les facteurs du milieu dans l'objectif de fournir des références régionales sur le potentiel sylvicole des accrus de frêne et de détecter les peuplements les plus intéressants économiquement.

Ces objectifs ont été poursuivis sous la forme des actions suivantes :

1- Étudier la répartition spatiale des accrus de frêne dans les Pyrénées Centrales. Pour cela, on a voulu :

> **1- Cartographier les accrus de frêne dans les Hautes-Pyrénées par les méthodes de télédétection (photos aériennes, images satellites…).**
>
> **2- trouver les facteurs explicatifs de la présence des accrus.**

2- Étudier la croissance de ces accrus et leur potentialité. Pour cela, on a voulu étudier :

> **1- l'impact des conditions stationnelles sur la croissance du frêne. Les conditions stationnelles étudiées concernent le climat (précipitations et température) et la nutrition minérale.**
>
> **2- étudier l'effet de la compétition intra-spécifique sur la croissance des accrus de frêne en place et suite à des interventions sylvicoles.**

L'étude de la croissance en fonction de ces facteurs doit contribuer à la construction d'un modèle de croissance propre à la zone d'étude.

3.2. STRATEGIE

Le site initial étudié se situe sur la commune de Villelongue, dans la vallée du Gave du Pau. Ce site d'étude a été choisi à l'origine lors du démarrage du projet de recherche sur les boisements spontanés de l'UMR DYNAFOR suite à une visite de terrain en compagnie de membres du Parc National des Pyrénées (initiateur du projet) dans le département des Hautes-Pyrénées. Le site se trouve en région de moyenne montagne où l'activité agricole est présente mais en réel déclin depuis ces dernières décennies (« *diminution de 22% du nombre d'exploitations agricoles depuis 1970 »,* (Arthur *et al.,* 2000) et où le processus de colonisation des pâturages par le frêne

(*Fraxinus excelsior)* est particulièrement important (Figure 6). On a ensuite élargi cette zone d'étude initiale à d'autres communes sur 2 autres vallées (Carte 1).
Deux échelles imbriquées ont été retenues pour pouvoir prendre en compte les différents niveaux d'organisation nécessaires à l'étude :

- Une échelle régionale

Pour avoir une grande variabilité des peuplements et des conditions stationnelles, trois vallées dans le département des Hautes-Pyrénées (65) ont été retenues pour cette étude : la vallée du Gave de Pau, la vallée d'Adour et la vallée d'Aure (Carte1).

- Une échelle locale

Pour l'étude de la répartition des accrus, on a élargi le dispositif initial en choisisant deux autre communes voisines de Villelongue pour la télédétection et à trois autres communes par vallée pour l'étude explicative (chapitre « Répartition spatiale des accrus », Carte 3).

Pour l'étude de la croissance, deux peuplements d'accrus de frêne (à partir de 10 cm de Dbh) ont été sélectionnés dans chacune de ces vallées par prospection de terrain. Le choix de deux peuplements par vallée a été fait en raison de la variabilité apparente des caractéristiques de ces peuplements, et en prenant en compte la possibilité d'utiliser ces peuplements pour appliquer des expérimentations sylvicoles. Les parcelles correspondantes se situent sur 3 communes (communes de Villelongue, de Beaudéan et d'Arreau) (Cartes 1 et 2).

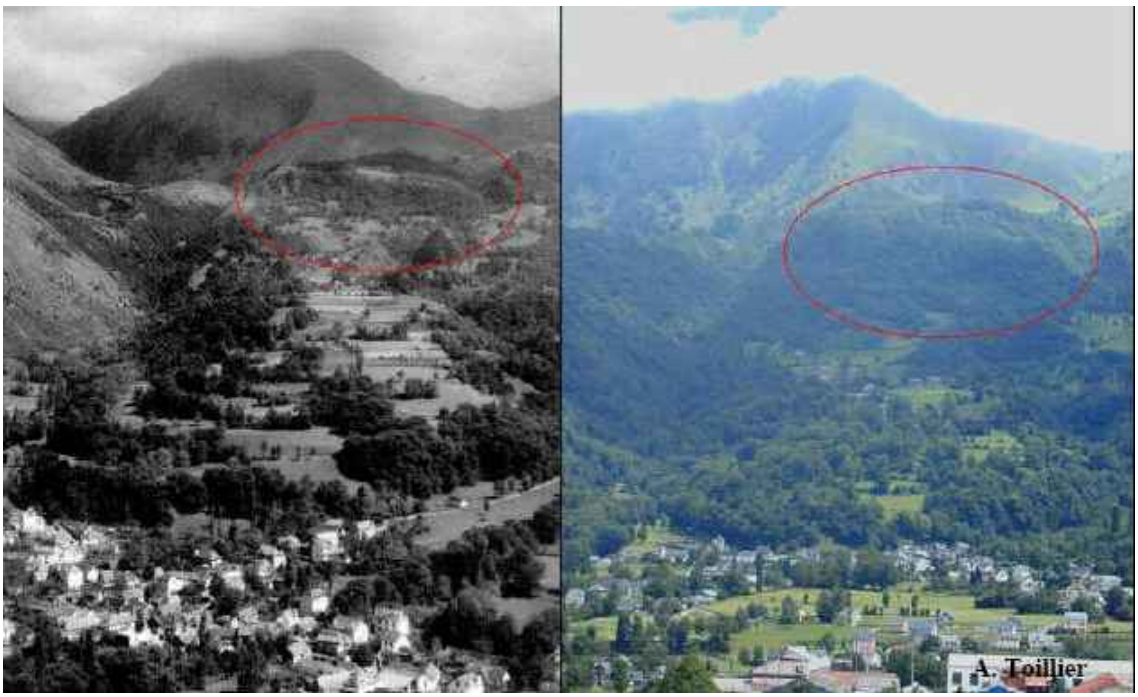
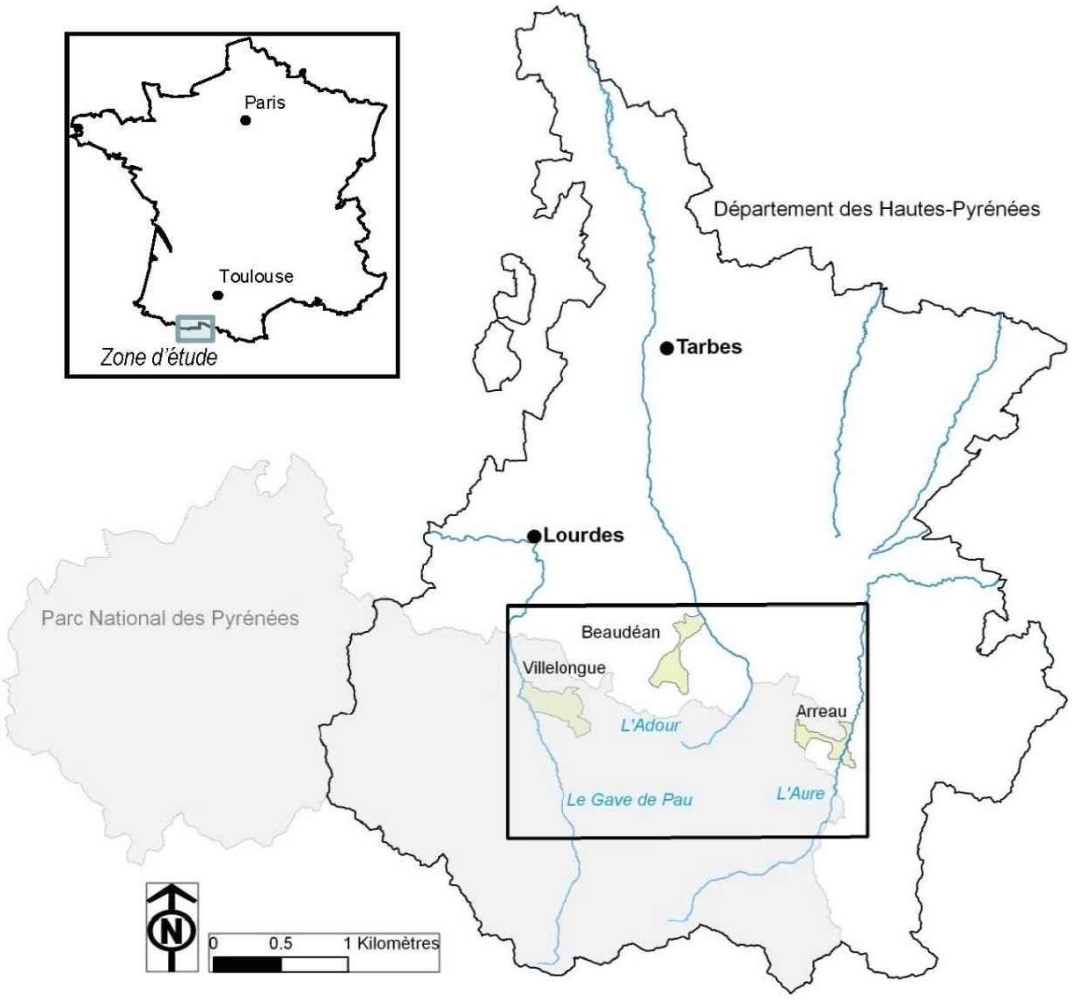
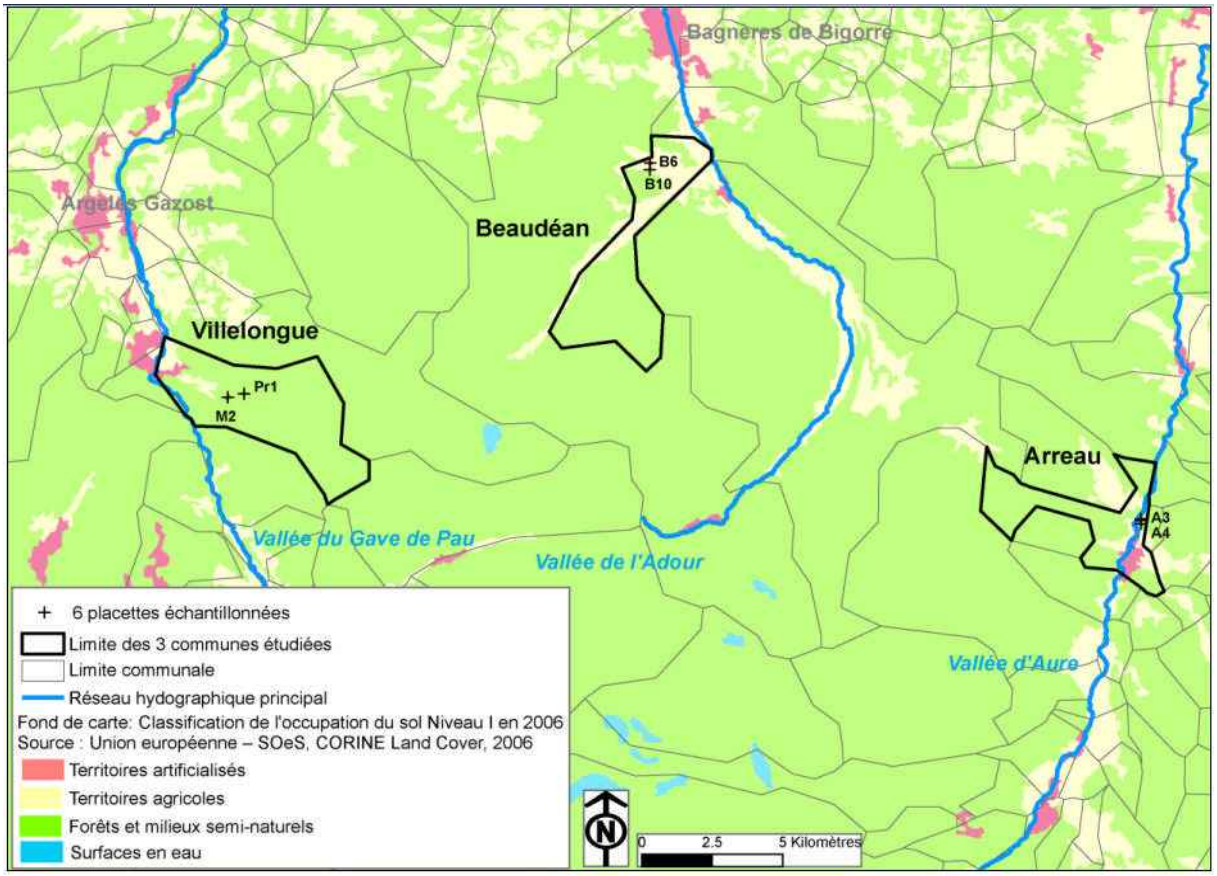


Figure 6 : Expansion des boisements spontanés de frêne sur la commune de Villelongue. A gauche : carte postale de Villelongue de 1950, à droite : photo prise avec le même angle de vue en 2001.



Carte 1 : Localisation de la zone des 3 vallées dans le département des Hautes-Pyrénées et par rapport à la zone périphérique du Parc National des Pyrénées et localisation des 3 communes étudiées dans les 3 vallées.



Carte 2 : Les 3 communes contenant les 6 parcelles étudiées.

3.3. DÉMARCHES

3.3.1. DÉMARCHES GÉNÉRALES

A l'inverse des peuplements plantés (où les conditions de milieu sont connues et contrôlées, et le plus souvent même choisies), la durabilité d'un peuplement naturel spontané à l'origine d'une colonisation, comme les accrus, n'est pas acquise et nécessite donc d'être précisée. Pour cela, il faut étudier sa croissance et les facteurs qui influencent cette croissance. Dans le cas où les accrus sont durables, on peut améliorer la croissance par des interventions sylvicoles qui contrôlent certains de ces facteurs influant cette croissance, et qui garantiraient d'intéressants revenus pour leurs propriétaires.

Comme on a décidé de travailler sur les accrus de frêne au niveau du département 65, on a cherché d'abord à estimer l'ampleur de ce phénomène dans ce département, c'est-à-dire à savoir où se trouvent ces accrus et à estimer leurs surfaces, en utilisant les outils de la télédétection. Ensuite, on a cherché à déterminer les facteurs explicatifs de leur présence/ absence. Puis, dans les zones avec accrus, on a voulu savoir comment et pourquoi ils s'y développent. Pour cela la croissance a été étudiée en relation avec les facteurs qu'on a supposés les plus importants : pour les facteurs abiotiques, le climat et la nutrition minérale, et pour les facteurs biotiques la compétition intraspécifique. Comme la compétition est un facteur que l'on peut contrôler, nous

avons expérimentalement modifié ce facteur en faisant des interventions sylvicoles. On a étudié la croissance des accrus suite à ces interventions pour déterminer la réaction du frêne aux modifications de la compétition. Dans la perspective d'une valorisation économique éventuelle de ces peuplements, notre démarche devrait aider à déterminer une méthode d'amélioration de la croissance adaptée aux peuplements et aux conditions stationnelles.

On a donc fait le choix de préciser le rôle particulier de chaque variable susceptible d'influencer la croissance, en partie par une approche expérimentale. On a testé chaque variable à partir d'hypothèses émises dans la littérature.

L'étude de la croissance et de ses facteurs limitants doit permettre de construire un modèle de la croissance des accrus de frêne dans les Pyrénées Centrales servant comme outil de gestion.

3.3.2. DEMARCHES POUR L'ETUDE A L'ECHELLE LOCALE

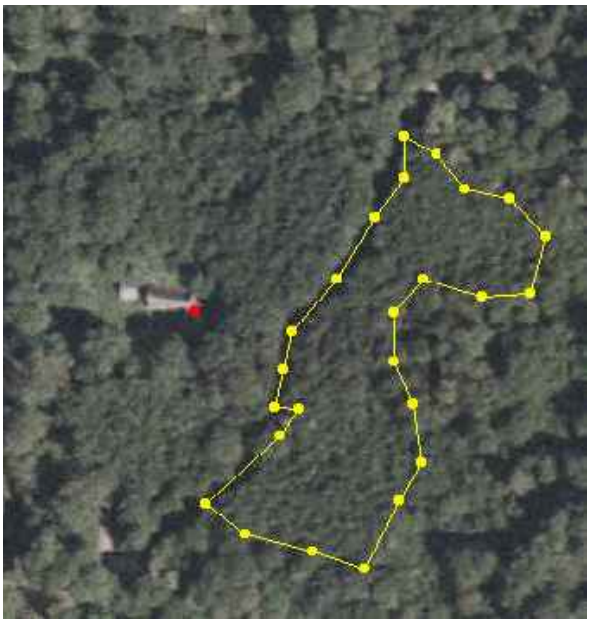
Pour l'étude de la répartition spatiale, nous avons choisi plusieurs communes des trois vallées sur lesquelles, nous avons d'une part recherché des accrus à partir d'outils de télédétection (3 communes du Gave de Pau), et d'autres parts nous avons plaqué 9 grilles composées de mailles d'un hectare sur les territoires privées de 9 communes (3 par vallée). Dans ces grilles, 300 mailles aléatoires ont été décrites au sol pour vérifier la présence et l'abondance du frêne (chapitr « répartition spatiale », Carte 3).

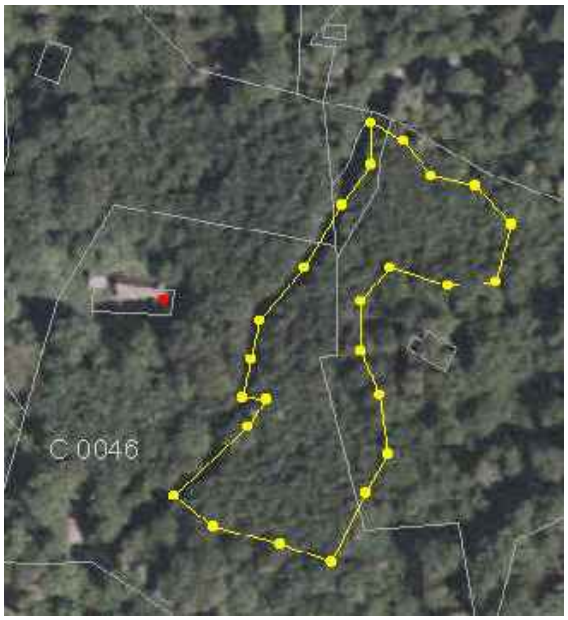
Pour l'étude de la croissance, nous avons souhaité mettre en place des expérimentations de croissance avec un suivi tout au long de ma thèse. Il a donc été essentiel d'établir une relation de partenariat avec les propriétaires privés.

Pour délimiter exactement les accrus de frêne trouvés lors de la prospection de terrain et identifier les parcelles cadastrales sur lesquels ces accrus se sont développés, nous avons mis en place un « arpentage »[2] systématique de tous les peuplements susceptibles d'être utiliser dans notre étude. L'arpentage consiste en une succession de trajectoires enchaînées où les coordonnées polaires sont notées (on prend une longueur et un angle en utilisant respectivement une boussole et un ruban gradué). L'ensemble d'un cheminement constitue une « polygonation ». Cette polygonation est fermée lorsqu'on mesure une surface (on rejoint le point de départ) (Figure 7).

Bien que cette technique soit coûteuse en temps, elle est plus adaptée que le GPS (Global Positioning System) au milieu forestier pour délimiter et calculer la surface d'un peuplement « parcelle ». En effet, l'imprécision du GPS en forêt (Lejeune, 2001; Piedallu & Gégout, 2002) entraîne un décalage des limites.

[2] Arpentage en coordonnées polaire levé par cheminement (source URL : http://www.ulb.ac.be/soco/apft/THEMES/TEXTE/ethnoag6.htm)





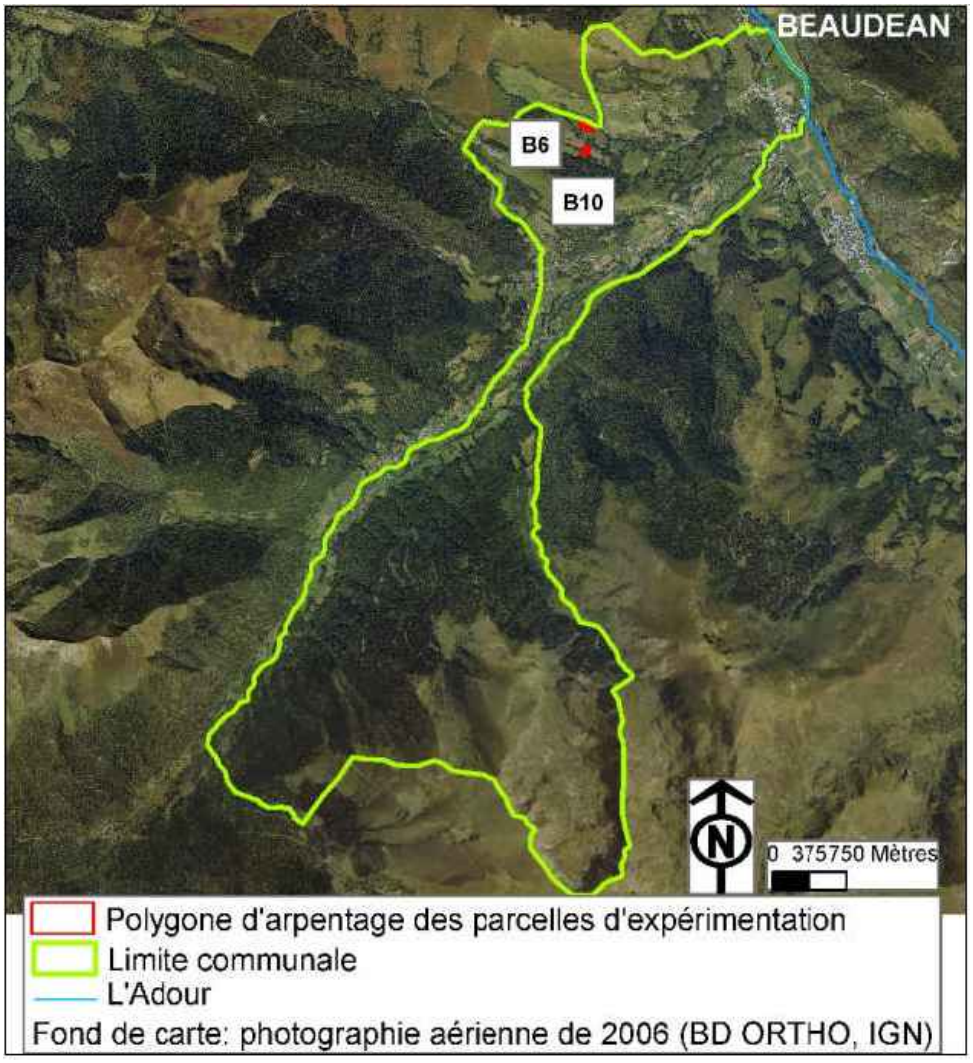
Report de données de coordonnées polaires dans le projet SIG En point rouge : point de départ remarquable : le coin de la grange En point jaune : les points d'arpentage de la parcelle En trait jaune : polygonation de la parcelle « M2 » La surface est de 5575m^2. En fond de carte la photographie aérienne couleur de 2001	Superposition sur le parcellaire cadastral de la commune La parcelle (le peuplement) est sur 2 parcelles cadastrales appartenant à 2 propriétaires distincts.

Figure 7 : Positionnement de la parcelle d'expérimentation « M2 ».

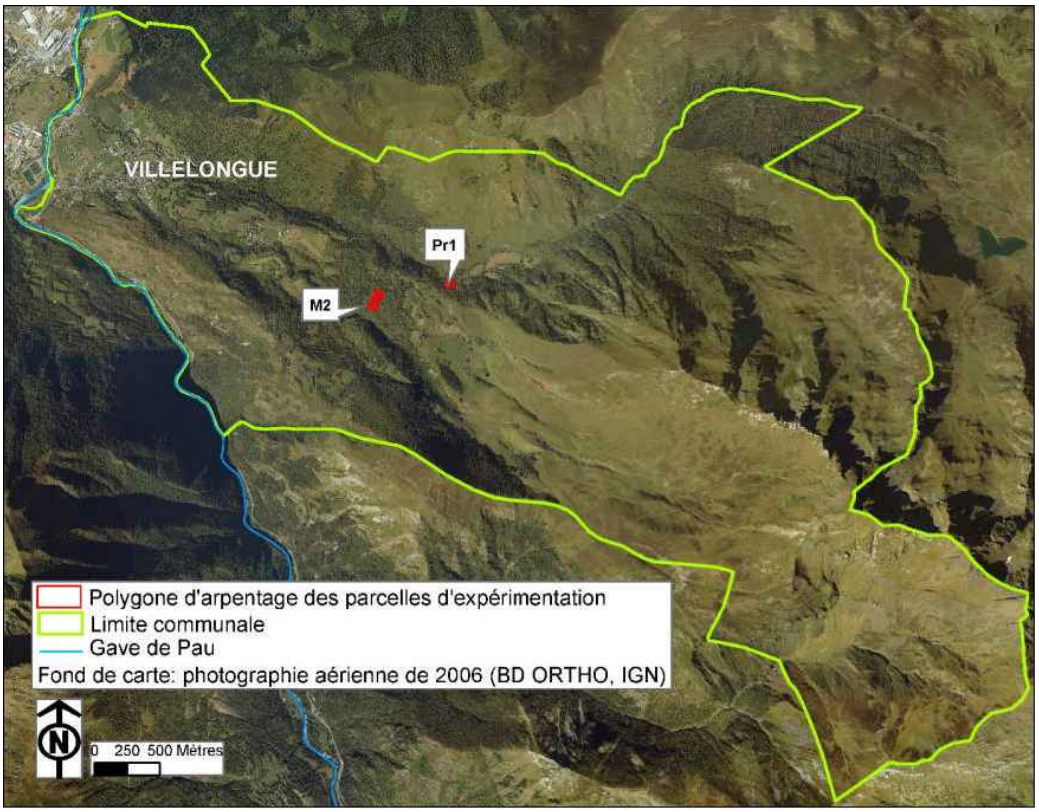
Six parcelles ont finalement été retenues (deux parcelles par vallée) (voir §2.2) pour faire le travail de ma thèse. Parmi ces parcelles, trois ont été sélectionnées pour faire des expérimentations sylvicoles et étudier l'effet de la compétition intraspécifique sur la croissance (B6 sur la commune de Beaudéan, M2 et Pr1 sur la commune de Villelongue, Cartes 3 et 4). Les mêmes parcelles ont été utilisées pour étudier la relation croissance-climat. L'ensemble des six parcelles (A3 et A4 sur la commune d'Arreau, B6 et B10 sur la commune de Beaudéan, M2 et Pr1 sur la commune de Villelongue, Cartes 5, 3 et 4) a servi pour étudier l'effet de la nutrition minérale sur la croissance (Tableau 2).

Tableau 2: parcelles utilisées pour les chapitres relatifs à la croissance.

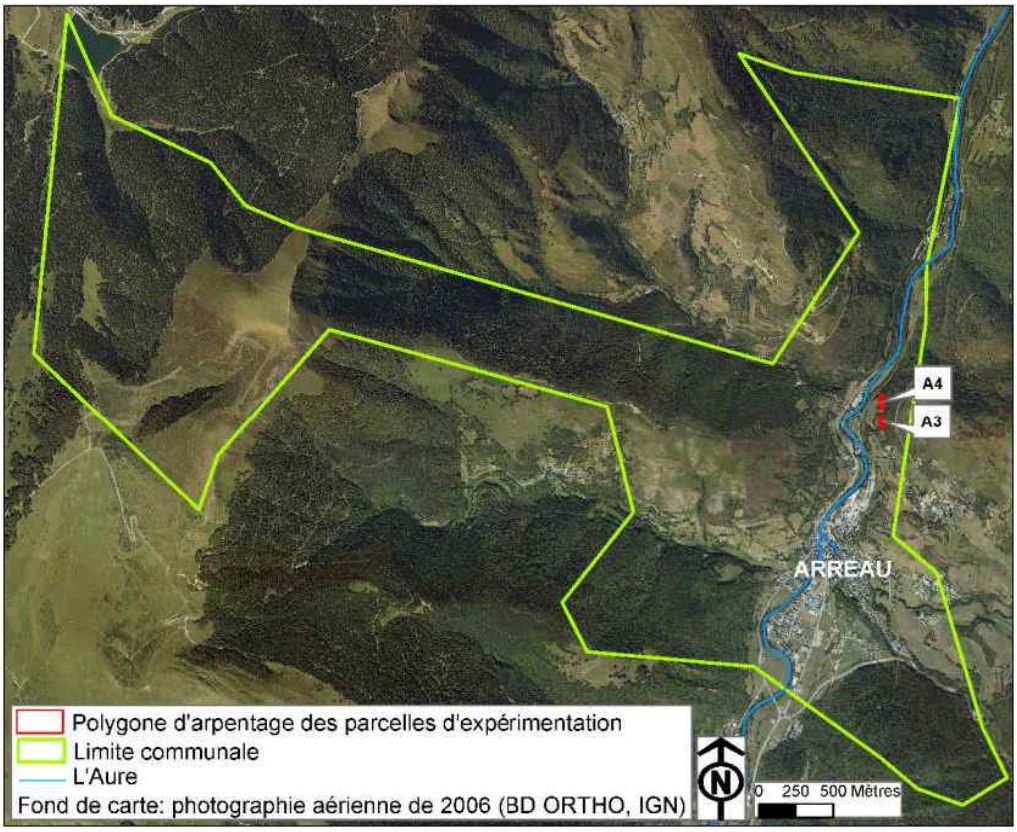
Objectif		**Parcelles**	**Surface (m^2)**
Compétition et expérimentations sylvicoles		B6, M2, Pr1	au moins 1200
Effet climat		B6, M2, Pr2	le peuplement entier
Effet nutrition minérale	analyse feuilles matures	A3, A4, B6, B10, M2, Pr1	600
	Analyse feuilles sénescentes		400



Carte 3 : Localisation des parcelles B6 et B10 dans la vallée de l'Adour.



Carte 4 : Localisation des parcelles M2 et Pr1 dans la vallée du Gave de Pau.



Carte 5 : Localisation des parcelles A3 et A4 dans la vallée d'Aure.

Caractéristiques des zones d'étude

Climat :

Les sites d'étude sont soumis à une influence océanique qui varie selon l'altitude. Les précipitations annuelles et la température moyenne annuelle corrigée selon l'altitude moyenne des parcelles étudiées sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Les précipitations annuelles (mm) et la température moyenne annuelle corrigée selon les altitude des parcelles étudiées (C°) pour la période 1975-2006 d'après les données climatiques obtenues auprès des stations météo les plus proches.

Vallée	parcelle	Précipitation	Température
Aure	A3-A4	921	9,3
Adour	B6- B10	1218	10,2
Gave de Pau	M2-Pr1	1056	8,3

Sol

Le substrat géologique est constitué de « flysch » à schistes alternant avec des grès caractéristiques de la montagne pyrénéenne schisteuse (Debroas & Souquet, 1976), et les sols sont de type brun acide.

Les caractéristiques climatiques et édaphiques sont présentées en détails dans les chapitres suivants de la thèse.

Topographie

Les caractéristiques topographiques des parcelles étudiées sont présentées dans le tableau 4.

Tableau 4 : Données topographiques des parcelles étudiées.

Vallée	parcelle	pente (%)	azimut (degré)	exposition correspondante	altitude (m)
Aure	A3	36	270	ouest	746
Aure	A4	53	292	ouest-nord-ouest	730
Adour	B6	50	23	nord-nord-est	732
Adour	B10	35	33	nord-nord-est,	807
Gave de Pau	M2	25	250	ouest-sud-ouest	1032
Gave de Pau	Pr1	39	2	nord	1074

3.4. ORGANISATION DE LA THÈSE

La thèse est organisée en quatre chapitres :

1) **Le premier correspond à l'étude de la répartition des accrus de frêne dans le département des Hautes-Pyrénées. Il contient une première partie relative à l'identification, à la localisation, puis à la quantification des surfaces des accrus à partir de la télédétection. Dans la deuxième partie, on cherche à modéliser l'organisation spatiale des accrus de frêne en fonction de variables géomorphologiques, paysagères, ou liées au mode d'utilisation du sol;**
2) **Le deuxième chapitre est consacré à la relation entre croissance et nutrition minérale. Ce chapitre contient un projet d'article soumis à la revue New Forests;**
3) **Dans le troisième chapitre, On examine l'influence de plusieurs facteurs climatiques sur la croissance en diamètre ;**
4) **Le quatrième chapitre correspond à une étude détaillée de l'effet de la compétition intraspécifique sur la croissance en diamètre, avec prise en compte des réactions de croissance à des interventions sylvicoles.**

Bibliographie

Abras et al., 2005. Maladies et ravageurs du frêne (*Fraxinus excelsior*), http://phytorive.cra.wallonie.be/resultats/pdf/ Nectria_galligena.pdf

Alford, D. V., Commeau, M. F., Coutin, R., and Fraval, A., 1994. Ravageurs des végétaux d'ornement : Arbres, arbustes, fleurs.

Armand, G., Courrivault , C., 2003. Planter le frêne à large espacement...voire à densité définitive. Forêt Entreprise 149, 40-44.

Arthur, C.P ; Lapenu, P. ; Claudin, J. ; Miellet, P. 2000. Atlas du Parc national des Pyrénées. Collection des Atlas des Parcs Nationaux de France » GIP-ATEN, EDATER ; sous la direction de C. Chatry, 80p.

Aussenac, G., 2000. Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. Annals of Forest Science 57, 287-301.

Balent, G., Duru, M., 1984. Influence des modes d'exploitation sur les caractéristiques et l'évolution des surfaces pastorales : cas des Pyrénées centrales. Agronomie 4, 113-124.

Bertrand, B., 2001. Le frêne, arbre des centenaires. 132p.

Bessières, F., 1992. La conduite des peuplements de Frêne (*Fraxinus excelsior* L.) et de Merisier (*Prunus avium* L.). Revue Forestière Française 54, 115-120.

Bloor, J.M.G., Leadley, P.W., Barthes, L., 2008. Responses of *Fraxinus excelsior* seedlings to grass-induced avove- and below-ground competition. Plant Ecology 194, 293-304.

Bozon, N., 1995. Répartition et Dynamique des boisements feuillus post-agricoles. Analyse structurale de formations à frêne, érable et merisier dans les Alpes. Thèse de Doctorat en Biologie. Université Joseph Fourier (Grenoble I). 180 p.

Bozon, N., Brun, J.J., Grossi, J.L., 1994. Distribution of some hardwood deciduous trees in the french Alps (*fraxinus excelsior* L., *Acer pseudoplatanus* L., *Prunus avium* L.) multilevel approaches. Ecologie 25, 111-118.

Brun,J.J., 1994. Boisement spontanés feuillus en montagne: dynamique et gestion. Conférence Cemagref, 49-55.

Bulfin, M., Radford, F., 1998. Effect of early formative shaping on newly planted broadleaves. Irish Forestry 55, 35-61.

Carlier, G., Peltier, JP., Gielly, L., 1992. Comportement hydrique du frêne (*Fraxinus excelsior* L) dans une formation montagnarde mésoxérophile. Annales des Sciences Forestières 49, 207-223.

Chassany, J.P., 1999. Processus de déprise agricole et enjeux socio-économiques. Revue du Cemagref: Ingénieries- E A T n° spécial Boisements naturels des espaces agricoles en déprise, 81-89.

Claessens, H., 1997. Itinéraires sylvicoles pour la production de frêne de qualité. Cahiers Forestiers de Gembloux 20, 21p.

Claessens, H., Pauwels, D., Thibaut, A., Rondeux, J., 1999. Site index curves and autecology of ash, sycamore and cherry in Wallonia (Southern Belgium). Forestry 72, 171-182.

Curt, T., Bochiero, F., Prévosto, B. 1998. Boisement naturel des terrs agricoles en déprise. Travaux préparatoirs à la définition d'un programme de recherche du Groupement d'Intérêt Public « Ecosystèmes Forestières» (GIP ECOFOR). Rapport Cemagref. 150p.

Curt, T., Prévosto, B., Bergonzini, J. C. 2004. Boisements naturels des terres agricoles en déprise. Collection ECOFOR "écosystèmes forestiers" n°2. 119 p.

Debouche C., 1979. Présentation coordonnée de différents modèles de croissance. Revue de Statistique Appliquée 4, 5-22.

Debroas, E.J., Souquet, P., 1976. Sédimentogénèse et position structurale des flyschs crétacés du versant Nord des Pyrénées Centrales. Bull. BRGM 4, 305-320.

Dhôte, J.F.. 1990. Modèles de la dynamique des peuplements forestiers : articulation entre les niveaux de l'arbre et du peuplement. Applications à la sylviculture des hêtraies. Thèse de Doctorat. Université Cl.Bernard. Lyon. 256p.

Douchet, I., 1999. Enjeux paysagers, écologiques et économiques liés au développement des boisements spontanés: l'exemple des pâturages boisés dans le parc naturel régional du Haut-Jura. n° spécial:Ingénierie: eau- agriculture- territoires:Boisements naturels des espaces agricoles en déprise, CEMAGREF, 111-116.

Dreyfus, PH., 1988. Compétition et croissance dans de jeunes peuplements résineux : Aspects biologiques, écologiques et sylvicoles. Thèse de Doctorat en Ecologie. Université de droit, d'économie et des sciences d'Aix-Marseille. 286 p.

Duflot, H.2002. Le frêne en liberté. 192 p.

Evans, J., 1984. Sylviculture of broadleaved woodland. Forestry Commission Bulletin 62.

Evans, J., 1986. Nutrition experiments in broadleaved stands: I.Pole-stage ash and oak. Quaterly Journal of Forestry 80, 85-94.

Faure, J.J., Jacamon, M., Lanier, L., Venet, J., 1975. Le frêne (*Fraxinus excelsior* L.) en France: Production et culture. Revue Forestière Française 2.

Gauberville, C., 1997. Les accrus: des boisements mélangés spontanés, à faible coût. Forêt Entreprise 118, 34-36.

Gibon, A.; Sheeren, D.; Monteil, C.; Ladet, S.; Balent, G., 2009. Modeling and simulating mountain landscape reforestation using a social-ecological framework. Landscape Ecology (sous presse)

Gomez, D., Fillat, F., 1984. Utlilisation du Frêne comme arbre fourrager dans les Pyrénées de Huesca. Instituto pirenaico de ecologia C.S.I.C. 481-489.

Gonzalez, R.; Mottet, A.; Ladet, S.; Monteil, C.; Etienne, M.; Gibon, A., 2005. GIS and multi-agent systems for interactive design of policy in natural resource management. in C. van Dijkum, G Blasius, and C. Durand (eds): Recent Developments and Applications in Social Research Methodology. Proc.RC33 6th International Conference on Social Science Methodology, Amsterdam (CD-ROM), Barbara Budrich Publishers Leverkusen, Germany, 13 pp.

Gordon , A.G., 1964. The nutrition and growth of Ash, *Fraxinus excelsior*, in natural stands in English lake district as related to edaphic site factors. Journal of Ecology 52, 169-187.

Guyon, A., 1999. Gestion des accrus à feuillus précieux, la nécessité impérieuse de bien connaître son peuplement. Ingénieries 99, 163-167.

IFN, 2009, Evolution de la surface forestière en France métropolitaine, http://www.ifn.fr/spip/spip.php?rubrique11

Joyce, P.M., 1998. Silvicultural guidelines for ash, sycamore, wild cherry, beech and oak in Ireland. In:Growing Broadleaves, 29-49.

Julien, M.P., 2004. Dynamique spatio-temporelle des accrus de frêne dans le zone périphérique du Parc National des Pyrénées: processus de colonisation et conséquences sur la biodiversité des paysages. Report, 11p.

Julien, M.P., 2006. Processus de colonisation des prairies permanentes par le frêne (*Fraxinus excelsior* L.) et conséquences sur la biodiversité: le cas de la zone périphérique du Parc National des Pyrénées. Thèse de Doctorat en Ecologie. Université Toulouse III. 254 p.

Kassas, M., 1951. Studies in the ecology of Chippenham Fen Recent History of the Fen, from evidence of historical records, vegetational analysis and tree-ring analysis. Journal of Ecology 39, 1-32.

Kerr, G., 1995. Silviculture of ash in southern England. Forestry 68, 63-70.

Kerr, G., 2004. The growth and form of sh (*Fraxinus excelsior*) in mixture with cherry (*Prunus avium*), oak (*Quercus petraea* and *Quercus robur*), and beech (*Fagus sylvatica*). Canadian Journal of Forest Research 34, 2340-2350.

Kerr, G., Cahalan, C., 2004. A review of site factors affecting the early growth of ash (*Fraxinus excelsior* L.). Forest Ecology and Management 188, 225-234.

Le Goff, N., Levy, G., 1984. Productivité du frêne (*Fraxinus excelsior* L.) en région Nord-Picardie. B.- Etude des relations entre la productivité et les conditions du milieu. Annales des Sciences Forestières 41, 135-170.

Lejeune, P., 2001. Les possibilités d'utilisation du matériel GPS en forêt. Note technique forestière de Gembloux. Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux. 11p.

Marigo, G., Peltier, J.P., Girel, J., Pautou,G., 2000. Success in the demographic expansion of Fraxinus excelsior L. Trees 15, 1-13.

Mariott, C.A., Fothergill, M., Jeangros, B., Scotton, M., Louault, F., 2004. Long-term impacts of extensification of grassland management on biodiversity and productivity in upland areas. Agronomie 24, 447-462.

Meredieu, C.. 1998. Croissance et branchaison du pin maricio (*Pinus nigra* Arnold spp. *laricio* (Poiret) Maire) : élaboration et évaluation d'un système de modèles pour la prévision de caractéristiques des arbres et du bois. Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard (Lyon I). 250 p.

Merton, L.F.H., 1970. The history and status of the woodlands of the Derbyshire limestone. Journal of Ecology 58, 723-744.

Moleele, N.M., Ringrose, S., Matheson, W., Vanderpost, C., 2002. More woody plants? the status of bush encroachment in Botswana's grazing area. Journal of Environmental Management 64, 3-11.

Mottet, A., 2005. Transformations des systèmes d'élevage depuis 1950 et conséquences pour la dynamique des paysages dans les Pyrénées. Thèse de Doctorat en agronomie. Institut National Polytechnique de Toulouse, 274 p.

Mottet, A., Julien, M.P., Balent, G., Gibon, A., 2007. Agricultural land-use change and ash (Fraxinus excelsior L.) colonization in Pyrenean landscapes: an interdisciplinary case study. Environmental modeling & assessment 12, 293-302.

Nepveu, G., 1992. L'Utilisation des bois de Frêne et de Merisier : aptitudes technologiques, facteurs de variabilité. Revue Forestière Française 44, 142-149.

Ningre, F., Cluzeau, C., Le Goff, N., 1992. La Fourchaison du frêne en plantation : causes, conséquences et contrôle. Revue Forestière Française 44, 104-114.

Peltier, J.P., Marigo, G., 1996. Adjustement processes in ash and water stress situation. Academie des sciences serie III science de la vie 319, 425-429.

Pichard, G., 2002. Les éclaircies de plantations de feuillus. Forêts de France 450, 40-41.

Piedallu, C., Gégout, J.C., 2002. Etude de la précision du système GPS en milieu forestier. Revue Forestière Française LIV, 429-442.

Pinto, P.E., Gégout, J.C., 2005. Assessing the nutritional and climatic response of temperate tree species in the Vosges Mountains. Annals of Forest Science 62, 761-770.

Pouderoux, S., Deleuze, C., Dhôte, J.F., 2001. Analyse du rendement des houppiers dans un essai d'éclaircie de hêtre grâce à un modèle à base écophysiologique. Annals of Forest Science 58, 261-275.

Poulain, G., 2000. Planter du frêne sur d'anciennes terres agricoles. Forêt Entreprise 133, 34-37.

Prach, K., Leps, J., Michalek, J., 1996. Etablishment of *Picea abies* seedlings in a central European mountain grassland: an experimental study. Journal of Vegetation Science 7, 681-684.

Prévosto, B., Curt , T., Gueugnot, J., Coquillard, P., 2000. Modelling mid-elevation Scots pine growth on a volcanic substrate. Forest Ecology and Management 131, 223-237.

Prévosto, B., Hill,D.R.C., Coquillard, P., 2003. Individual-based modelling of *Pinus sylvestris* invasion after grazing abandonment in the French Massif Central. Plant ecology 168, 121-137.

Rameau, J.C., 1999. Accrus, successions végétales et modèles de dynamique linéaire forestière. Revue de Cemargref n° special, 33-48.

Robbe ,V., 2005. Les utilisations non bois des feuillus précieux dans les territoires et exploitations agricoles. Mémoir de master 1. INRA de TOULOUSE. 32 P.

Soulères,G., 1997. Les feuillus précieux: le prix des bois sur pied et leu évolution. Forêt de France 403, 4-9.

Steinbauer, G.P., 1937. Dormancy and germination of Fraxinus seeds. Plant Physiology 12, 813-824.

Tapper, P., 1992. Demography of persistent juveniles in *Fraxinus excelsior*. Ecography 15, 385-392.

Thomas, A.S., 1960. Changes in vegetation since the advent of myxomatosis. Journal of Ecology 48, 287-306.

Tinner, W., Hubschmid, P., Wehrly, M., Ammann, B.,Conedera, M., 1999. Long-term forest fire ecology and dynamics in southern Switzerland. Journal of Ecology 87, 273-289.

Wardle, P., 1959. The regeneration of *Fraxinus Excelsior* in Woods with a field layer of Mercurialis Perennis. Journal of Ecology 47, 483-497.

Wardle, P., 1961. *Fraxinus excelsior*. Journal of Ecology 49, 739-751.

Watt, A.S., 1924. On the ecology of british beechwoodswith special reference to their regeneration: competition between ash, oak and beech. Journal of Ecology 12, 193-202.

Wattel, B.. 1998. Les feuillus précieux en forêt paysanne: évaluation de la ressource et de la croissance. Mémoire de fin d'étude. Ecole Nationale d'Ingénieurs des Traveaux Agricoles (ENITA) de Bordeaux. 70p.

CHAPITRE 1 : REPARTITION SPATIALE DES ACCRUS DE FRENE

1. INTRODUCTION

1.1. OBJECTIF GENERAL

L'objectif général de ce chapitre est de :

1- Quantifier l'importance des accrus de frêne en surface dans le département des Hautes-Pyrénées,
2- Décrire et tenter d'expliquer leur mode de répartition spatiale par rapport à la spatialisation des facteurs explicatifs supposés. Par exemple l'altitude et la pente sont deux facteurs topographiques significativement corrélés avec les parcelles colonisées par les accrus de frêne étudiés par Marie-Pierre Julien dans sa thèse (2006).

Cela permettra d'évaluer l'ampleur du phénomène, d'en connaître toute la diversité et la dynamique au cours du temps, et d'y sélectionner un échantillon représentatif pour garantir la généralisation de nos résultats de croissance (cf. chapitres suivants).

1.2. DEFINITION ET DETECTION DES ACCRUS DE FRENE

Le phénomène de boisement spontané est un thème de recherche nouveau en France (fin des années 1990), peu étudié et mal défini dans la littérature. Dérioz (1999) souligne la nécessité de le redéfinir précisément. Selon lui, il s'agit de rendre compte à la fois d'un état de l'espace et d'un changement dans la durée. La difficulté actuelle à les caractériser provient du fait que leur passé (origine et mise en place) de même que leur futur (évolution à venir) sont hypothétiques. La définition des boisements spontanés dépend étroitement de la perception qu'en ont les observateurs (gestionnaire, forestier, écologue, agriculteur, touriste…). Il en résulte des difficultés pour choisir une définition claire. Une définition simple de ces accrus par exemple est celle proposée par le GIP ECOFOR* (Curt *et al.*, 1998) : «toute formation ligneuse spontanée développée sur des terrains suite à un arrêt ou une diminution de l'activité pastorale ou agricole».

Cette difficulté de définition des accrus entraîne une difficulté à les détecter, à suivre leur évolution et à les cartographier. On n'observe pas d'unicité dans la définition et donc le classement fait par les organismes de recensement et d'inventaire :

- L'**IFN** classe les accrus dans la catégorie « accrus et formations composites », les différenciant des forêts seulement depuis quelques années. Il s'agit, pour l'institut, de « types de transition développés à partir de points d'appui et constitués à partir de haies ou de petits bosquets ».

- Les accrus peuvent être inventoriés par le **RGA*** et les **données cadastrales*** soit en « taillis, bois et forêts », soit en « friches et landes non productives », ou encore en « surface toujours en herbe de faible production ».

- **TERUTI*** ne différencie pas non plus spécifiquement les accrus spontanés des forêts, ils peuvent se retrouver dans la catégorie « friches, landes, maquis et garrigues » ou « sols à couverture boisée ».

- **Corine Land Cover*** adjoint un poste « forêt et végétation arbustive en mutation » qui regroupe les formations issues de la dynamique de reforestation secondaire (Dérioz, 1999).

Comme le montre Dérioz (1999), la quantification de ces accrus dépend du recoupement et de l'interprétation des sources statistiques disponibles. Dérioz démontre que cette catégorie spatiale un peu insaisissable n'est de ce fait pas comptabilisée en tant que telle dans les différents inventaires disponibles pour l'utilisation du sol national. On trouve les accrus dans trois catégories:

- ✓ usage pastoral ou agricole,
- ✓ friches, landes ou garrigues,
- ✓ couvert forestier avec un ou plusieurs seuils de densité.

Ces sources donnent aussi une quantification du phénomène à une large échelle (nationale et départementale) sans prendre en compte la grande variété de composition (Tableau 1).

Tableau 1: Principales essences forestières présentes dans les boisements spontanés avec en gras, l'espèce modèle étudiée dans cette thèse, le frêne commun (Curt et al., 2004).

Zone biogéographique	**Etages climatiques**	**Principales essences forestières**
Domaine atlantique et continental	Plaines et collines	Chêne pédonculé, merisier, érable sycomore et plane, tilleul, frêne commun, saules
	Montagnard	Pin sylvestre, bouleau, merisier, érable sycomore, **frêne commun,** épicéa commun
	Etage sub-alpin	Pin à crochet, mélèze d'Europe épicéa commun, aulne vert
Domaine méditerranéen	Méso-méditerranéen	Pin d'Alep, chêne pubescent, chêne vert
	Supra-méditerranéen	Pin sylvestre
	Montagnard et sub-alpin	Mélèze d'Europe

Pour rappel, dans cette thèse, nous étudions les boisements spontanés à base de frêne dans l'étage montagnard des Pyrénées sous influence atlantique.

On peut donc supposer qu'il sera difficile d'utiliser ces statistiques pour avoir des informations quantitatives précises (échelle communale ou d'un bassin versant) sur ces boisements spontanés et encore plus quand on s'intéresse à une espèce précise, le frêne commun en l'occurrence dans notre cas.

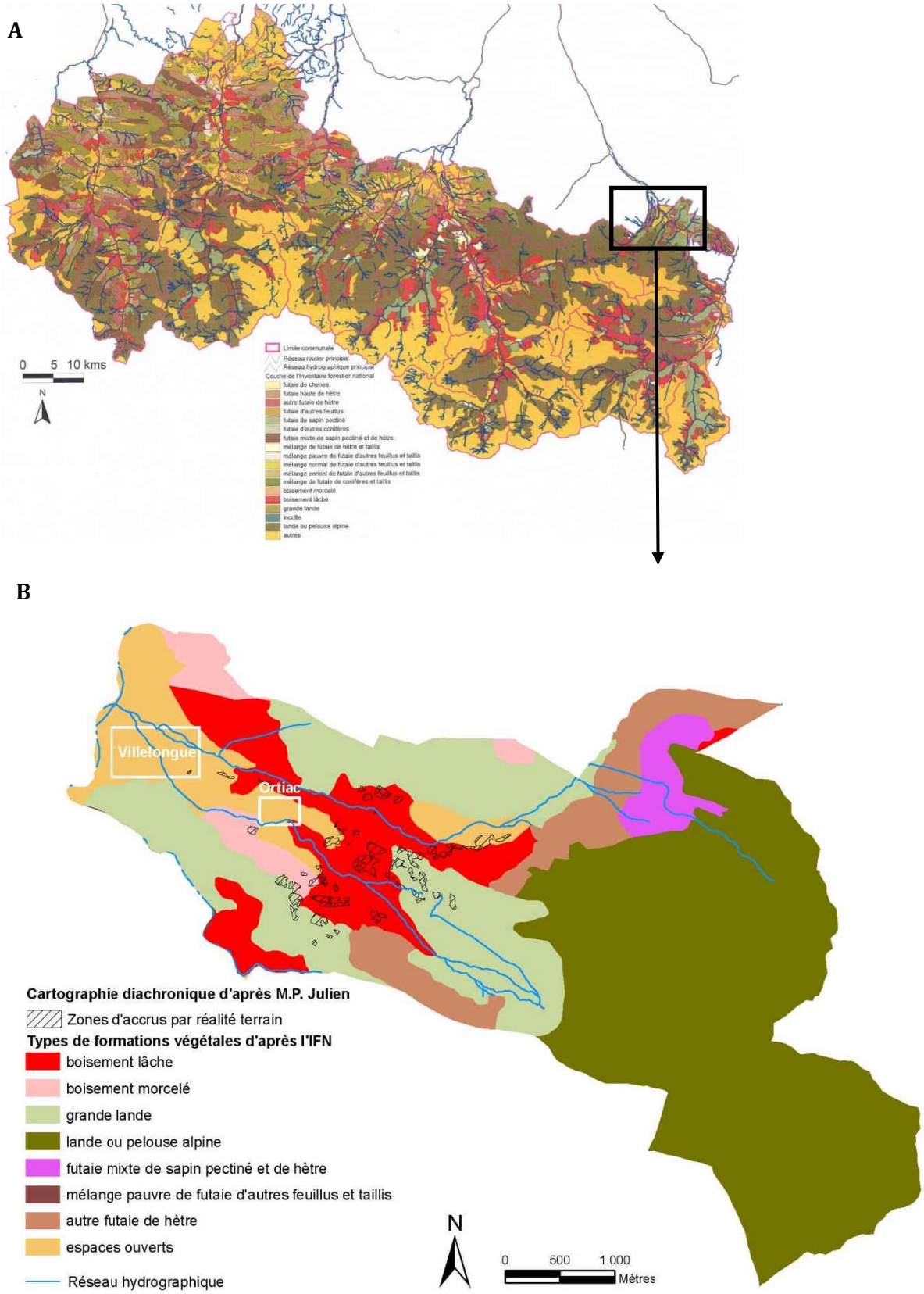
1.3. ÉTAT DES CONNAISSANCES DANS LE DEPARTEMENT 65

1.3.1. APPROCHE DESCRIPTIVE : CARTOGRAPHIE DE LA VEGETATION

Ces formations posent, nous l'avons vu, un problème de définition et d'inventaire. Composition, structure, et dynamique spatiale et temporelle dépendent du contexte écologique, de la végétation environnante, des conditions d'abandon et des pratiques persistantes. Nous disposions au démarrage de la thèse de plusieurs sources de données cartographiques pour estimer les surfaces d'accrus et leur dynamique récente :

- Les données de l'IFN à l'échelle départementale. Elles sont mises à jour tous les 12 ans.

- Le Parc National des Pyrénées a produit dans son atlas, une carte des types de formations végétales à partir des données sur les types de formations végétales fournies par l'IFN à une échelle infra-communale (Carte 1A). Cette cartographie ne détaille pas les types de formations végétales strictement forestières. Ici les accrus, selon l'IFN, sont distribués dans les catégories « boisement morcelé » et « boisement lâche »*.



Carte 1 : A : Carte des types de formations végétales en 1994 sur le Parc National des Pyrénées (source: IFN) et B : Extrait de cette carte sur la commune de Villelongue avec les « polygones de zones d'accrus de vérité terrain » acquises via la thèse de Julien, 2006.

- Enfin l'encart B présente un extrait de cette dernière carte sur la commune de Villelongue, commune de référence pour l'UMR Dynafor où nous disposons de données de terrain précises grâce à la thèse de M.P. Julien (2006). Nous constatons que nous avons une surestimation des accrus de frêne par les données de l'IFN et que les accrus de frêne relevés sur le terrain se superposent aussi aux classes « grande lande » et « espaces ouverts » des données IFN (Tableau 2).

Tableau 2 : Comparatif des surfaces en accrus sur la commune de référence par l'utilisation de sources différentes (IFN via les 2 classes citées au-dessus, versus réalité terrain).

Commune	**Superficie des accrus (IFN)**	**Superficie des accrus (réalité terrain)**
Villelongue	304ha	25,4ha

Les données cartographiques (et temporelles) disponibles sur le département des Hautes-Pyrénées ne sont pas suffisamment précises pour atteindre notre objectif. Aussi nous avons décidé de mettre en oeuvre des travaux cartographiques plus précis à travers la mise en place d'un projet cartographique [3] au cours de la thèse.

1.3.2. APPROCHE EXPLICATIVE

Les travaux antérieurs de Dynafor ont montré que les accrus se développaient par un processus de colonisation des prairies à partir des semences dispersées par les frênes adultes plantés en limite de parcelles ou autour des granges (Julien, 2006), et que, pour que le processus d'installation réussisse, il fallait d'une part que l'intensité d'utilisation des parcelles pour le pâturage se situe en dessous d'un seuil critique (Julien et al. 2006), mais aussi que les conditions édaphiques et géomorphologiques soient favorables. Dans cette piste, on a voulu identifier et hiérarchiser les différents facteurs susceptibles d'influencer la distribution spatiale des accrus à l'échelle du paysage et de tenter de construire un modèle prédictif de sa répartition.

[3] Projet SIG : La notion de projet cartographique fait ici référence à « un ensemble d'activités dans le domaine de la géomatique qui sont pris en charge, dans un délai donné (la thèse) et dans les limites de ressources imparties, par des personnes qui y sont affectées (ici moi-même en collaboration avec l'ingénieur géomaticienne Sylvie Ladet dans le but d'atteindre les objectifs définis » AFNOR (Association Française de NORmalisation). Pour ce volet, j'ai suivi une formation interne à ces outils de la discipline de la géomatique, afin d'acquérir une autonomie et une compréhension minimiale.

1.4. STRATEGIE ET DEMARCHE ADOPTEE

Pour réaliser cette étude, nous avons bénéficié de la base de données géographiques associée au système d'information géographique (SIG) dont l'unité DYNAFOR dispose (cf. Introduction générale) et des compétences disponibles en interne.

Ce chapitre se découpe en 2 parties comme suit :

1- Dans un premier temps, nous avons adopté la démarche méthodologique préconisée par Valdenaire dans sa synthèse du numéro spécial de « boisements naturels des espaces agricoles en déprise » paru en 1999. Valdenaire conclut l'ouvrage en donnant quelques perspectives à explorer pour le suivi des accrus :

- « l'utilisation des photos aériennes numérisées,

- l'utilisation d'images satellitales à résolution métrique ».

sachant que l'outil cartographique présente des limites : les images satellites sont mal adaptées à l'observation fine de l'évolution tandis que la photo aérienne nécessite des spécialistes. Cependant, images satellites et photos aériennes peuvent se montrer très complémentaires. Elles constituent selon lui des outils qui présentent des perspectives à court terme très intéressantes. Compte-tenu de l'absence d'une catégorie cartographique « accrus de frêne » préétablie ou facile à extraire de données existantes, il est nécessaire de rechercher une « signature » de ce type de peuplement sur de nouvelles données géographiques disponibles, à savoir les photographies aériennes et les images satellitales.

2 – Dans la deuxième partie, pour comprendre le mode de répartition actuel, une campagne de terrain visant à une cartographie-test a été effectuée à l'échelle de quelques communes pour décrire la présence, l'abondance ou l'absence du frêne. Dans un but explicatif, différentes variables physiques ont été décrites concomitamment. La démarche adoptée est celle de la recherche de frêne (à partir d'un mètre de hauteur) par exploration systématique de mailles disposées aléatoirement dans les 3 vallées étudiées.

2. RECHERCHE DE CRITERES DE TELEDETECTION DES ACCRUS DE FRENE

2.1. INTRODUCTION

Dans cette partie nous avons mobilisé, comme conseillé par Valdenaire (1999), de nouvelles données géographiques de base à savoir les photos aériennes numérisées de la BD ORTHO* (IGN ©*) datant de 2001 et 2006 et les images satellitales SPOT 5* datant de 2005.

Nous avons vu que les accrus de frêne que nous étudions peuvent être définis de différentes façons et correspondent à différents stades de végétation. Nous avons choisi dans cette partie de nous concentrer sur le stade forestier en perchis* (Photo 1) car nous pensons que c'est le stade le plus homogène et le plus caractéristique pour une reconnaissance par télédétection (dominante arborée, hauteurs d'arbres peu variables, densité importante).



Photo 1 : Accrus de frêne au stade perchis.

Avant toute chose, nous nous sommes interrogés sur le niveau d'organisation de notre objet d'étude et sur le niveau d'observation lié aux données dont nous disposons. Il convient en effet, en préalable à tout travail de télédétection, de « *s'intéresser à la quantité d'information qui est fonction du champ spatial, de la résolution et du niveau d'analyse, et aux niveaux d'organisation, aux moyens de perception, à la mesure de la précision* » (Girard & Girard, 1999).

Dans notre cas, la surface d'un accru de frêne peut être estimée avec une bonne précision grâce à la résolution spatiale des nouvelles données géographiques mobilisées dans cette partie (0.5m pour les photos versus 10 m pour les images satellitales).

Le développement de la télédétection et des SIG suscite beaucoup d'espoirs pour l'amélioration de l'analyse de l'environnement, des paysages et de leur dynamique grâce, d'une part, à la vision systémique et macroscopique que fournissent les données citées précédemment et, d'autre part, aux capacités d'analyse spatiale que comportent les SIG.

Ces données permettent des traitements numériques semi-automatiques et une optimisation du travail du terrain en procédant par échantillonnage et validation. Plusieurs études montrent la possibilité d'utiliser la télédétection pour identifier différentes unités végétales surtout dans le domaine forestier (délimitation des peuplements forestiers, densité…) (Cohen *et al.*, 1999 ; Liège, 1997 ; Prévosto, 1999). Cependant, il n'y a pas beaucoup de références pour l'identification des espèces ligneuses (Boureau & Deshayes, 1999).

Aussi avons nous mis en place des opérations de recherche spécifique basées sur ces deux sources de données et les avons mis en œuvre à l'aide du SIG de l'UMR.

2.2. METHODES ET RESULTATS

2.2.1. UTILISATION DE PHOTOS AERIENNES

La photographie aérienne est une donnée cartographique de base utilisable en foresterie. Elle offre un instantané, une vision totale des éléments du paysage étudié dont la végétation (Rey & Izard, 1967). Chaque détail de la photo peut être étudié par interprétation. Les photographies aériennes servent déjà de support à la réalisation de cartes forestières. Par exemple, l'IFN, à partir des photographies aériennes infrarouges couleur (meilleure distinction de la végétation dans l'infrarouge) à échelle 1/20000 établit une cartographie des différents types de végétation sur toute la France par la méthode de la photo-interprétation.

L'idée, à partir de photographies aériennes récentes et de bonne qualité est d'identifier, à l'aide des zones de frênes repérées sur le terrain par Marie-Pierre Julien dans sa thèse, les critères photogrammétriques (couleur, forme, dimension, relief…) et structuraux (densité, relation de voisinage) des accrus de frêne.

Aujourd'hui, la distinction entre essences feuillues et résineuses sur des photos aériennes couleur semble établie [4], voire même la distinction entre certains résineux (pin/sapins/épicéas). Malheureusement, aucune méthodologie de photo-interprétation n'existe pour les arbres à feuilles caduques.

La démarche que nous avons adoptée est résumée comme suit en 4 grandes phases:

- phase de positionnement sur la photo aérienne des accrus de frêne au stade perchis, repérés sur le terrain,
- phase de caractérisation des représentations cartographiques des accrus avérés,
- phase d'application des caractéristiques sur les photos aériennes pour trouver de nouveaux accrus,
- phase de validation : vérification de la réalité terrain à partir des accrus hypothétiques trouvés sur la photo aérienne.

Nous proposons un schéma d'interprétation des accrus de frêne au stade perchis en zone de montagne (Figure 1) que nous avons suivis dans ce travail de photo-interprétation des accrus de frêne au stade perchis.

[4] Il semble qu'une forêt de résineux apparaît en général plus sombre qu'une forêt de feuillus.

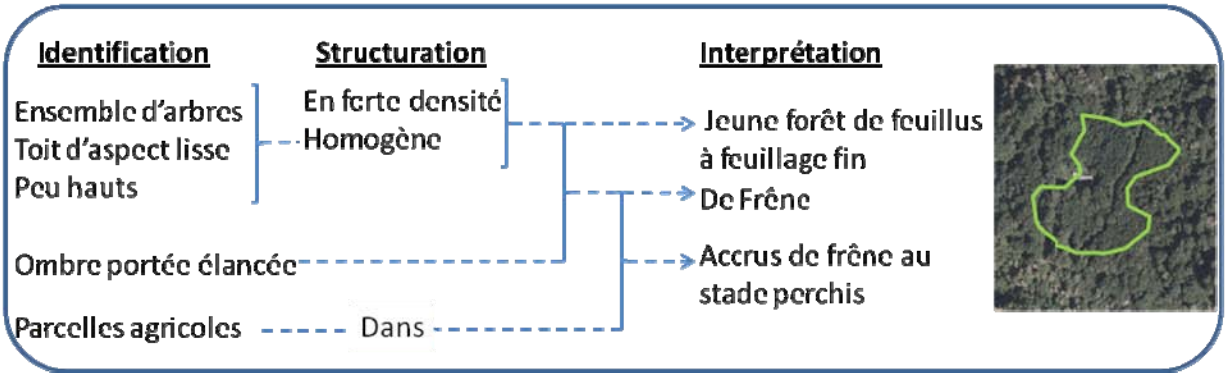


Figure 1 : Schéma d'interprétation des accrus de frêne au stade perchis en zone de montagne avec extrait de photos aériennes couleur de 2001.

Nous avons fait ce travail de digitalisation sur une zone test couvrant la commune de référence de Villelongue et 2 autres communes aux alentours soit 37 km² dans un premier temps pour calibrer la méthodologie et chiffrer le travail à effectuer. Mais le résultat après vérification de terrain ne nous a pas satisfaits car le taux d'erreur est important (Tableau 3).

Tableau 3 : Comparaison de la surface d'accrus photo-interprétés avec la surface réelle relevée sur le terrain, sur la commune de Villelongue.

Surfaces en accrus digitalisées sous SIG (km²)	**Surfaces bien classées après vérification terrain (km²)**	**Pourcentage de bien classé**
0,14	0,08	57%

Plusieurs points négatifs ont été avancés pour décider d'interrompre cette opération de recherche :

- les dates de prises de vue des photos aériennes ne sont pas modulables (prise de vue en juillet dans notre cas). Or, à cette date-là, ce n'est pas forcement le frêne est le plus visible sur la photo aérienne,

- la présence d'arbres d'espèces différentes au sein de l'accru de frêne peut créer une rupture dans la texture du perchis.

Ces 2 points expliquent probablement le mauvais pourcentage de bien classé obtenu ;

- L'application de cette méthodologie à d'autres communes est longue et fastidieuse avec une phase de vérification terrain difficile à mettre en œuvre.

2.2.2. UTILISATION DE SCENES SATELLITALES

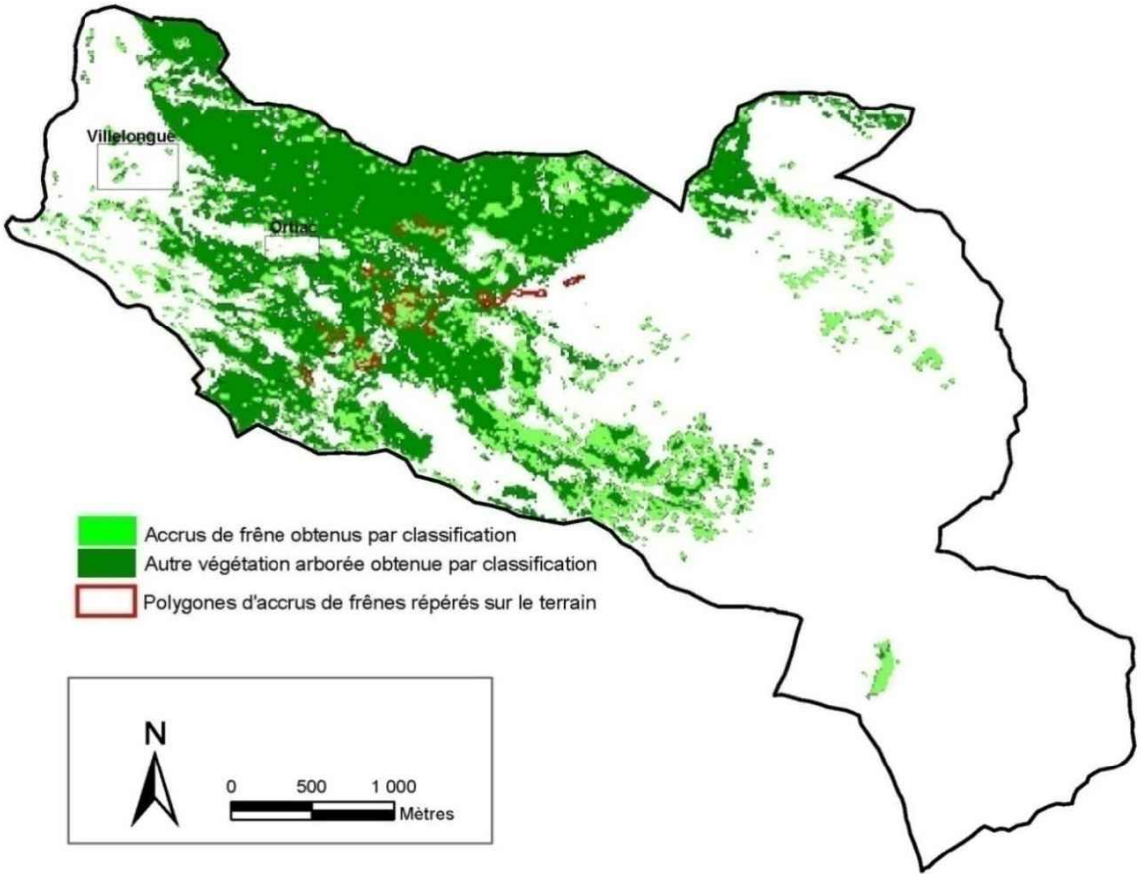
L'arrivée d'images satellitales à très haute résolution spatiale (métrique pour le capteur français Spot 5) laisse envisager des potentialités nouvelles en matière d'utilisation de la télédétection surtout dans le domaine forestier. Un test sur la détection d'îlots de frêne pur a été fait à partir d'images satellites Spot 5 à la résolution de 10m par identification de la signature spectrale de frêne.

La démarche adoptée (Douard *et al.*, 2005) est résumée comme suit en 2 grandes phases :

- phase de prétraitement des données : corrections radiométrique et géométrique des 2 scènes SPOT (juin 2004 et octobre 2005) pour qu'elles soient combinables,

- phase de classification : création d'une composition colorée adaptée à l'analyse de la végétation (création de néocanaux* comme l'indice de végétation NDVI), création d'une classification non-supervisée* par le maximum de vraisemblance.

Cette méthode de classification spectrale dite non-supervisée sur images satellitales n'a pas permis d'extraire de signature spectrale spécifique au frêne permettant d'identifier les accrus de frêne sur une grande zone de manière automatisée (Carte 2) (Douard *et al.,* 2005).



Carte 2 : Résultat de classification supervisée sur la commune de référence de Villelongue (Douard *et al.*, 2005).

La réponse radiométrique du frêne est confondue avec celle des essences voisines (noisetier, hêtre). Nous avons estimé la qualité de cette classification en calculant le taux d'erreur qui est important (Tableau 4).

La matrice de confusion obtenue (tableau 4) permet d'avoir le pourcentage de bien classé sur l'image traitée par rapport à la réalité terrain. Elle donne une estimation de la qualité du traitement.

Tableau 4 : Comparaison de la surface d'accrus classés avec la surface réelle relevée sur le terrain, sur la commune de Villelongue.

Surfaces en accrus dans classification (km^2)	**Surfaces bien classées après vérification terrain (km^2)**	**Pourcentage de bien classé**
0.12	0.08	65%

Plusieurs points de discussion ont été avancés pour expliquer ce résultat :

- Le frêne n'a pas de réponse spectrale significative. Selon Jean-Guy Boureau de l'IFN, « le frêne n'a ni forme de cime ni réponse spectrale caractéristiques » (communication personnelle). Les données multi-spectrales ne sont donc pas adaptées à la détection du frêne ;

- Prise de vue à des dates ne correspondant pas à des stades phénologiques discriminantes du frêne.

2.3. BILAN ET PERSPECTIVES

Suite au travail réalisé sur cette piste, nous avons contribué à la réflexion initiée par Valdenaire en 1999 en y apportant des éléments nouveaux à savoir que la photographie aérienne numérisée récente seule n'est pas suffisante pour permettre une cartographie fiable et rapide de toutes les parcelles d'accrus présentes sur un bassin versant à cause principalement de la complexité de l'objet regardé. Mais c'est une donnée intéressante à prendre en compte quand les accrus sont déjà repérés ou validés par une visite de terrain car elle donne une idée précise de la surface concernée (arpentage précis) et peut permettre, par une analyse diachronique, de connaître la date d'installation de chaque accru dans la parcelle anciennement agricole, ceci en analysant la série temporelle de photos disponibles [5]. Nous pourrions aussi choisir les dates de prise de vue en rapport avec la phénologie du frêne en programmant des missions spécifiques sachant que le frêne semble plus précoce au niveau de la chute de feuilles que d'autres espèces de feuillus (hêtre, noisetier avec qui il est souvent associé) (Julien, 2006).

[5] L'IGN effectue des prises de vues de photographies aériennes depuis les années 1940 avec des mises à jour d'environ 10 ans.

Concernant les images multispectrales SPOT 5, nous n'obtenons pas de détection fiable des accrus de frêne mais la détection automatisée est un peu meilleure que la photointerprétation.

Nous proposons plusieurs perspectives à cette piste.

- D'une part, depuis le début des années 2000 et la mise à disposition par l'IGN du produit BD ORTHO, se multiplient les classifications automatiques de photos aériennes et/ ou d'images satellitales (ici l'extraction des accrus) par segmentation orientée objet [6]. Cette nouvelle technique permettrait d'extraire des objets (nos accrus) en termes de leurs caractéristiques de forme et de contenu thématique. Cette méthode apporterait donc une solution alternative intéressante à tester sur ces photos numérisées (Cleve *et al.*, 2008).
- D'autre part, nous avions prévu de tester la classification d'images hyperspectrales [7] aéroportées car plusieurs études ont montré l'intérêt de ces images pour la détection, à l'espèce près, du frêne (Xiao *et al.,* 2004 ; MacFarlane *et al.,* 2005; Pontius *et al.*, 2008). Les images hyperspectrales sont caractérisées par un nombre de canaux (pouvant atteindre plusieurs centaines) largement supérieur à celui des images multispectrales classiques. Ainsi, les données hyperspectrales offrent une information plus détaillée d'une scène que d'autres types de données de télédétection acquises en bandes plus larges et non contiguës (Figure 2). Ce type d'information spectralement détaillée est facilement utilisable pour caractériser des types de végétations (« signatures spectrales »). En revanche, il semble difficile de l'utiliser à l'échelle plus fine d'une seule espèce, dans la mesure où une espèce peut être mélangée à d'autres ou être présente à des stades de croissance différents (Lennon, 2002). Néanmoins, Xiao dans son article donne le graphique des signatures spectrales de plusieurs espèces de frêne dans des conditions optimales (Figure 3).

[6] Méthode de classification présente dans des logiciels spécifiques récemment acquis dans l'unité DYNAFOR à savoir eCognition ou ENVI FX et que nous n'avons pas pu encore tester sur nos données, faute de temps.

[7] Il existe plusieurs capteurs, fournisseurs capables de vendre des images hyperspectrales. Citons par exemple AVIRIS, CASI, SpecTIR VNIR. Nous avons fait budgétiser le coût d'une couverture en images hyperspectrales de notre zone d'étude (140km^2 soit 17000 €).

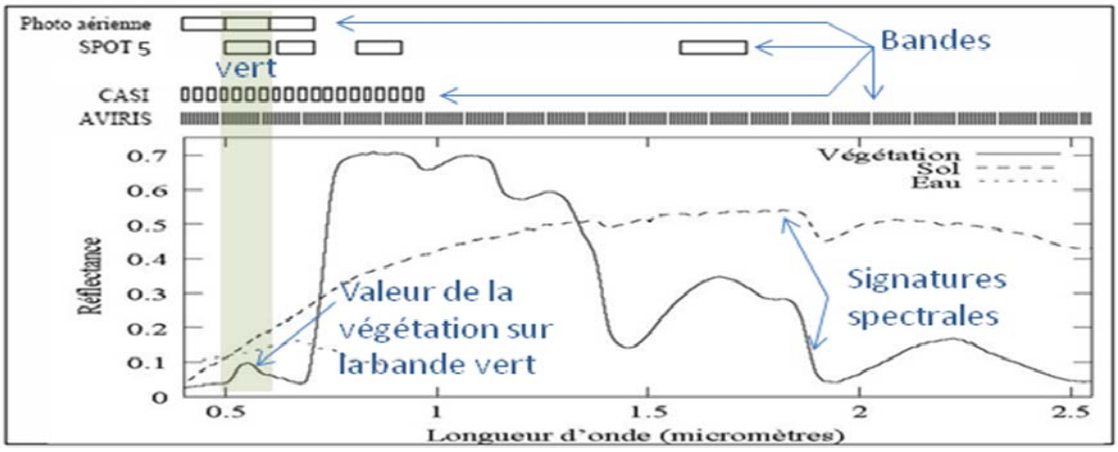


Figure 2 : Position des différents capteurs (photographie aérienne, image satellitale SPOT et 2 capteurs hyperspectraux : CASI et AVIRIS) le long du spectre (partie du haut) et courbes (partie du bas) représentant la signature spectrale de trois composants dont la végétation (adapté de Lennon, 2002). Pour les 2 capteurs hyperspectraux, on note le grand nombre de bandes spectrales disposées le long du spectre de longueur d'ondes. Dans l'exemple ci-dessus, la végétation est enregistrée par une seule bande pour les capteurs photo ou satellite et par plusieurs bandes pour les capteurs hyperspectraux ce qui permet d'enregistrer de fines variations dans la courbe de réponse de la végétation. Ces variations sont représentées pour différentes espèces de frêne dans la figure 3.

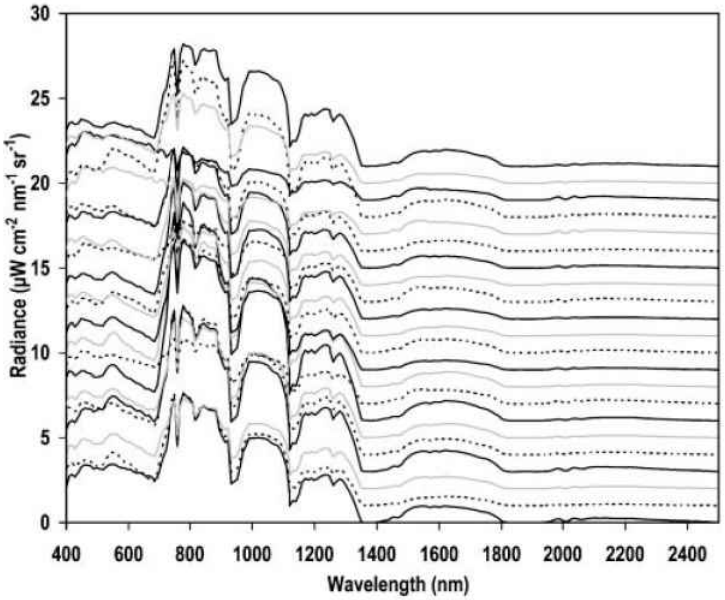


Figure 3 : Signature spectrale de différentes espèces de feuillus dont 3 espèces de frêne (*Fraxinus excelsior ; Fraxinus oxycarpa ; Fraxinus pennsylvanica*) (Xiao *et al.*, 2004).

Pour des raisons de coût important (financier et humain) dans l'acquisition et dans l'apprentissage de la chaîne de traitement spécifique à cette donnée, à court terme, l'UMR pense plus raisonnable de nouer des collaborations, échanger des méthodologies avec des unités de

recherche françaises (Unité COSTEL de Rennes ou Unité Image et Ville de Strasbourg[8]) spécialisées dans le traitement de ces données très particulières, ou les équipes américaines ayant déjà publié sur ces traitements (Pontius *et al.*, 2008).

- On peut supposer que la combinaison de plusieurs méthodes permettrait d'augmenter le potentiel de discrimination de population d'individus de la même espèce (ici, nos accrus de frêne), à condition que ces populations couvrent des surfaces de dimension compatible avec les capteurs considérés, et que les populations soient à un stade de végétation homogène (ici, au stade perchis).

3. RECHERCHE DE FACTEURS EXPLICATIFS DE LA PRESENCE DU FRENE AUX ECHELLES DE LA PARCELLE ET DU PAYSAGE

Suite aux difficultés et aux limites rencontrées dans la phase de reconnaissance et de cartographie des accrus de frêne à partir d'images satellitales et de photographies aériennes, nous avons mis en place des observations directes sur le terrain suivant une méthodologie détaillée ci-après.

3.1. MATERIEL ET METHODES

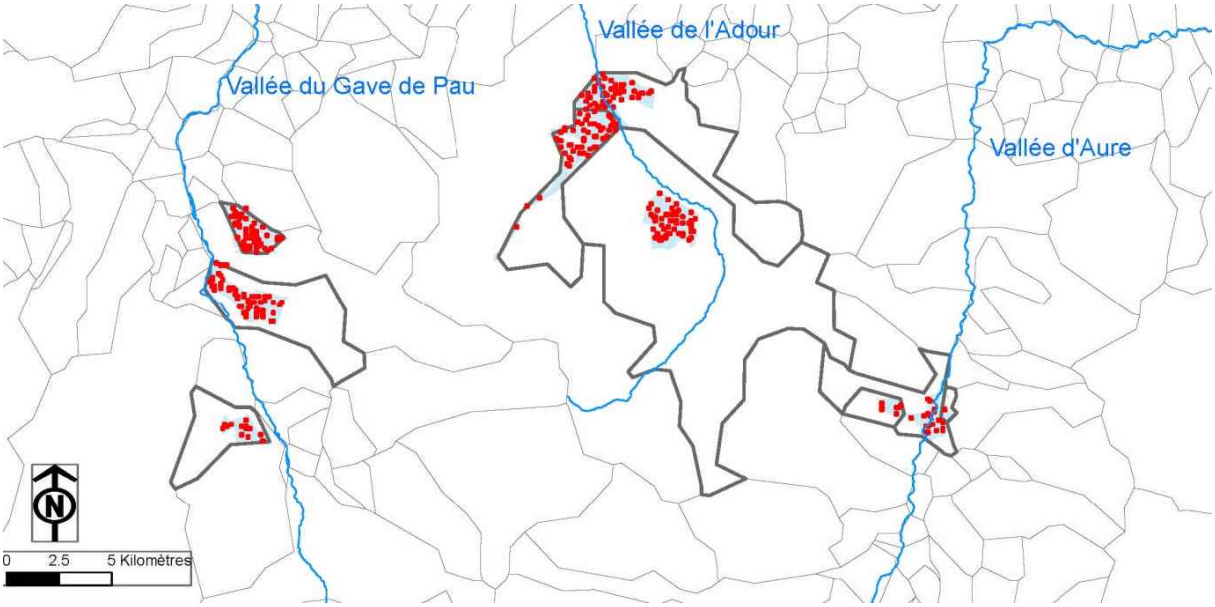
3.1.1. SITE D'ETUDE

Dans les trois vallées étudiées, neuf communes ont été choisies (Carte 3) afin d'obtenir une variabilité importante dans les conditions de milieu (climatiques, édaphiques) et l'histoire agricole des paysages. Sur le territoire de ces neuf communes qui correspond à une superficie de 1580 km^2, on a choisi de travailler sur les terres privées, cultivées, fauchées ou bâties qui sont généralement comprises entre 500 et 1200 m d'altitude.

Les travaux de thèse de Mottet (2005) et de Julien (2006) ont montré que la colonisation des prairies par le frêne était en étroite relation avec les pratiques agricoles mais aussi avec la distribution des semenciers potentiels dans le paysage pastoral. Or, le frêne était avant tout un arbre fourrager et accessoirement un matériau pour la fabrication d'outils. C'est pourquoi le frêne a été implanté près des villages et des granges, là où cette ressource était facilement accessible et mobilisable. La distribution actuelle des vieux arbres concerne donc exclusivement les terres privées. On le trouve en alignement le long des chemins, en bordure des prés de

[8] Des contacts ont déjà été pris avec cette unité de l'université de géographie pour travailler sur une image hyperspectrale du capteur CASI sur Strasbourg. Cette image contient une forêt gérée par l'ONF où est présent le frêne commun.

fauche, isolé comme marque de propriété ou en grappe de quelques individus à coté des granges foraines où il servait de fourrage et de litière (Thiébaut, 2007). Dans la suite du travail nous nous sommes donc limités à l'exploration des terroirs privés à l'exclusion des communaux et des estives.



Carte 3 : Répartition des 300 mailles (carrés rouges) de 1 hectare explorées sur le terrain. Leur distribution au sein des terroirs privés (en bleu) des 9 communes est aléatoire.

3.1.2. STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE

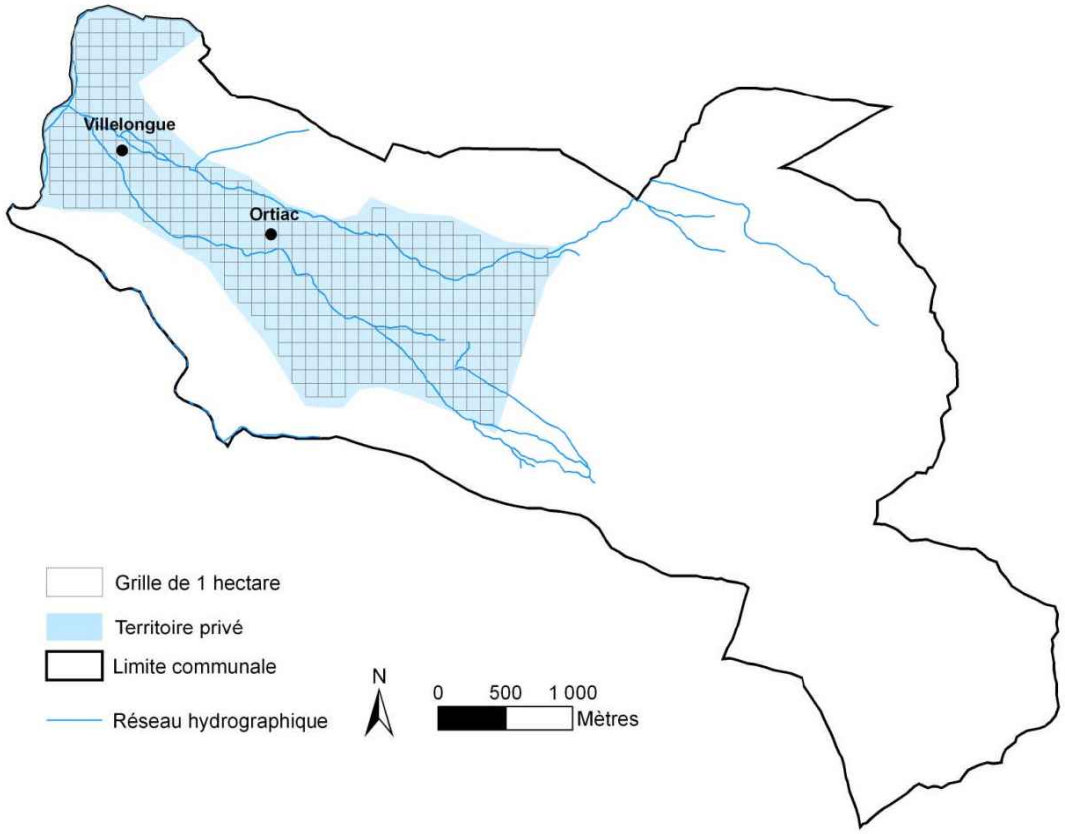
Choix d'une unité élémentaire d'observation

Nous avons décidé d'observer la distribution et les caractéristiques des peuplements de frêne sur des mailles carrées facilement explorable dans leur ensemble sur le terrain. Nous avons réparti des mailles de ¼, ½ et 1 hectare sur des photographies aériennes à l'aide du logiciel Arcview. Après avoir comparé « à l'œil » l'efficacité de ces différentes mailles à rendre compte de la présence de taches d'accrus, après avoir mis en œuvre un essai de repérage des accrus sur le terrain avec ces trois tailles de maille, nous avons choisi une maille de 1 hectare. Cette taille de maille offre une surface qui constitue un bon compromis entre la qualité de l'information recueillie, la faisabilité sur le terrain et la caractérisation de leur occupation du sol à partir des photographies aériennes.

Choix d'un échantillon de mailles

L'ensemble des territoires privés (terroirs à risque) des 9 communes sélectionnées dans les 3 vallées des Hautes-Pyrénées a d'abord été cartographié à partir de l'interprétation de photographies aériennes (datée de 2006, année la plus récente disponible sur notre zone pour avoir le plus de comtemporalité avec la prospection de terrain de 2007). Les territoires privés sont reconnaissables par la taille et l'agencement des parcelles très différents des zones communales. De plus, la limite entre les zones communales et privées est souvent caractérisée

par la présence d'un chemin ou d'une haie. Dans un deuxième temps, une grille de 2393 mailles de 1 hectare à été plaquée sur l'ensemble des territoires privés de ces communes (Carte 4). Il n'était évidemment pas question d'explorer l'ensemble de ces mailles. Nous avons sélectionné par un tirage aléatoire 300 mailles parmi les 2 393. Nous avons retiré les mailles qui tombaient dans les zones habitables où parcourues par des infrastructures routières.



Carte 4 : Carte de la grille de 1ha apposée sur le territoire privé de la commune de Villelongue.

Choix des descripteurs des mailles

Chaque maille a fait l'objet d'une description détaillée qui visait à rendre compte des caractéristiques géomorphologiques, de l'occupation du sol, de la présence éventuelle de frêne, de la physionomie de la végétation et de la présence d'éléments particuliers du paysage susceptibles d'influer sur la présence de frênes et le développement éventuel d'accrus.

Variables géomorphologiques

Les variables géomorphologiques ont été mesurées sur le terrain au centre de chaque maille (Tableau 5). Compte tenu des éventuels problèmes de fiabilité de l'altimètre, l'altitude utilisée dans les analyses a été déterminée au centre de chaque maille à partir des données du modèle numérique de terrain à la résolution de 25mètres (source : BD Topo, IGN).

Tableau 5 : Variables géomorphologiques utilisées dans notre étude comme variables explicatives.

Variables géomorphologiques	Unité de mesure	Gamme de variables	Appareils de mesures
Exposition	Direction cardinale	8 secteurs de 45°	Boussole
Pente	Pourcentage	0 – 100	Clinomètre SUUNTO
Altitude	Mètre	459-1419	Altimètre

Variables d'occupation du sol

Comme indiqué dans le tableau 6, les types d'occupation ont été déterminés sur le terrain à l'œil. Une première estimation des % de chaque type avait été réalisée sur le terrain. Toutefois compte tenu de l'hétérogénéité de beaucoup de mailles, il est vite apparu que ces mesures quantitatives in situ avaient une précision très hétérogène. Aussi, il a été décidé de procéder à une mesure des % a posteriori en photo-interprétant l'occupation du sol (OS) de chaque maille de la photographie aérienne datant de 2006 disponible sur notre zone (en s'aidant bien sûr des données de terrain) et en calculant la surface de chaque type d'OS en utilisant la grille de Prodon.

Tableau 6 : *Variables d'occupation du sol* utilisées dans notre étude comme variables explicatives.

Occupation du sol (OS)	Unité de mesure	Gamme de variation	Mesure
Formations boisées	Pourcentage	0-100	Type d'OS sur le terrain ; % OS sur photographie aérienne sous Arcview
Haie / Alignement d'arbres	Pourcentage	0-100	Idem
Cultures / Labours	Pourcentage	0-100	Idem
Prairies permanents	Pourcentage	0-100	Idem

Eléments particuliers du paysage

Les éléments particuliers des paysages ont été notés en raison du rôle potentiel qu'ils peuvent jouer soit sur l'occupation du sol et sa dynamique, soit sur le processus de colonisation des prairies par les frênes. Par exemple, la présence de grange suppose qu'il existe un groupe de frênes adultes à proximité. La présence d'éléments linéaires du paysage (cours d'eau, talus) est susceptible de rendre compte de la présence d'alignement de frêne. Le tableau 7 donne la liste des variables paysagères utilisées.

Tableau 7 : Variables paysagères utilisées.

Variables	Type de notation	Gamme de variation	Méthode de relevé
Grange	Présence/Absence	0 ou 1	Observation de terrain + vérification sur photographie aérienne au laboratoire
Habitation	Présence/Absence	0 ou 1	Idem
Route	Présence/Absence	0 ou 1	Idem
Talus	Présence/Absence	0 ou 1	Idem
Mur	Présence/Absence	0 ou 1	Idem
Fossé	Présence/Absence	0 ou 1	Idem
Cours d'eau	Présence/Absence	0 ou 1	Idem
Homogénéité de la maille	Présence/Absence	0 ou 1	Idem : Une maille est considérée comme homogène si elle ne contient qu'un seul type d'occupation du sol

Variables d'état de la végétation

Comme dit en introduction de ce chapitre, la colonisation et l'installation des accrus de frêne sont permises par l'extensification voire l'abandon des pratiques d'utilisation des prairies permanentes. Tout au long du siècle dernier, l'utilisation du sol des prairies pyrénéennes a évoluée dans le sens d'un changement d'état progressif des modes d'utilisation des parcelles. Les champs sont devenus des prairies de fauche ou des pâturages, les prés de fauche sont devenus des pâturages, les pâturages ont été utilisés de moins en moins intensivement, certains étant carrément abandonnés. Cette histoire culturale des parcelles a été décrite par Balent & Barrué-Pastor (1986) dans sa composante socio-économique, par Balent (1991) dans sa composante écologique et par Balent & Duru (1984) dans sa composante agronomique.

A partir de ces travaux et des analyses développées dans le cadre de sa thèse, Julien (2006) a proposé une classification des différents stades de colonisation des prairies par le frêne illustrés dans la photo 2 et rappelés ci-dessous :



Prairie non colonisée



Prairie stade 1



Prairie stade 2



Perchis

Photo 2 : Les 4 stades de colonisation et de développement du frêne dans les prairies (d'après Julien, 2006)

- Les **prairies non-colonisées** où la végétation est dominée par *Festuca rubra*, *Holcus lanatus*, *Dactylis glomerata*, *Cynosurus cristatus*, *Anthoxanthum odoratum*, *Rhinanthus minor*, *Trifolium repens* and *Trifolium pratense*. Ces prairies sont en général soit fauchées soit fauchées et pâturées au printemps ou en automne quand les animaux descendent des estives.

- Les prairies de **stade 1**: Il s'agit de prairies colonisées où la végétation est dominée par *Festuca rubra*, *Holcus lanatus*, *Dactylis glomerata, Veronica chamaedris*, *Lotus corniculatus* et *Galium verum.* La hauteur moyenne des frênes est d'environ 1m (valeurs extrêmes de 8 cm à 6.5 m) et l'âge moyen des arbres de 12 ans (valeurs extrêmes de 5 à 36 ans!). La hauteur des arbres est régulièrement limitée par des activités de pâturages régulières et fréquentes.

- Les prairies de **stade 2** : Il s'agit de prairies où la végétation est dominée par *Brachypodium pinnatum*, *Dactylis glomerata, Agrostis capillaris, Cruciata laevipes* et

Potentilla montana. La hauteur moyenne des arbres est de 4.4 mètres (entre 1.1 et 10.25m) et l'âge moyen des arbres est de 17 ans (entre 7 et 37 ans). Ces prairies sont encore pâturées mais de façon très irrégulière.

- Les **perchis** de frêne où les plantes de sous bois sont dominées par *Geranium robertianum*, *Festuca rubra*, *Poa trivialis*, *Hedera helix*, *Helleborus foetidus*, *Alliaria petiolata* et *Geum urbanum.* La hauteur moyenne des arbres est de 14 mètres (entre 8.6 et 21 mètres) et l'âge moyen des arbres de 23 ans (entre 17 et 32 ans). Ces accrus se sont installés sur des prairies abandonnées depuis très longtemps.

C'est à partir de ces définitions proposées par Julien (2006) que la catégorisation des prairies sur le terrain a été réalisée. Pour les prairies non-colonisées, nous avons défini 3 sous catégories définies à l'œil à partir de la physionomie de la végétation. L'ensemble de ces catégories de prairies est reportée dans le tableau 8.

Tableau 8 : Détails des notations et des mesures effectuées dans chacune des catégories de végétations étudiées (variables explicatives=VE et variables à expliquer= VaE).

Type de variable	Variables	Type de notation	Gamme de variation	Type de mesure
VE	Prairies très pâturée	Présence/ Absence	0 ou 1	Observation in situ : herbe rase homogène sans adventices
	Prairie modérément pâturée	Présence/ Absence	0 ou1	Observation in situ : végétation supérieure à 15 cm, hétérogène avec touffes de refus
	Prairie abandonnée	Présence/ Absence	0 ou 1	Observation in situ : végétation haute (> 30 cm) et hétérogène
VaE	Prairie colonisée Stade 1 (Julien, 2006))	Pourcentage	0 à 100	Type d'OS sur le terrain ; % OS sur photographie aérienne sous Arcview Présence de quelques frêne (> 1m)
	Prairie colonisée Stade 2 (Julien, 2006)	Pourcentage	0 à100	Type d'OS sur le terrain ; % OS sur photographie aérienne sous Arcview Présence régulière de frênes (>1m)
	Perchis (Julien, 2006)	Pourcentage	O à 100	Type d'OS sur le terrain ; % OS sur photographie aérienne sous Arcview

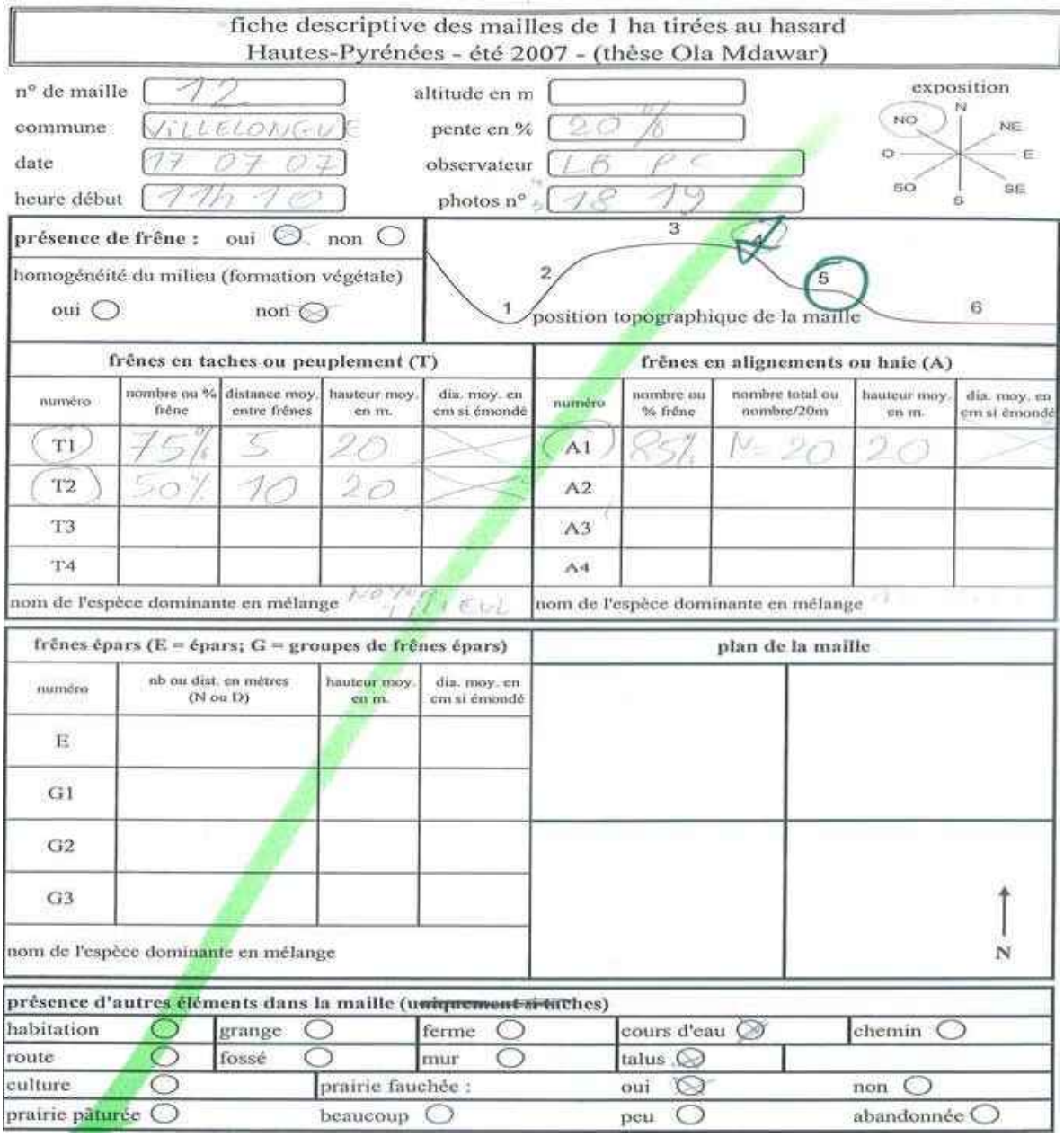
3.1.3. MODALITES PRATIQUES D'OBSERVATION SUR LE TERRAIN

Les relevés ont été réalisés pendant l'été 2007 en juillet et août dans des conditions climatiques tout à fait normales. Deux équipes de 2 observateurs[9] se sont réparties 300 mailles en fonction

[9] Les deux équipes de 2 étaient composées de moi-même, Jérôme Willm et Laurent Burnel (techniciens à l'UMR Dynafor) et Philippe Caniot (naturaliste engagé sur contrat)

de leur distribution géographique et des modalités pratiques d'accès. La campagne d'observation a fait l'objet d'une préparation minutieuse:

- Préparation des documents de terrain : fiche de saisie (Figure 4) et atlas cartographiques (Figure 5);
- Test et amélioration des fiches de terrain ;
- Campagne effective sur le terrain (durée=2 mois).



fiche descriptive des mailles de 1 ha tirées au hasard
Hautes-Pyrénées - été 2007 - (thèse Ola Mdawar)

n° de maille 12 | altitude en m | exposition
commune VILLELONGUE | pente en % 20 %
date 17 07 07 | observateur LB PC
heure début 11h10 | photos n° 18 19

présence de frêne : oui ◯ non ◯

homogénéité du milieu (formation végétale)
oui ◯ non ◯

position topographique de la maille : 1 2 3 4 5 6

frênes en taches ou peuplement (T)

numéro	nombre ou % frêne	distance moy. entre frênes	hauteur moy. en m.	dia. moy. en cm si émondé
T1	75%	5	20	
T2	50%	10	20	
T3				
T4				

nom de l'espèce dominante en mélange : frêne

frênes en alignements ou haie (A)

numéro	nombre ou % frêne	nombre total ou nombre/20m	hauteur moy. en m.	dia. moy. en cm si émondé
A1	85%	N=20	20	
A2				
A3				
A4				

nom de l'espèce dominante en mélange

frênes épars (E = épars; G = groupes de frênes épars)

numéro	nb ou dist. en mètres (N ou D)	hauteur moy. en m.	dia. moy. en cm si émondé
E			
G1			
G2			
G3			

nom de l'espèce dominante en mélange

plan de la maille N

présence d'autres éléments dans la maille (~~uniquement si tâches~~)

habitation ◯	grange ◯	ferme ◯	cours d'eau ⊗	chemin ◯
route ◯	fossé ◯	mur ◯	talus ⊗	
culture ◯	prairie fauchée :	oui ⊗	non ◯	
prairie pâturée ◯	beaucoup ◯	peu ◯	abandonnée ◯	

Figure 4 : Exemple de fiche de terrain (Maille n°12) contenant les variables recherchées.

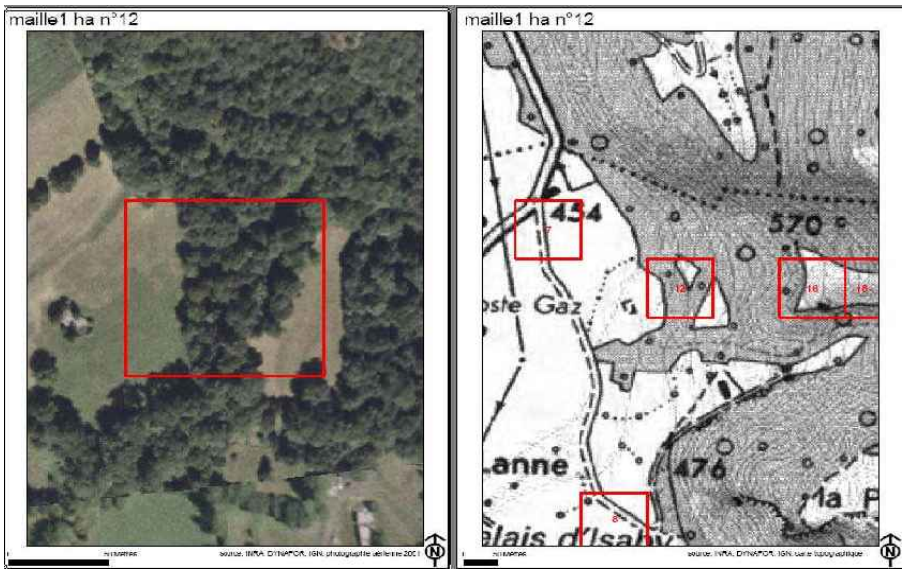


Figure 5 : Atlas cartographique : Chaque maille est représentée sur le scan topo IGN à une échelle permettant d'accéder à la maille par la route (à droite) et sur la BD ortho 2006 de l'IGN (à gauche).

La variable à expliquer « accrus de frêne », codée « taches ou peuplements » dans la fiche de la figure 4, a été définie comme tout ensemble d'individus de hauteur supérieure à 1m et dont la distance moyenne entre individus est inférieure à leur hauteur moyenne (voir exemple d'accrus dans la photo 3).

Le pourcentage d'occupation au sol des accrus a été estimé à partir des photos aériennes (Photo 3) à l'aide d'une grille-mire (Prodon, 1976).



Accrus au stade perchis — Frênes isolés dans des prés de fauche

Photo 3 : Distinction entre accrus et arbres épars lors des observations.

Le fichier de base de données

Le fichier utilisé pour les analyses statistiques comprend 300 lignes (une par maille) et une vingtaine de variables explicatives. La variable à expliquer est la présence des accrus de frêne dans les mailles. Cette présence est exprimée de deux façons complémentaires : soit de manière qualitative en présence/absence, soit de manière quantitative en pourcentage d'occupation du sol de la maille (dans le cas où plusieurs taches d'accrus existent dans la maille c'est le % cumulé de toutes les taches qui a été retenu).

19 variables explicatives ont été retenues et regroupées en trois familles : les données géomorphologiques, les variables d'occupation du sol (en incluant les différentes intensités de pâturage des variables d'états de la végétation) et les données concernant la présence d'éléments particuliers du paysage.

3.1.4. ANALYSE DES DONNEES[10]

La question posée en analyse de données est d'expliquer une variable qualitative (présence/absence d'accrus de frênes dans les mailles) ou quantitative (% d'occupation des mailles par les accrus) en fonction d'une ou plusieurs variables qualitatives, quantitatives ou qualitatives et quantitatives.

La régression logistique

La **régression logistique** est une technique statistique qui a pour objectif, à partir d'un ensemble d'observations, de produire un modèle permettant de prédire les valeurs prises par une variable catégorielle, le plus souvent binaire, à partir d'un ensemble de variables explicatives continues et/ou elles-mêmes binaires.

Une variable aléatoire qualitative est décrite par les probabilités des différentes valeurs qu'elle peut prendre (l'hypothèse de normalité ne s'applique pas). La probabilité avec laquelle la variable qualitative dichotomique présence/absence d'accrus de frêne prend la valeur présence ou la valeur absence est un modèle « binomial» (Taffé 2004).

Si on considère que la réponse 1 (i.e. présence d'accrus) a une probabilité p, la réponse 0 (i.e. absence d'accrus) a une probabilité 1- p. La fonction de lien choisie est le logit qui s'écrit :

$$\text{logit}(p) = \log(p/1\text{-}p).$$

L'estimation du modèle de régression logistique se fait généralement par la méthode du maximum de vraisemblance. Lorsque les observations individuelles sont supposées indépendantes, ce qui est le cas dans notre échantillon, cette vraisemblance s'écrit comme un

[10] L'analyse des données a été réalisée dans le cadre du MR2 de Mélanie AKA sous la direction de Michel Goulard (Biométricien)

produit des probabilités dont on teste la significativité des coefficients. Ici nous avons utilisé le test de Wald [11].

Par la fonction Step nous comparons le modèle calculé avec toutes les variables aux différents sous modèle obtenus par ajout ou élimination de variable sur la base de la diminution du critère d'AIC (Akaike Information Criterion = la vraisemblance pondérée par un terme qui prend en compte le nombre de paramètres du modèle). Par ailleurs nous avons étudié différents modèles construits par famille de variables explicatives (géomorphologie, occupation du sol, types de prairies et éléments particuliers du paysage) afin de hiérarchiser le poids de ces différentes ensembles. Pour ce faire, on soustrait du modèle construit avec toutes les variables, chaque groupe de variables explicatives listé ci-dessus, puis chaque groupe de variable ainsi retiré est analysé séparément.

L'analyse de la qualité prédictive d'un modèle comporte une analyse des résidus. Dans le cas d'une régression logistique portant sur la prédiction d'une variable binaire l'examen de ces résidus apporte peu d'informations. Cependant une procédure de simulation de type Monte – Carlo permet de visualiser la pertinence du modèle. Dans cette procédure on utilise les résidus de déviance.

A partir des probabilités estimées pour le modèle logistique il est possible de fixer un seuil et de classer un individu dans la catégorie 1 si sa probabilité est supérieure au seuil et dans la catégorie 0 si elle est inférieure. La méthode des courbes ROC (Receiver Operating Characteristic) est très souvent utilisée pour évaluer la qualité prédictive d'un modèle logistique (Hanley & McNeil 1982 ; Zweig & Campbell 1993). L'aire sous le courbe ROC (Area Under Curve ou AUC) varie entre 0,5 et 1 et indique le pourcentage de décisions correctes (Swets 1988). Quand le résultat de la prédiction est entièrement aléatoire l'AUC prend la valeur 0.5, quand la prédiction est parfaite l'AUC vaut 1. L'évaluation de la qualité de la prédiction est basée sur la règle empirique suivante (Swets 1988 ; Manel et al. 1999) : Quand l'AUC est entre 0.9 et 1, on considère que la prédiction est excellente; bonne entre 0.8 et 0.9, moyenne entre 0.70 et 0.8, mauvaise entre 0.6 et 0.7 et nulle en dessous de 0.6.

L'analyse discriminante

L'analyse discriminante peut être une technique descriptive. L'objectif est alors de proposer un nouveau système de représentation des observations à partir d'une combinaison linéaire des variables descriptives qui permettent de discriminer au mieux les groupes d'observations. L'analyse discriminante peut aussi être prédictive. Il s'agit dans ce cas de construire une fonction de classement (règle d'affectation, ...) qui permet de prédire le groupe d'appartenance d'un individu à partir des valeurs prises par les variables prédictives. En ce sens, cette technique se rapproche des techniques supervisées en apprentissage automatique telles que les arbres de

[11] Pour un exposé détaillé de la méthode et du formalisme mathématique associé voir le mémoire de master recherche de Mélanie Aka : Aka,M. (2008) L'expansion du frêne dans les paysages des Pyrénées centrales est- elle «statistiquement» prédictible? Master Recherche Fonctionnement des Ecosystèmes et Anthropisation Université de Toulouse.

décision. La fonction de classement est une combinaison linéaire des variables prédictives, facile à analyser et à interpréter.

Les arbres de régression (de décision) [12]

Les arbres de décision sont utilisés pour prédire avec le plus de précision possible les valeurs prises par une variable à prédire (ici la présence/absence ou l'abondance des accrus de frêne dans les mailles) à partir d'un ensemble de descripteurs (variables prédictives, variables discriminantes, variables d'entrées, ...).

De nombreuses études montrent que les arbres de régression offrent une alternative intéressante aux régressions linéaires généralisées (GLM). Les arbres sont faciles à construire, la visualisation hiérarchique des variables par l'arbre est explicite et facile à comprendre. L'algorithme inclut des interactions entre variables (Franklin 1998; Iverson & Prasad 1998; Vayssières et al. 2000). L'hétérogénéité d'un nœud est définie à partir d'une déviance d'un modèle Gaussien (arbre de régression) ou multinomial (arbre de classification) (Rouget et al. 2001). Pour contrôler la longueur de l'arbre, des fonctions d'élagage construisent des séquences de sous-arbres emboîtés en supprimant de manière récursive les nœuds expliquant la moins grande déviance dans les données.

La distinction entre arbre de classification et de régression provient de la variable à expliquer: si elle est catégorielle (présence/absence d'accrus) on utilise un arbre de classification (CTA), si elle est continue (% d'accrus par maille) on utilise un arbre de régression (RTA). A l'inverse des régressions généralisées cette méthode permet de mieux matérialiser les ruptures et les discontinuités.

La représentation sptaiale du résultat des modèles

Nous avons tenté une représentation de la distribution spatiale des probabilités prédites par les modèles de régression logistique [13]. La méthode de classification choisie sous Arcview est celle de l'algorithme de Jenks qui vise à réduire la variance intra-classes et à maximiser la variance interclasses. En gros elle repère, suivant le nombre de classes spécifié au départ, les classes contenant les individus les plus homogènes (valeurs proches) et les plus distinctes les unes des autres. Cette méthode fonctionne bien sur tout type de distribution, mais les cartes produites ne sont pas comparables entre elles, chaque discrétisation est fortement dépendante de la variable traitée. La classification des données de prédiction du modèle permet d'une part de faciliter la lecture du résultat obtenu sur une carte et d'autre part de mettre en avant les tendances observables dans la zone représentée.

[12] Les données ont été analysées sous R à l'aide des librairies Biodiversity-R, Tree pour les arbres de régression, et des applications développées dans cet environnement par Michel Goulard.

[13] Avec l'aide de l'ingénieur SIG de l'Unité, Sylvie Ladet

3.2 RESULTATS

3.2.1 PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE L'ECHANTILLON ET OCCURRENCE DES ACCRUS DE FRENE

La figure 6 illustre la diversité de la distribution des variables géomorphologiques des 300 mailles dans les trois vallées. Les fréquences des expositions des mailles reflètent l'organisation générale des territoires montagnards : l'exposition nord est réservée principalement aux forêts et la majorité des terroirs privés est exposée vers les secteurs ouest et sud. La gamme d'altitude est importante (de 400 à 1500m) et culmine non loin de la limite supérieure du frêne dans les Pyrénées. Les pentes sont très fortes et certaines exceptionnellement élevées (ravines) sont anecdotiques pour notre analyse.

Le premier résultat marquant est que, comme nous pouvions nous y attendre, le frêne est omniprésent sur la zone étudiée. Sur les 300 mailles tirées au hasard le frêne est présent sur 88% des mailles. Les accrus sont présents sur 1/3 des mailles ce qui représente également une fréquence très importante qui confirme le caractère général du phénomène dans ces vallées pyrénéennes.

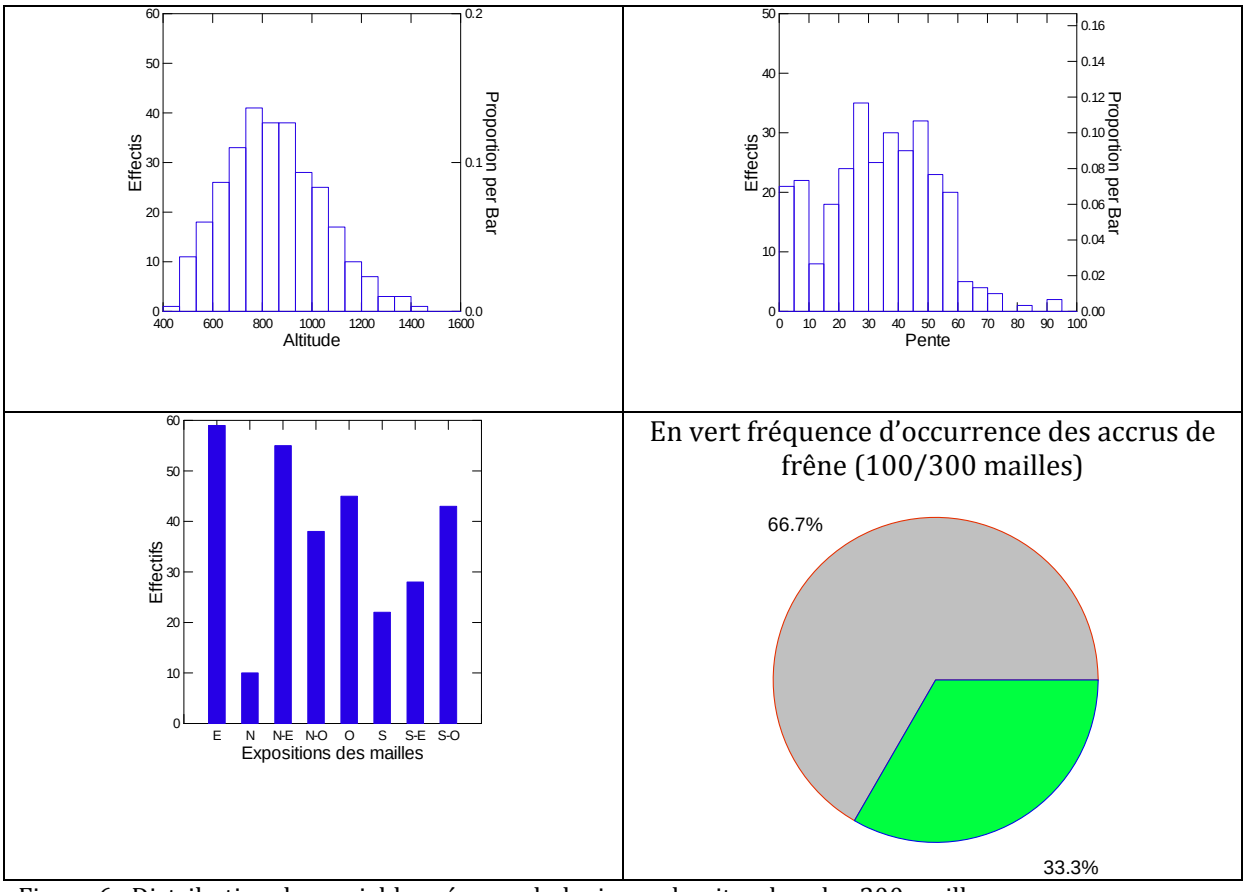


Figure 6 : Distribution des variables géomorphologiques decrites dans les 300 mailles.

3.2.2. ANALYSE EXPLORATOIRE DES DONNEES

Le tableau 9 montre le résultat de l'exploration de la valeur explicative de la présence/absence des accrus de frênes par chaque variable explicative prise une par une.

On notera le caractère très significatif de la corrélation de la présence/absence d'accrus avec la pente et l'altitude. Plus la pente et l'altitude ont des valeurs élevées plus la fréquence des accrus augmente. La présence d'habitations est également corrélée négativement à la présence d'accrus. Les accrus sont en général situés loin des villages et des bâtiments de ferme. Les autres variables de contexte paysager ne sont pas corrélées, même pour les granges pour lesquelles nous aurions pu nous attendre à une corrélation positive. Par contre il est intéressant de noter que la présence de prairies intensément pâturées est négativement corrélée à la présence d'accrus. Une utilisation intensive des prairies empêche les frênes de s'installer. A contrario la présence de prairies abandonnées n'implique pas forcément la présence d'accrus.

Les variables d'occupation du sol n'ont pas été analysées car auto-corrélées avec la variables à expliquer. En effet, plus un mode d'occupation du sol est dominant dans une maille moins il reste de place pour un autre mode d'occupation comme les accrus ou tout autre.

Tableau 9 : Relations entre la présence/absence d'accrus de frêne et les variables explicatives : Analyse du Chi^2 pour les variables qualitatives et ANOVA à un facteur pour les variables quantitatives.

Pearson Chi-square	**Value**	**Df**	**p-value**
Route	0.009	1.000	0.926
Chemin	0.248	1.000	0.618
Rivière	0.008	1.000	0.930
Ferme	0.407	1.000	0.524
Grange	1.641	2.000	0.440
Habitation	5.421	1.000	**0.020**
Fossé	0.031	1.000	0.860
Mur/Terrasse	0.390	1.000	0.532
Talus	0.057	1.000	0.304
Exposition	3.769	7.000	0.806
P1 – pâturage intense	20.167	1.000	**0.000**
P2 – pâturage moyen	0.213	1.000	0.644
P3 – prairie abandonnée	0.062	1.000	0.804
ANOVA	**F-Ratio**	**Df**	**P-value**
Pente	21.767	1	**0.000**
Altitude	19.259	1	**0.000**

3.2.3. RÉSULTATS DE L'ANALYSE DISCRIMINANTE

L'analyse discriminante pas à pas (seuil de rejet p<0.1) effectuée sur l'ensemble des variables du tableau ci-dessus ne donne pas de résultat très performant. Cinq variables sont sélectionnées dans le modèle. L'altitude, la pente plus la présence de routes (le rôle de cette variable est difficile à expliquer) contribuent à discriminer positivement la présence d'accrus ; la présence de granges et l'exposition au sud contribuent à discriminer l'absence d'accrus.

La matrice de confusion représentée dans le tableau 10 montre que la qualité globale de la prédiction est médiocre.

Tableau 10 : Matrice de confusion

		Mailles observées			**% bien classés**
		Absence	Présence	Total	
Mailles prédites	Absence	**131**	**69**	200	**66**
	Présence	**33**	**67**	100	**67**
	Total	164	136	300	**66**

3.2.4. RÉSULTATS DU MODÈLE LOGISTIQUE

Le modèle le plus parcimonieux obtenu par la fonction S*tep* décrit la présence d'accrus en fonction des variables explicatives présentées dans le tableau 11.

Tableau 11 : Valeurs de l'estimation et seuils de significations associés à la p-value du meilleur modèle de régression logistique multiple obtenu pour expliquer la présence/absence d'accrus de frêne.

Variables explicatives	**Estimate**	**Standard Error**	**z value**	**Pr (>|z|)**
Intercept	-4.327	0.992	-4.363	***
Altitude	0.003	0.001	3.168	**
Pente	0.056	0.013	4.462	***
% Prairies pâturées	-0.039	0.008	-5.000	***
Prairie abandonnée (P3)	1.869	0.521	3.588	***
Prairie intensément pâturée (P1)	1.219	0.391	3.120	**
% Bois	-0.029	0.007	-4.129	***

Le tableau 11 résume les prédicteurs sélectionnés dans le modèle de régression logistique multiple, avec les seuils de signification correspondants (P-value < 0,05) calculés par le test de Wald (Harrell 2000). Parmi les variables géomorphologiques, la pente joue un rôle plus

important que l'altitude. La présence de prairies pâturées limite la présence d'accrus alors que la présence de prairies abandonnées est positivement corrélée avec leur présence.

Le tableau 12 résume les performances statistiques des différents sous-modèles testés. Le modèle plus complet établi avec l'ensemble des variables explicatives potentielles (**modèle 1**) explique 24,79% de la déviance nulle avec un AIC de 337. Ceci rend compte de la complexité du processus étudié puisque seulement ¼ de la variabilité totale est expliqué.

Quand on regarde les modèles « thématiques », on constate que le modèle établi avec comme variables explicatives les éléments particuliers du paysage (**modèle 7**) est celui qui explique le moins bien la déviance nulle du modèle : On perd 2.63% de la déviance expliquée par le modèle général en enlevant ces variables et on gagne 3.33% en les analysant seules. La qualité prédictive du modèle 1 privé des éléments particuliers du paysage est meilleure que celle du modèle 1 complet (l'AIC passe de 337 à 327). Les modèles établis avec les variables géomorphologiques et les variables d'occupation du sol ont des déviances comparables : respectivement 8.97% pour les variables géomorphologiques seules – **modèle 5** - et 11,91% pour le modèle 1 privé de ces variables – **modèle 3** -, 7.94% pour les variables d'occupation du sol seules – **modèle 6** - et 12.18 % pour le modèle 1 privé de ces variables – **modèle 4** -). Les AIC des modèles 5 et 6 sont comparables 365.07 et 362.97. Si on compare l'AIC du modèle AC obtenu à partir du Step (317,53) à celui du modèle 1 (337,1) on remarque que bien qu'il soit théoriquement un « meilleur » modèle en raison de son plus petit AIC, le modèle 1 explique davantage la déviance du modèle (déviance résiduelle plus faible : 285.10 contre 303.53).

Tableau 12 : Ensemble des modèles de régression logistique multiple obtenus pour expliquer la présence/absence d'accrus de frêne en fonction de différentes familles de variables explicatives (critère de la déviance expliquée [14]).

	Déviance nulle = A	**Déviance résiduelle =B**	**A -B**	**Explication de la déviance**	**AIC**
Modèle 1 = totalité des variables explicatives	379.08	285.10	93.97	93.97 / 379.08 = **(24.79 %)**	337.1
Modèle 2 =Modèle 1-variables géomorphologiques	379.08	333.93	45.15	45.15 / 379.08= **(11.91 %)**	367.93
Modèle 3 =Modèle 1-variables occupation du sol	379.08	332.89	46.19	46.19 / 379.08 = **(12.18 %)**	372.89
Modèle 4 =Modèle 1-variables éléments particuliers du paysage	379.08	295.07	84	84 / 379.08 = **(22.16 %)**	327.07
Modèle 5 = variables géomorphologiques	379.08	345.07	34.01	34.01 / 379.08 = **(8.97%)**	365.07
Modèle 6 = variables occupation du sol	379.08	348.97	30.11	30.11 / 379.08 = **(7.94%)**	362.97
Modèle 7 = éléments du paysage	379.08	366.47	12.61	12.61 / 379.08 = **(3.33%)**	388.47
Modèle AC = Modèle du step	379.08	303.53	75.55	75.55 /379.08 = **(19.93 %)**	317.53

[14] L'adéquation du modèle obtenu par rapport au modèle de base est testée par calcul de la **déviance** (statistique du test du rapport de vraisemblance).

3.2.5. RESULTATS DES ARBRES DE REGRESSION

Rappelons que nous avons utilisé les arbres de régression pour les raisons suivantes : Ils sont applicables à des variables quantitatives et qualitatives, la procédure de décision est facile à comprendre en raison de son expression graphique, ils sont robustes et permettent la sélection de variables.

Nous avons utilisé ces arbres de régression pour expliquer la présence/absence des accrus et leur abondance dans les mailles (Figures 7 et 8).

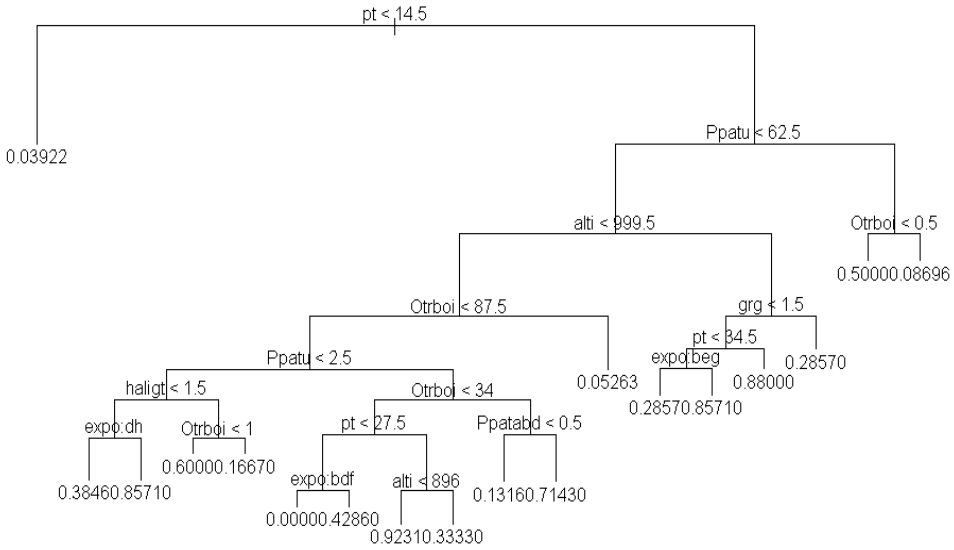


Figure 7 : Arbre de régression pour la présence/absence des accrus de frêne.
Pt= pente ; Ppatu = présence de prairies pâturées ; Ppatabd = prairies abandonnées ou en voie d'abandon ; alti = altitude ; Otrbo = % de bois dans la maille ; grg = présence de grange ; expo = exposition ; haligt = présence de haies et d'alignements d'arbre.

L'arbre de régression complet illustre à la fois le rôle primordial de certaines variables comme la pente (les accrus ne se trouvent que sur des parcelles à forte pente), l'importance de l'entretien des prairies (le frêne est présent là où les prairies pâturées sont minoritaires). Beaucoup de variables interviennent dans cet arbre ce qui rend l'interprétation relativement compliquée contrairement aux attendus de la méthode. Le fait que des variables d'occupation du sol jouent un rôle important pose problème dans la mesure où il est naturel que les accrus de frêne se développent là où les autres modes d'occupation du sol sont minoritaires.

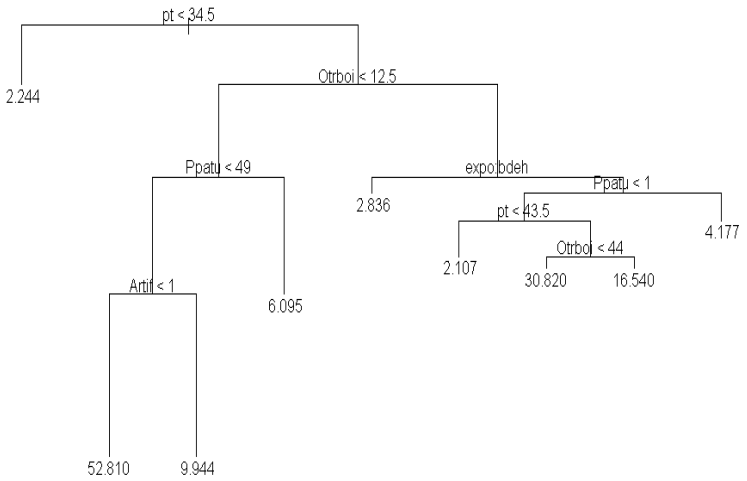


Figure 8 : Arbre de régression pour le pourcentage d'accrus de frêne.
Pt= pente ; Ppatu = présence de prairies pâturées ; Artif= présence d'éléments artificialisés dans le paysage ; Otrbo = % de bois dans la maille ; expo = exposition.

L'analyse avec le % d'accrus dans les mailles semble plus intéressante à interpréter dans la mesure où la première dichotomie dans l'arbre concerne un seuil de pente de 34% qui correspond exactement au seuil qui sépare les zones mécanisables de celles qui ne le sont pas.

Dans le tableau récapitulatif (13), on remarque qu'en plus des variables explicatives retenues par la régression logistique comme la pente, l'altitude ou le % des prairies pâturées, d'autres variables explicatives sont sélectionnées : l'exposition, la présence de granges, les haies et les alignements pour l'arbre explicatif de la présence/absence ; la présence d'éléments artificiels du paysage et l'exposition pour l'arbre explicatif du pourcentage d'accrus. Classiquement l'arbre explicatif de la présence/absence du frêne donne un taux d'erreur de classification des modalités 0 et 1 contrairement à celui construit avec les pourcentages d'accrus (une variable continue).

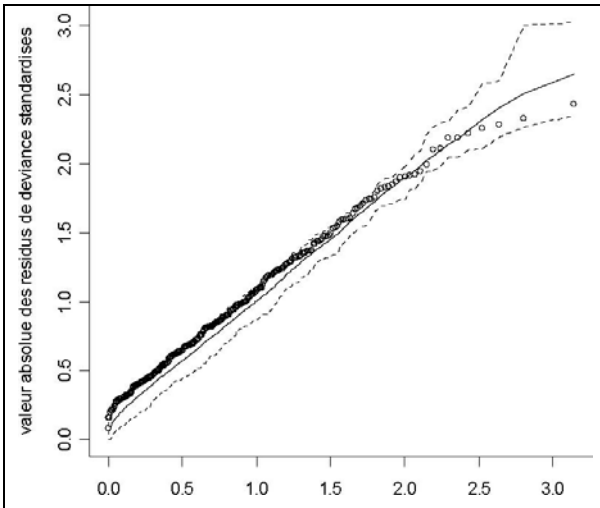
Tableau 13 : Résumé des résultats des arbres de régressions : comparaison de la qualité de la prédiction et de variables explicatives de la présence/absence ou de l'abondance des accrus de frêne.

	Arbre de régression Présence/absence du frêne	**Arbre de régression Pourcentage d'accrus par maille**
Variables explicatives	Pente, % bois, % prairie pâturée, exposition, altitude, grange, haie/alignement	Pente, % bois, % prairie pâturée, présence d'éléments artificiels, exposition
Moyenne de la déviance résiduelle	0.5467 = 148.7 / 272	94.87 = 27610 / 291
Nombre de nœuds	28	9
Taux d'erreur sur le classement	0.1267 = 38 / 300	-

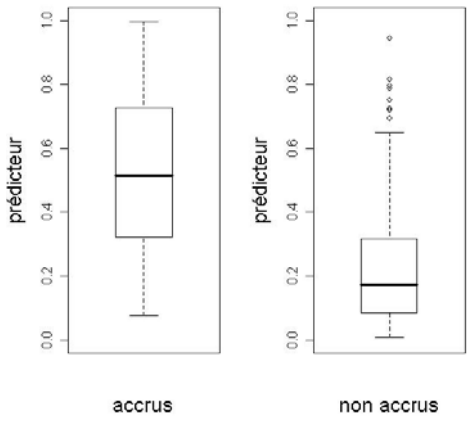
3.2.6. QUALITE DE LA PREDICTION AVEC DES SIMULATIONS DE MONTE-CARLO

Les simulations de **Monte-Carlo** visent à calculer une valeur numérique, et utilisant des procédés aléatoires, c'est-à-dire des techniques probabilistes. Elles permettent d'introduire une approche statistique du risque. Elles consistent à effectuer un grand nombre de tirages aléatoires dans les distributions de probabilité des variables étudiées afin de déterminer la probabilité d'occurrence de chacun des résultats.

Dans le cas du modèle logistique présenté précédemment, après 19 simulations on ne remarque pas de point extérieur aux enveloppes (Figure 9). Il y existe donc une bonne cohérence entre la prédiction du modèle et les données.



quantiles distribution normale



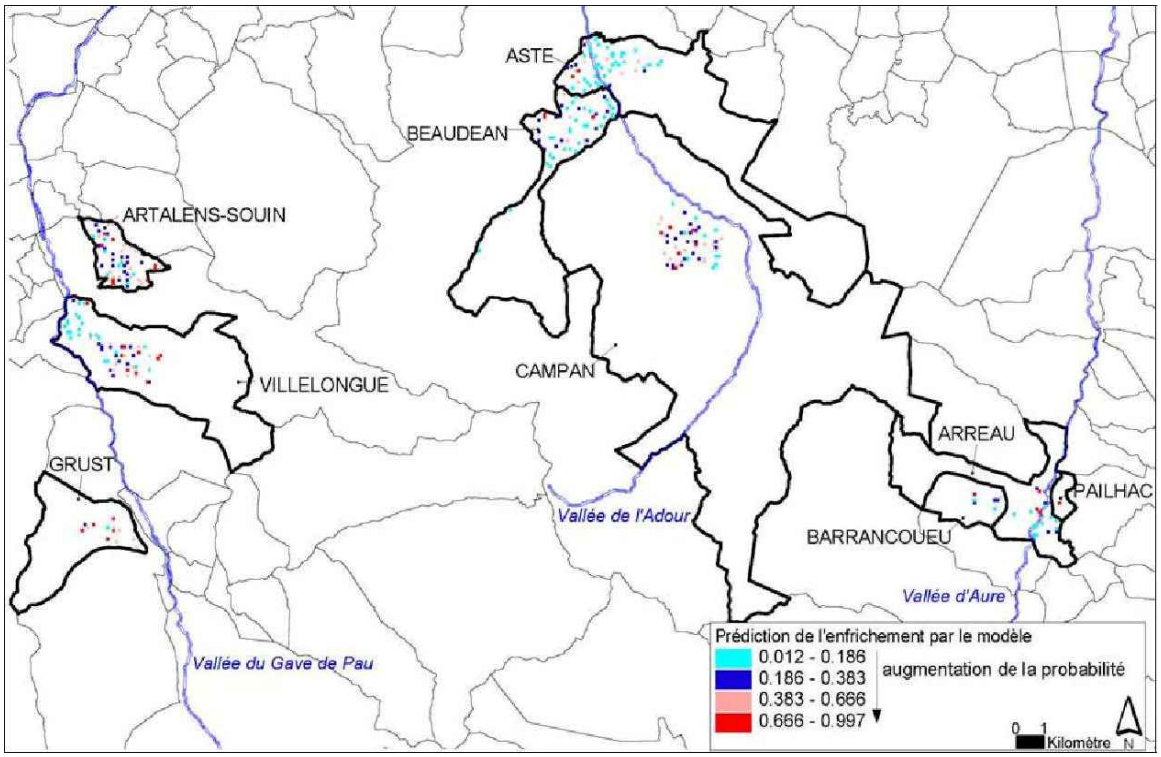
dispersion de la probabilité de prédiction

Le modèle affiche une meilleure probabilité de prédiction pour l'absence d'accrus que pour la présence

Figure 9 : Qualité prédictive et pouvoir discriminant du modèle logistique.

3.2.7. REPRESENTATION SPATIALE DE LA PREDICTION

Sur la base des résultats du modèle logistique présentés ci-dessus, la probabilité de présence d'accrus dans les mailles a été calculée, puis les valeurs ont été cartographiées (Carte 5).

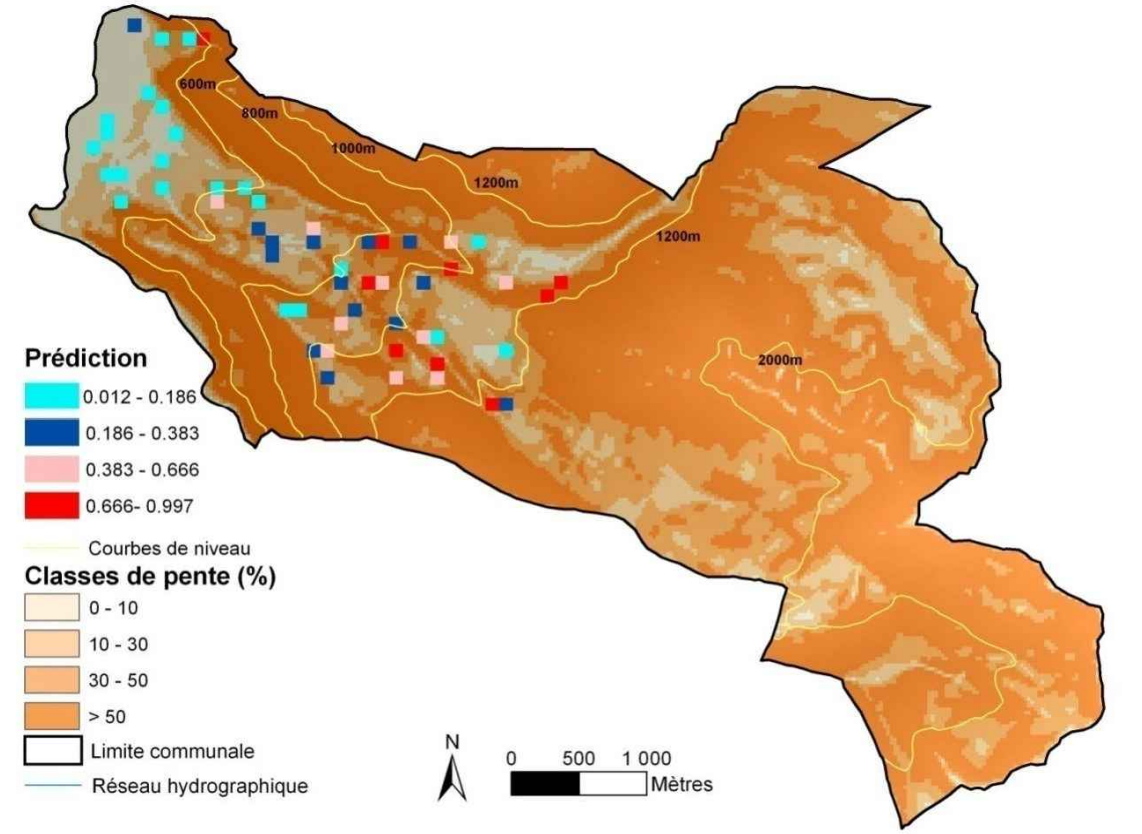


Carte 5 : Cartographie des probabilités de colonisation dans les trois vallées.

Nous constatons qu'il existe des différences de risque de colonisation entre les 3 vallées et les différentes communes. Si les trois vallées ont un risque important de colonisation par les accrus de frêne, la probabilité la plus forte concerne la vallée du Gave de Pau (fig. 10).

Si nous zoomons sur la commune de Villelongue, bien connue car étudiée dans le cadre des thèses d'Anne Mottet et de Marie-Pierre Julien, nous constatons que la distribution des risques de colonisation n'est pas aléatoire (Carte 6).

Les probabilités les plus faibles se trouvent dans le bas du versant là ou les pentes sont les plus faibles. L'augmentation de la probabilité de colonisation avec l'altitude et l'éloignement au village est bien visible (Carte 6).



Carte 6 : Cartographie des probabilités de colonisation dans la commune de Villelongue.

Si l'on s'intéresse à la variabilité de la distribution de la probabilité de notre échantillon d'une commune à l'autre et d'une vallée à l'autre, nous trouvons des différences significatives. Pour huit des neuf communes (il n'y a qu'une maille sur la commune de Pailhac) une ANOVA indique un effet vallée significatif ($p<0.000$). Si l'on élimine l'effet altitude auquel nous pourrions attribuer ce résultat, la différence reste significative ($p=0.016$). Les boîtes à moustache (Figure 10) montrent que c'est la vallée du gave de Pau qui est différente des deux autres. Il est possible que le fort développement du tourisme (proximité de Lourdes) y ait entraîné une déprise agricole plus ancienne et plus importante.

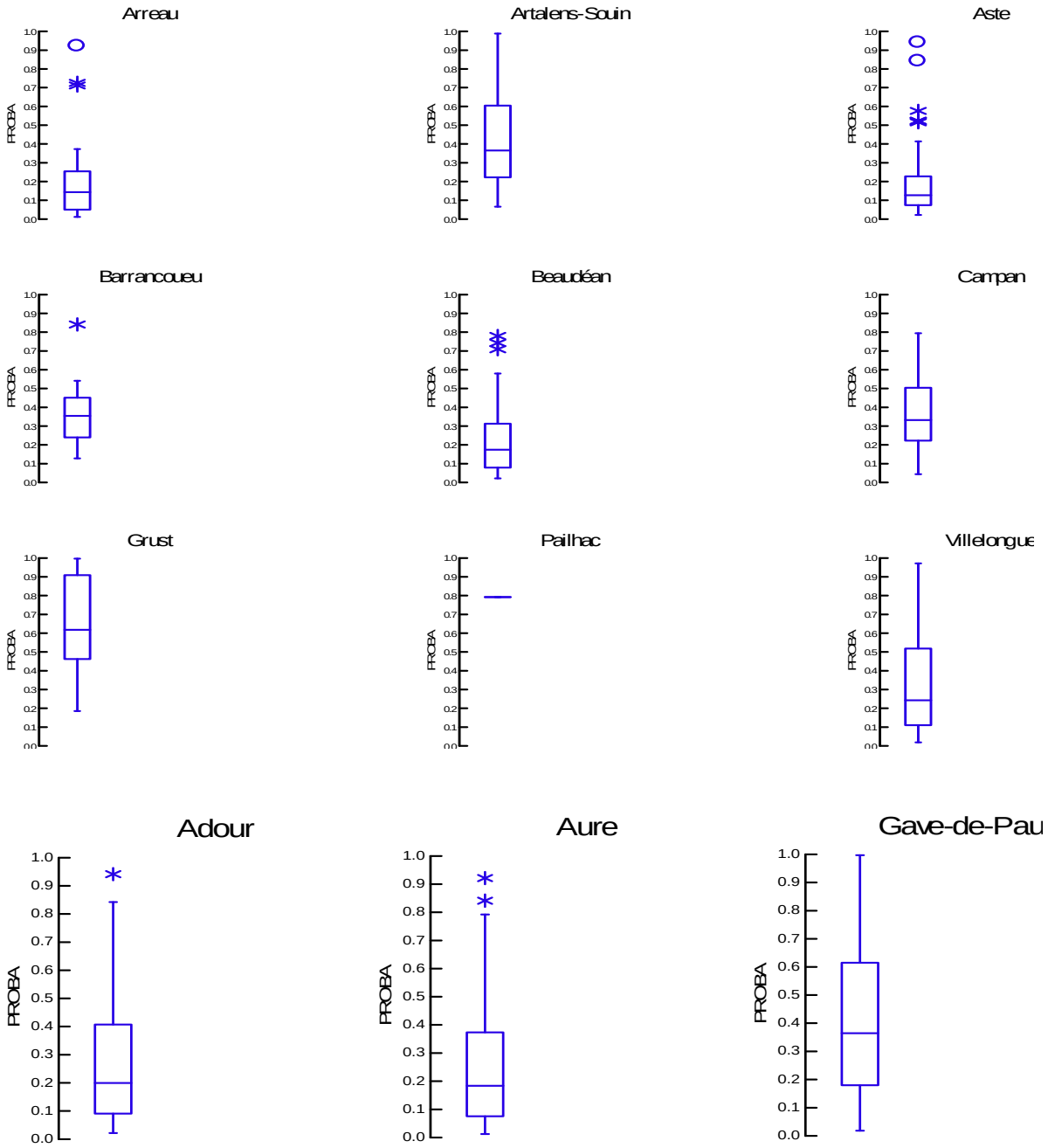


Figure 10 : Distribution des probabilités de présence d'accrus dans les 9 communes et les 3 vallées. La commune de Pailhac ne contient qu'une seule maille.

L'effet « commune » brut est également très significatif ($p<0.000$). Si l'on élimine la pente, l'effet commune reste très significatif ($p<0.000$) ce qui montre que la variabilité intra commune de la pente est comparable d'une commune à l'autre. Par contre, si l'on élimine l'effet de altitude l'effet n'est plus significatif ($p=0.179$). Ce sont donc les différences d'altitude qui expliquent les différences entre communes. La commune de Grust est de loin celle qui est située le plus en altitude et qui présente aussi le plus d'accrus observés (1/3 de la surface des mailles contre 5 à 15% dans les autres communes). L'absence de différence une fois l'effet de l'altitude éliminé

montre que les dynamiques locale des activités agricoles ne sont pas suffisamment différentes d'une commune à l'autre pour induire des différences dans la dynamique des accrus du moins au sein de notre échantillon de communes.

3.3. DISCUSSION

3.3.1. LE ROLE PREPONDERANT DES VARIABLES GEOMORPHOLOGIQUES

Quel que soit le type d'analyse utilisé depuis les statistiques exploratoires de base (khi^2 ou ANOVA) jusqu'aux analyses de classification supervisée comme les arbres de régression, l'importance de la pente et de l'altitude dans l'explication de la présence/absence ou de l'abondance du frêne est un résultat transversal.

D'un coté, rien d'étonnant à cela. Nous sommes en montagne où la pente et l'altitude sont deux descripteurs majeurs des conditions locales. Mais il convient de s'interroger sur la nature réelle de l'influence de ces deux variables. Le frêne préfère-t-il vraiment les zones pentues de préférence pour des raisons mécaniques ou autres? Le frêne préfère-t-il les altitudes élevées pour des raisons climatiques qui le rapprocheraient de son optimum ? Lescourret & Génard (1994) ont bien montré par exemple que l'altitude était en réalité un facteur thermique. Qu'en est-il de la pente et de l'altitude pour les accrus de frêne ?

Concernant la pente il n'y a pas de référence dans la littérature qui tendrait à montrer que le frêne « préfère » les zones pentues. Les connaissances sur les exigences du frêne en matière de station forestière tendraient à prouver que le frêne préfère plutôt les parcelles de faible pente avec des sols profonds et une réserve en eau importante. Le développement des accrus de frêne étant lié au niveau de la parcelle à des pratiques de gestion agricoles particulières (pâturage en dessous d'un seuil ou abandon du pâturage), la pente peut être considérée ici très comme un indicateur indirect de ces changements de pratiques. L'arbre de régression concernant le % d'accrus dans les mailles donne comme première dichotomie très significative une pente de 34.5%. En dessous les accrus sont peu présents et au dessus de cette valeur seuil ils sont abondants. Or comme nous l'avons déjà signalé, cette valeur de 34% correspond au seuil qui sépare les terrains mécanisables de ceux qui ne le sont pas (sauf avec du matériel spécialisé). Ceci est confirmé par les résultats de l'arbre de régression concernant la présence/absence où la première dichotomie consiste en un seuil de pente de 14,5% mais la probabilité de présence d'accrus prédite est inférieure à 0.5. Les fortes valeurs (probabilité de prédiction > 0.8) ne se rencontrent que pour des pentes supérieures à 27.5%. En dessous de ces seuils peu ou pas d'accrus sont présents. La pente est donc un révélateur de conditions topographiques qui favorisent la mise en place de pratiques de gestion des prairies qui elles-mêmes favorisent l'installation du frêne.

La pente semble également être une variable discriminante pour les différents types d'accrus. Les perchis se situent sur des pentes plus fortes, alors que les prairies de stade 1 et de stade 2 se trouvent généralement sur des pentes moins fortes. La pente est donc ici un révélateur de l'âge des accrus et de

l'ancienneté de leur installation. Sur les parcelles les plus pentues abandonnées en premier se trouvent les accrus les plus anciens, alors que sur les parcelles de pente moindre abandonnées plus récemment se trouvent les prairies en voie de colonisation.

Concernant l'altitude, le frêne est présent dans les paysages traditionnels sur toute la gamme d'altitude étudiée entre 400 et 1500m. Mais le frêne se trouve également en plaine où son potentiel de croissance s'exprime pleinement. Il n'est donc pas possible de valider l'hypothèse selon laquelle le frêne préfèrerait les parties les plus hautes de la zone étudiée. La présence majoritairement des accrus de frêne dans les zones les plus hautes reflète là aussi l'évolution des modes de gestion des parcelles au sein des exploitations. Il est probable, mais cela resterait à démontrer de manière statistique, que les parcelles les plus hautes sont aussi les plus éloignées des sièges des exploitations et donc celles qui sont laissées à l'abandon en premier. C'est comme cela que nous interprétons le seuil d'altitude d'environ 1000m mis en évidence dans l'arbre de régression concernant la présence/absence. Il semblerait en effet que ce seuil sépare les terroirs de fond de vallée où l'expansion du frêne est contrôlée par des pratiques intensives sur les terres les plus favorables des exploitations agricoles, des terroirs de grange dont beaucoup ont été « colonisés » par des résidences secondaires et où les pratiques de gestion beaucoup plus extensives (quand il ne s'agit pas d'abandon) sont beaucoup plus favorables au développement des accrus.

Comme la pente et l'altitude sont significativement corrélées dans notre échantillon (r^2=0.425, p<0.000) ces deux variables sont donc des indicateurs indirects de l'organisation spatiale des exploitations agricoles, et de leur dynamique qui conduit à abandonner les parcelles les moins favorables de l'exploitation (Mottet et al. 2006).

3.3.2. LES PRAIRIES ET LEUR GESTION

Le rôle des pratiques de gestion des prairies a clairement été mis en évidence dans le cadre de recherches antérieures (Julien et al. 2006). C'est pourquoi nous avons noté dans la présente étude non seulement l'abondance des différents types de prairies fauchées et pâturées mais aussi une estimation visuelle de l'intensité de leur gestion (très, moyennement et très peu pâturé). Au fil des différentes analyses, ces différentes variables sont significatives, même si en général elles le sont moins que la pente et l'altitude. La présence de prairies intensément pâturée est négativement corrélée à la présence de frêne. Dans la régression logistique, la présence de prairies pâturées et de prairies abandonnées sont respectivement négativement et positivement corrélées à la présence d'accrus. Ces résultats confirment bien ceux obtenus précédemment et vont dans le même sens que ceux exposés dans plusieurs travaux récents (Garcia-Robledo & Murcia. 2005 ; Van Uytvanck et al. 2008).

3.3.3. LES AUTRES VARIABLES

L'exposition discrétisée en 8 secteurs de 45° reflète l'organisation ancienne des terroirs avec la grande majorité des mailles situées sur des soulanes cultives, fauchées et pâturées exposées

plutôt aux secteurs sud et ouest. Il y a peu de mailles en secteur nord car traditionnellement ces expositions en ombrée sont le domaine de la forêt de hêtre et de sapin.

Les éléments particuliers du paysage situés dans les mailles se sont révélés peu informatifs. Nous pensions que la présence de grange autour desquelles se trouve toujours un petit nombre de vieux frênes pourrait avoir un lien avec la présence d'accrus en constituant une source de dispersion potentiel. Or nous n'avons pu mettre en évidence aucune relation nette entre la présence de ces éléments et celle d'accrus de frêne (si l'on excepte l'arbre de régression présence/absence où elles apparaissent à des niveaux assez bas de la hiérarchie). Peut-être est-ce la manifestation, sous une autre forme du résultat obtenu par Marie-Pierre Julien dans sa thèse (2006)) qui a montré, sur la commune de Villelongue, que l'effet du paysage sur la colonisation du frêne était négligeable comparé aux pratiques de gestion à la parcelle. Il pourrait être intéressant à l'avenir de décrire le contexte paysager des mailles en inventoriant ces éléments du paysage dans des buffers concentriques de rayon croissant afin de mettre éventuellement en évidence leur effet à d'autres échelles. Enfin, une description de la mosaïque paysagère (diversité des habitats, indices d'hétérogénéité, fragmentation des habitats) dans ces mêmes buffers pourrait s'avérer très intéressante. Cette analyse n'a pu être mise en œuvre dans le cadre de cette thèse.

3.3.4 . COMPARAISONS DES RESULTATS OBTENUS AVEC LES DIFFERENTES METHODES

Dans le tableau 14 nous avons reporté la liste des variables sélectionnés par les différentes méthodes utilisées. Nous constatons des différences entre les méthodes même si certaines variables sont sélectionnées par toutes ces méthodes.

Tableau 14 : Bilan des valeurs explicatives des variables sélectionnées pour chacun des 3 modèles utilisés.

Variables explicatives	Arbre de régression 0/1	Arbre de régression %	Stepwise GLM à partir du modèle 1
Pente	+	+	+
Altitude	+		+
Exposition	-	-	
% Bois	-	-	-
% Prairie pâturée	-	-	-
Éléments artificiels		-	
Grange	-		
Haie/alignement	-		
Prairie en voie d'abandon (P3)	+		+
Prairie intensément pâturée (P1)			-

La pente qui est positivement corrélée avec la présence et l'abondance des accrus est sélectionnée par les 3 méthodes. Il en de même pour le % de bois et de prairies dont les abondances sont inversement corrélées à la présence et à l'abondance des accrus. Comme nous l'avons dit plus haut, il est normal que les variables d'occupation du sol soit inversement corrélées aux accrus dans la mesure où ces variables ne sont pas indépendantes car en « concurrence » pour le remplissage de la maille. Aussi ce résultat est peu significatif en termes de causalité et de compréhension du processus de développement des accrus.

Les variables de contexte paysager, grange et alignement, sont sélectionnées par l'arbre de régression en présence/absence alors que la présence d'éléments artificiels est sélectionnée par l'arbre de régression en abondance. Les trois sont négativement corrélées avec la présence d'accrus ce qui localise les accrus dans des mailles où il n'y a pas ou eu de traces d'infrastructures humaines.

Enfin, les variables liées à l'intensité de gestion des prairies, en dépit de leur rôle essentiel au niveau de l'installation du frêne dans les parcelles ne sont pas systématiquement sélectionnées.

Il ressort de la comparaison des variables sélectionnées par les trois méthodes que la plus efficace sur la plan statistique (le modèle logistique Stepwise issu du modèle général) est aussi celle qui est la plus pertinente sur le plan écologique. Ce modèle prend en compte la pente et l'altitude ainsi que deux variables d'intensité d'utilisation des prairies. Malgré cela sa qualité prédictive reste très moyenne. L'AUC qui mesure sa qualité est de 0.75 ce qui classe le modèle dans la catégorie « moyenne ». La figure 11 représente d'une façon complémentaire aux boîtes à moustache présentées dans la partie résultats, la qualité de discrimination des accrus par le modèle logistique. En rouge est représenté l'histogramme flou de la prédiction des absences de frêne, en bleu de la prédiction de la présence de frêne. Il est clair que l'absence de frêne est beaucoup mieux prédite que sa présence. L'histogramme bleu des présences s'étale en effet le long de l'ensemble des probabilités même si la majorité des présences sont discriminées des absences. La zone de chevauchement des deux histogrammes restant importante. La spatialisation des probabilités de prédiction du modèle est donc à considérer avec précaution.

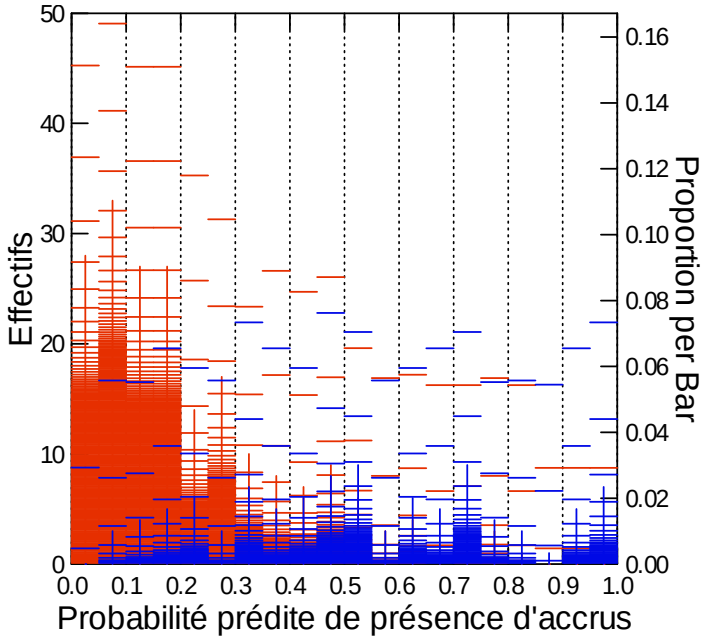


Figure 11 : Histogramme de distribution des probabilités de présence (bleu) et d'absence (rouge) d'accrus de frênes.

3.3.5. CONCLUSION

Ce travail exploratoire sur l'importance et les causes de la distribution spatiale des accrus de frêne a donné des résultats intéressants sans toutefois nous permettre de modéliser cette distribution de façon très performante.

Le processus de colonisation est un phénomène complexe qui fait intervenir des variables de nature différente (liées au milieu, liées à la gestion, liées à l'histoire des systèmes pastoraux locaux). Notre approche était orientée « terrain » sur une maille de taille réduite sans prendre en compte le contexte paysager et l'histoire des mailles qui étaient hors d'atteinte pour nous dans le cadre de ce travail.

Toutes les méthodes de modélisation utilisées, celles présentées ici, convergent plus ou moins vers le même type de résultat qui met en évidence le rôle de trois variables : la pente, l'altitude, et le pourcentage de prairies pâturées. La qualité de tous ces modèles (du moins de ceux pour lesquels on peut l'évaluer) est moyenne. La probabilité de bien prédire est de l'ordre de 0,75.

Le processus est général sur l'ensemble des communes et des vallées explorées même s'il existe des différences pour l'essentiel liées aux différences altitudinales et pas aux dynamiques locales des activités agricoles qui semblent comparables. La vallée du Gave de Pau semble toutefois un peu plus touchée par le phénomène peut-être en raison du développement important des activités touristiques qui se fait au détriment du maintien des activités agricoles.

3.3.6. RECOMMANDATIONS ET PROPOSITIONS

Pour aller plus loin dans la compréhension et la hiérarchie des facteurs qui contrôlent le processus de développement des accrus, il faudrait :

- Des descriptions fines de la localisation et des fonctions des parcelles dans les exploitations car c'est en fonction de ce type de contraintes qu'un agriculteur décidera d'abandonner ou de gérer plus extensivement telle ou telle parcelle. Si autrefois, la connaissance de la localisation d'une parcelle dans les terroirs communaux pouvait suffire à prédire son type d'utilisation, aujourd'hui les décisions quant à l'utilisation des parcelles dépendent des décisions individuelles de chaque agriculteur. Ceci favorise les processus d'enfrichement comme cela a été montré dans les Pyrénées ariégeoises et Haut-Garonnaises (Balent & Magda 1994 ; Balent & Gibon 1999 ; Gibon et al ; 2004). Mais ce type de travail qui demande des enquêtes détaillées de l'histoire et de la structure spatiale des exploitations (Mottet et al. 2007) est si énorme qu'il était hors de question de s'y lancer dans le cadre de ce travail dont le centre de gravité se situe davantage sur la compréhension des mécanismes et des facteurs de contrôle de la croissance de ces accrus de frêne une fois installés dans une parcelle.
- Décrire les caractéristiques des paysages environnant les mailles. La déprise agricole entraîne une augmentation de l'hétérogénéité dans l'usage des parcelles d'un même terroir. A caractéristiques égales, il serait important de savoir si les mailles alentour présentent les mêmes caractéristiques que la maille étudiée ou bien si celle-ci est très différente de ses voisines. Cette approche peut en grande partie être mise en œuvre dans un futur proche à partir de photographies aériennes et d'images haute-résolution.
- Les données recueillies constituent également en l'état une base de données de terrain qui permettra de disposer des nombreuses vérités-terrain nécessaires pour valider les résultats des approches indirectes qui pourront être mises en œuvre avec de nouveaux capteurs.
- Enfin, un retour sur les méthodes d'analyse de données ne serait peut-être pas inutile pour évaluer le poids éventuel des auto-corrélations qui pourraient exister entre des mailles proches (auto-corrélations spatiales) mais aussi et entre les variables récoltées au sein d'une même maille (par exemple les différents modes d'occupation du sol).

Au-delà de son objectif premier, modéliser la dynamique de colonisation des prairies par le frêne, le travail réalisé par l'ampleur des gradients explorés, par la constitution d'une base de donnée spatialisée combinant des observations visuelles, des photographies au sol et des photographies aériennes peut constituer état des lieux fort utile pour suivre l'évolution future de la distribution des accrus face au changement global dans sa composante changement d'utilisation des terres et changement climatique (Vitasse et al., 2009a,b).

4. BILAN ET PERSPECTIVES

Les deux pistes utilisées pour repérer, comprendre et prédire la répartition des accrus de frêne dans les Hautres- Pyrénées ont montré des limites méthodologiques qui n'ont pas permis

d'aboutir à des résultats performants. On a toutefois avancé dans la connaissance des facteurs explicatifs de base de leur répartition spatiale à l'échelle du paysage, ce qui devrait permettre de faciliter leur détection sur photo aérienne en la ciblant davantage. Pour la prédiction, il reste surtout à affiner un modèle probabiliste de *la présence* des accrus, en prenant en compte un contexte paysager plus large et une épaisseur historique suffisante.

Une validation des prédictions sur un site hors échantillon permetterait alors d'évaluer le degré de la généralité des résultats obtenus.

Bibliographie

Balent, G. & Duru, M., 1984. Influence des modes d'exploitation sur les caractéristiques et l'évolution des surfaces pastorales: cas des Pyrénées centrales. Agronomie 4, 113-124.

Balent, G. & Barrué-Pastor, M., 1986. Pratiques pastorales et stratégies foncières dans le processus de déprise de l'élevage montagnard en vallée d'Oô (Pyrénées centrales). Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest 57, 403-447.

Balent,G., 1991. Construction of a reference frame for studying the changes in species composition in grassland. Options Méditerranéennes 15, 73-81.

Balent,G. & Magda,D., 1994. Co-evolution of grassland biodiversity and farm management. Grassland and Society (eds L't Mannetje & J. Frame), 278-281.

Balent,G. & Gibon,A., 1999. Organisation collective et individuelle dans la gestion des ressources pastorales: conséquences sur la durabilité agro-écologique des ressources. Options Méditerranéennes, 27, 267-277.

Boureau, J.G. ; Deshayes, M., 1999. Méthodes d'inventaire et de cartographie des accrus forestiers Ingénieries Eau- Agriculture- Territoires, 151-161.

Cleve, C.; Kelly, M.; Kearns F.R.; Moritz, M., 2008. Classification of the wildland-urban interface : A comparison of pixel-and object-based classifications using high-resolution aerial photography. Computers, environment and urban systems 32, 317-326.

Cohen, M. ; Alexandre, F. ; Mering, C., 1999. Boisement naturel et embrousaillement sur le causse Méjean: intérêt d'une approche croisée entre sciences de la nature et sciences sociales. Ingénieries Eau- Agriculture- Territoires, 91-104.

Curt, T. ; Brochiero, F. ; Prevosto B. , 1998. Boisement naturel des terres agricoles en déprise. Travaux préparatoires à la définition d'un programme de recherche du Groupement d'Intérêt Public « Ecosystèmes Forestiers » (GIP ECOFOR). Rapport Cemagref, 150p.

Curt, T. ; Prévosto, B. ; Bergonzini, J.C., 2004. Boisements naturels des terres agricoles en déprise. Editions du Cemagref, Collection GIP ECOFOR « écosystèmes forestiers » n°2, 119 p.

Dérioz, P. 1999. Comment quantifier le phénomène du boisement spontané : inventaire des inventaires à l'échelle nationale. Ingénieries Eau- Agriculture- Territoires, 11-23.

Douard, P. ; Houles, M. ; Luneau, G., 2005. Identification d'îlots de frênes purs à partir d'images satellitales SPOT 5 dans les Hautes-Pyrénées. Projet de master 2 professionnel SIGMA, 35 p.

Franklin J., 1998.. Predicting the distribution of shrub species in southern California from climate and terrain derived variables. Journal of Vegetation Science 9, 733-748.

Garcia-Robledo, C.A. & Murcia, C., 2005. Comparative habitat susceptibility to invasion by Chinese ash (Fraxinus chinensis: Oleaceae) in a tropical Andean landscape. Biological Invasions 7, 405-415.

Gibon,A., Balent,G., Alard,D., Ladet,S., Mottet,A. & Julien,M.P., 2004. L'usage de l'espace par les exploitations d'élevage de montagne et la gestion de la biodiversité. Fourrages 178, 245-263.

Girard, M.C. ; Girard, C.M., 1999. Traitement des données en télédétection. Collection Technique et Ingénierie, Edition Dunod, Paris, 552 p.

Hanley J.A. & McNeil B.J., 1982.. The meaning and use of the area under a Receiver Operating Characteristic (ROC) curve. Radiology 143, 29-36.

Harrell F E., 2000. Regression Modeling Strategies, New York: Springer.

Iverson L.R., Prasad A., 1998. Predicting abundance for 80 tree species following climate change in the Eastern United States. Ecological Monographs 68, 465-485.

Julien, M.P., 2006. Processus de colonisation des prairies permanentes par le frêne (*Fraxinus excelsior* L.) et conséquences sur la biodiversité. Le cas de la zone périphérique du Parc National des Pyrénées. Thèse de Doctorat en Ecologie. Université Paul Sabatier-Toulouse III, 254 p.

Julien, M.P.; Alard, D.; Balent, G., 2006. Patterns of ash (*Fraxinus excelsior* L.) colonization in mountain grasslands: the importance of management practices. Plant Ecology 183, 177-189.

Lennon, M., 2002. Méthodes d'analyse d'images hyperspectrales. Exploitation du capteur aéroporté CASI pour des applications de cartographie agro-environnementale en Bretagne. Thèse de ENST-Bretagne, Brest, 359 p.

Lescourret,F. & Génard,M., 1994. Habitat, landscape and bird composition in mountain forest fragments. Journal of Environmental Management 40, 317-328.

Liège, F, 1997. Gestion de l'espace par analyse multisources de l'information géographique, Thèse de doctorat de géographie, Université de Paris IV, Sorbonne, 370 p.

MacFarlane, D. W., Patterson Meyer S., 2005. Characteristics and distribution of potential ash tree hosts for emerald ash borer. Forest Ecology and Management 213, pp. 15-24.

Manel S., Dias J.M. & Ormerod S.J., 1999. Comparing discriminant analysis, neural networks and logistic regression for predicting species distributions: a case study with a Himalayan river bird. Ecological Modelling 120, 337-347.

Mottet, A., 2005. Transformations des systèmes d'élevage depuis 1950 et conséquences pour la dynamique des paysages dans les Pyrénées. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 274 p.

Mottet, A.; Julien, M.P.; Balent, G.; Gibon, A., 2007. Agricultural land use and ash tree colonisation in Pyrenean landscapes: an interdisciplinary case study. Environmental Modeling and Assessment, 12, 293-302.

Pontius, J.; Martin, M.; Plourde, L.; Hallett, R., 2008. Ash decline assessment in emerald ash borer-infested regions: A test of tree-level, hyperspectral technologies. Remote Sensing of Environment 112, 2665-2676.

Prévosto, B., 1999. Analyse fonctionnelle des boisements spontanés et modélisation de leur développement. Application aux peuplements de Betula pendula (Roth.) et Pinus sylvestris (L.) en moyenne montagne volcanique (la chaîne des Puys, Massif Central). Thèse, Aix-Marseille III. 198 p.

Prodon R., 1976. Le substrat, facteur écologique et éthologique de la vie en eau courante : observations et expériences sur les larves de Micropterna testacea et Cordulegaster annulatus. Thèse de 3ème cycle, Université de Lyon 1.

Rey, P. ; Izard, M., 1967. Notions pratiques de photo-interprétation. Editeur CNRS, Paris, 62 p.

Rouget M., Richardson D.M., Lavorel S., Vayreda J., Gracia C., Milton S.J., 2001. Determinants of distribution of six Pinus species in Catalonia, Spain. Journal of Vegetation Science 12, 491¬502.

Swets K.A. ,1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. Science, 240, 1285-1293

Taffé, P., 2004. Cours de régression logistique appliqué. Institut Universitaire de Médecine Sociale et Préventive (IUMSP) et Centre d'épidémiologie Clinique (CepiC), Lausanne, Suisse.

Thiebaut, L., 2007. "De la racine à la dernière feuille"/ Utilisation et représentation du frêne dans une commune des Hautes-Pyrénées: quand humains et frênes se rencontrent. Mémoire de master en anthropologie, Université de Neuchâtel, 143 p.

Valdenaire, J.M., 1999. Synthèse : les outils pour la gestion des boisements spontanés. Ingénieries Eau- Agriculture- Territoires, 173-174.

Van Uytvanck, J., Decleer, K. & Hoffmann, M., 2008. Establishment patterns of woody species in low intensity-grazed pastures after the cessation of intensive agricultural use. Forest Ecology and Management 256, 106-113.

Vayssières M.P., Plant R.E., Allen-Diaz B.H., 2000. Classification trees: alternative non¬parametric approach for predicting species distributions. Journal of Vegetation Science 11, 679¬694.

Vitasse,Y., Delzon,S., Dufrene,E., Pontailler,J.Y., Louvet,J.M., Kremer,A. & Michalet,R., 2009a. Leaf phenology sensitivity to temperature in European trees: Do within-species populations exhibit similar responses? Agricultural and Forest Meteorology 149, 735-744.

Vitasse,Y., Delzon,S., Bresson,C.C., Michalet,R. & Kremer,A., 2009b. Altitudinal differentiation in growth and phenology among populations of temperate-zone tree species growing in a common garden. Revue Canadienne de Recherche Forestiere 39, 1259-1269.

Xiao, Q.; Ustin, S. L.; McPherson, E. G., 2004. Using AVIRIS data and multiple-masking techniques to map urban forest tree species. International Journal of Remote Sensing 25, 5637 – 5654.

Zweig M.H. & Campbell G., 1993. Receiver-Operating Characteristic (ROC) plots: a fundamental evaluation tool in clinical medicine. Clinical Chemistry 39, 561-577.

CHAPITRE 2 : CROISSANCE - NUTRITION MINÉRALE

1. INTRODUCTION :

La préférence du frêne sur les sols riches en éléments minéraux est souvent rappelée dans la littérature (Faure *et al.*, 1975; Poulain, 2000 ; Armand & Courrivault 2003 ; Kerr & Cahalan 2004). La bibliographie montre des relations différentes d'un site à l'autre entre la croissance en hauteur du frêne et la nutrition minérale mais l'azote semble être le facteur le plus limitant de la croissance du frêne dans plusieurs études (Gordon, 1964) ; le manque d'autres éléments comme le potassium et le phosphore est parfois aussi mis en avant (Joyce, 1998). Il était donc important d'étudier cette relation dans nos sites et de vérifier l'existence ou l'absence de ces corrélations.

Ce chapitre étudie donc la variabilité de la croissance en hauteur des accrus de frêne et tente d'identifier les causes de cette variabilité. Parmi ces causes, la nutrition minérale des arbres dont l'approche est facilitée par les techniques d'analyse foliaire a été plus particulièrement étudiée. Une partie de ce travail a fait l'objet d'un article scientifique soumis en août 2009 à la revue New Forests. Pour cette raison, on a conservé dans ce chapitre la numérotation spécifique des figures, tableaux et équations propre à cet article, en les citant suivis du numéro du paragraphe correspondant (ex. Figure 3 du §3.1) lorsqu'on les cite en dehors de ce paragraphe. D'autre part, les parcelles étudiées nommées : S1, S2, S3, S4, S5 et S6 dans l'article correspondent respectivement aux parcelles : M2, Pr1, B6, B10, A3 et A4.

Avant de présenter cet article qui est la partie centrale de ce chapitre, on examine les démarches et méthodes suivies, les choix faits et les hypothèses de ce travail. Des données complémentaires secondaires sont ensuite présentées à titre informatif et donc non-discutées. Elles concernent quelques caractéristiques des peuplements comme la biomasse ligneuse, la relation croissance-nutrition minérale du frêne et relient la disponibilité du sol en éléments nutritifs aux teneurs foliaires.

2. MATERIEL ET METHODES :

2.1. CARACTERISTIQUES DES PEUPLEMENTS ETUDIES :

Les principales caractéristiques statiques de la structure des peuplements sont présentées dans la publication jointe à ce chapitre (Tableau 2). Nous en avons ajouté deux autres qui correspondent à une description plus synthétique encore : la biomasse ligneuse et la surface terrière (Tableau 4).

Les modèles de production en biomasse ligneuse du frêne, permettant de traduire des caractéristiques dendrométriques simples en biomasse sur pied, tant à l'échelle de l'arbre qu'à

celle du peuplement (Zianis *et al.*, 2005), sont rares L'estimation de la biomasse ligneuse a donc dû être faite sur place par pesées. Pour cela, 20 à 25 arbres par parcelle (B6, M2 et Pr1), qui représentent les différentes classes de diamètres rencontrées sur chacune des parcelles (voir annexe 1) ont été coupés pendant l'hiver. La tige et le houppier de chacun de ces arbres ont d'abord été pesés à l'état frais (± 10 g) sur place. Des rondelles-échantillons ont été prises sur 5 des 25 arbres pour estimer une teneur moyenne en matière sèche après séchage à 110°C jusqu'à poids constant. Le poids de matière sèche par arbre a été estimé en multipliant son poids frais par ce taux moyen de matière sèche. La relation entre la biomasse de l'arbre (W) et son dbh a été ajustée à l'aide du modèle non-linéaire suivant :

$$W = w0 + a\ DBH^b \quad [1]$$

Où w0, a et b sont des paramètres estimés par la fonction « nls » de la plateforme logicielle R (R Development Core Team, 2008).

La biomasse ligneuse aérienne de chaque peuplement a été estimée à partir du modèle ci-dessus et des dbh des arbres, par la somme des biomasses de tous les arbres du peuplement (Auclair & Metayer, 1980).

La surface terrière est le rapport de la somme des sections des arbres à 1,30 m à la surface de sol occupée par ces arbres. Elle est donc sensible à la fois au nombre d'arbres et à leur grosseur, et peut de ce fait à la fois permettre un calcul approximatif du volume sur pied du peuplement (CRPF Provence Alpes Côte d'Azur, 2009), et indiquer la nécessité de l'éclaircir, lorsque ce volume rapporté au nombre d'arbres devient trop faible.

2. 2. CROISSANCE EN HAUTEUR

L'évolution dans le temps de la moyenne de la hauteur des arbres dominants, qui représente la « hauteur dominante » du peuplement, est fortement pilotée par les conditions stationnelles, dénommées alors « fertilité ». Ainsi, le niveau de ces conditions peut être caractérisé par *la hauteur dominante du peuplement à un âge donné*. Ce critère constitue ainsi à la fois un descripteur de niveau de croissance et un indicateur stationnel, le « site index » anglosaxon (Goelz & Burk, 1992; Thibaut *et al.*, 2002). Il est dès lors possible d'utiliser cet indice pour comparer des peuplements de compositions spécifiques analogues et d'âges différents dans une région donnée, afin d'estimer leurs potentialités de croissance dans le type de milieu qu'ils occupent : cet indice de comparaison pourra être, par exemple, la hauteur du peuplement estimée à l'âge de 50 ans, qui sera évaluée par modélisation de la relation hauteur / âge à partir de la hauteur et de l'âge actuels.

Modélisation :

Pour une espèce donnée, l'évolution dans le temps des allongements annuels d'arbres issus de peuplements différents forme généralement des courbes individuelles d'égale fertilité disposées approximativement en « faisceau » (voir la figure 2 du §3.1). Cette disposition indique que le passage d'une courbe à une autre pour un âge donné se fait en appliquant à la hauteur un même coefficient de proportionnalité quel que soit l'âge considéré. La forme individuelle des courbes varie selon l'âge de départ, l'espèce et le milieu, mais elle est le plus souvent de type sigmoïde. Pour ajuster cette relation, plusieurs modèles sont utilisés, comme les modèles de Chapman-Richards, de Johnson Schumacher, de Gompertz (Debouche C., 1979; Bentouati *et al.*, 2005). Ces modèles se basent le plus souvent sur l'estimation de la croissance maximum à l'aide d'une asymptote horizontale, et sur l'estimation d'un point d'inflexion situé à une hauteur correspondant à une proportion fixe de la hauteur maximum. Ils nécessitent l'estimation de 3 à 5 paramètres. On a ainsi testé l'un des plus simples modèles de ce type, le modèle de Gompertz (équation [2]), dont le petit nombre de paramètres à estimer (3) est compatible avec la petitesse de notre échantillon (9 arbres) :

$$H = k_1 \bullet e^{-e^{\{-k_2 \bullet (A - k_3)\}}} \qquad [2]$$

avec H = hauteur, A = âge, e base des logarithmes naturels, k_1, k_2 et k_3 = paramètres à estimer.

Malheureusement, ce modèle, appliqué à de jeunes peuplements, réalise une très mauvaise estimation de l'asymptote, car son estimation nécessite de disposer de hauteurs à des âges élevés. Pour cette raison, nous avons opté finalement pour un autre type de modèles, la « fonction transcendantale » (Nanang & Nunifu, 1999, équation [3]), dont le nombre de paramètres peut se réduire à deux, et qui permet de remplacer l'estimation individuelle de la hauteur maximum par la possibilité de fixer l'âge auquel est atteint ce maximum.

$$H = k_1 \bullet A^{\{-k_2 \bullet A_m\}} \bullet e^{\{k_2 \bullet A\}} \qquad [3]$$

avec H = hauteur, A = âge, e base des logarithmes naturels, Am = âge pour la hauteur maximum, k1 et k2 = paramètres à estimer.

2. 3. NUTRITION MINERALE

Feuilles matures

L'étude de la nutrition minérale a été faite au niveau des feuilles car la feuille est considérée comme l'organe le plus révélateur des relations entre l'alimentation de la plante et sa croissance (Bonneau, 1995). L'analyse foliaire est une technique facile à utiliser chez les végétaux. Elle nécessite simplement le prélèvement de feuilles matures appartenant au tiers supérieur du houppier, bien éclairées, à un stade correspondant à un arrêt de croissance, généralement l'été.

Il est donc nécessaire de normaliser la méthode de prélèvement, et nous avons suivi en ce sens les recommandations de Bonneau (1995).

Chez les arbres forestiers et les frênes, avec des hauteurs d'arbre de 15 à 25 m, les prélèvements foliaires dans le houppier sont réalisés à l'aide de tirs au fusil ou par grimpage (Garbaye, 1969). Dans notre cas, c'est le grimpage qui a été choisi. Le temps nécessaire au prélèvement d'un échantillon foliaire a été évalué à une heure par arbre. La difficulté du grimpage et le temps très important qu'il nécessite limitent l'intérêt de l'analyse foliaire sur des arbres adultes.

Le frêne ayant une feuille composée, avec un rachis et des folioles, la question de la fraction à analyser s'est posée. Pour être compatible avec les tables fournies par Bonneau (1995) pour les feuillus précieux, il nous a paru préférable d'analyser la fraction des folioles pour les échantillons de feuilles matures.

Les éléments analysés sont N, P, K, Ca, Mg. Les analyses ont été réalisées par le laboratoire URSAVE (Unité de Service et de Recherche en Analyses Végétales et Environnementales) du centre INRA de Bordeaux.

Feuilles sénescentes :

Les difficultés du grimpage et du prélèvement de feuilles matures ont orienté nos travaux vers la recherche d'une méthode de substitution potentielle, utilisée également ici en complément. L'analyse des feuilles sénescentes de la litière est capable de différencier des sites de fertilité différente (Caritat *et al.*, 1996). De plus, il est possible que la litière échantillonnée au niveau de la parcelle représente mieux le statut nutritif du site que quelques arbres dont on a analysé les feuilles matures. C'était donc aussi un moyen de vérifier les résultats trouvés au niveau des feuilles matures.

Pour cela, les feuilles sénescentes ont été récoltées, pesées et analysées au niveau de chaque parcelle.

Avant la chute des feuilles de 2007 (au début d'octobre), 9 filets de $1m^2$ ont été implantés dans une placette de 400 m^2 dans chaque parcelle. Ils étaient espacés de 3m et disposés généralement

en croix afin de couvrir de façon homogène et représentative les placettes. Le dispositif en croix, nous a permis de faire des récoltes dans le sens de la pente et dans le sens des courbes de niveaux (Figure 1). Ces filets ont été fixés sur des cordes tendues à travers la placette à environ 0.5 m du sol.

Les feuilles sénescentes ont été prélevées dans les filets et mises dans des sacs papier tous les 12-15 jours jusqu'à la fin de la chute des feuilles (fin novembre). Puis elles ont été triées afin de ne garder que les feuilles de frêne. Ces feuilles de frêne ont été ensuite séchées à 50°C pendant 62 heures avant d'être pesées. La biomasse foliaire de chaque parcelle est présentée dans le tableau 1.

Des sous-échantillons des feuilles sèches ont été pris pour séparer les folioles et les rachis et les peser afin d'estimer le pourcentage de poids des folioles par rapport au poids total des feuilles.

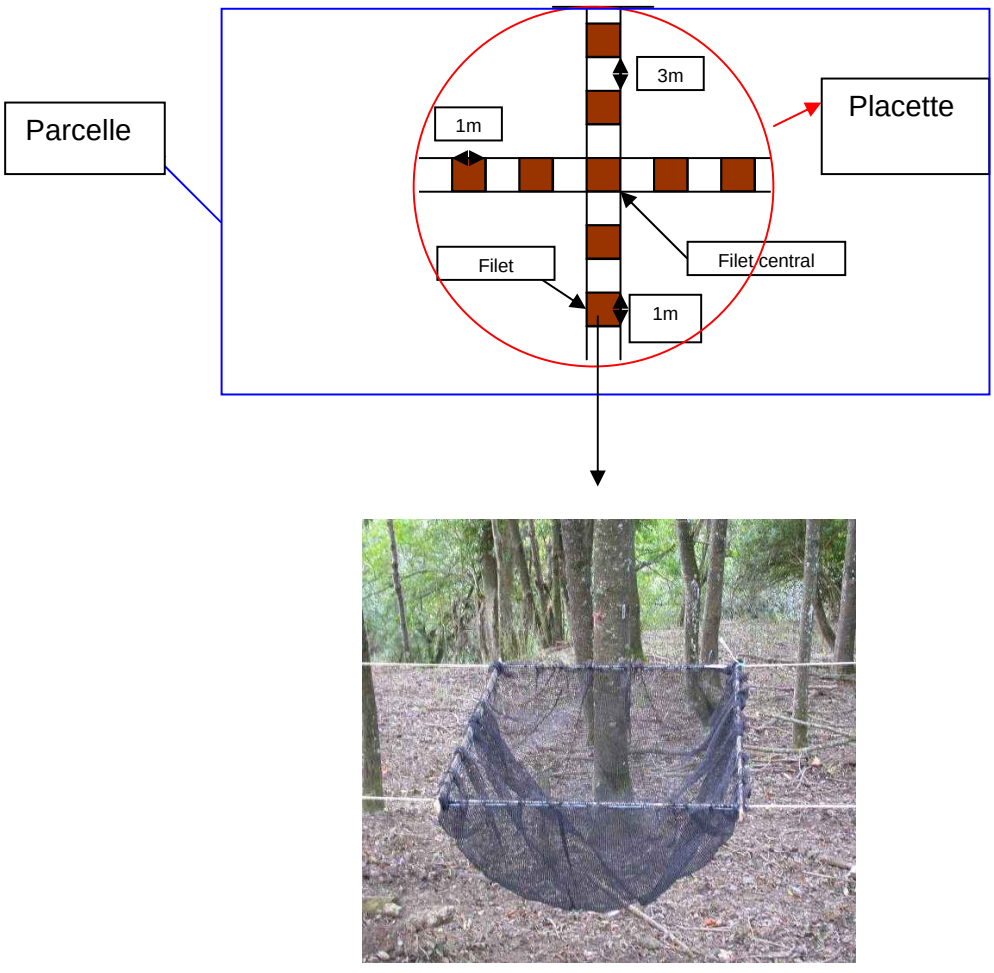


Figure 1 : En haut : Répartition des filets dans chaque parcelle. En bas : Exemple d'un filet collecteur des feuilles sénescentes.

Les analyses des éléments majeurs : N, P, K, Ca et Mg ont été réalisées sur les folioles sénescentes par le laboratoire URSAVE (Unité de Service et de Recherche en Analyses Végétales et Environnementales) du centre INRA de Bordeaux.

Les quantités d'éléments majeurs des folioles ont été estimées en multipliant les teneurs moyennes en élément minéraux par la biomasse foliaire de la parcelle.

2. 4. RELATION CROISSANCE- NUTRITION MINERALE

Pour la croissance en hauteur, le jeune âge de certaines parcelles ne nous permet pas d'utiliser la hauteur à un âge de référence avancé (40-50 ans) comme indice de croissance. L'indice de croissance qu'on a choisi d'utiliser est donc un indice de proportionnalité, issu de la modélisation par la fonction transcendantale, représentatif de l'évolution de la hauteur de chaque arbre étudié en fonction du temps (Ii). Cet indice repose sur l'hypothèse que tous les arbres d'un peuplement donné respectent le même modèle général de croissance (celui de la fonction transcendantale, avec les mêmes valeurs de paramètres) mais à un coefficient de proportionnalité près. Ceci permet d'utiliser les 18 arbres échantillonnés pour l'analyse foliaire dans tous les sites quel que soit leur âge (6 sites x 3 arbres).

La relation entre les valeurs de l'indice de croissance des arbres Ii et les valeurs des concentrations en éléments minéraux a été étudiée en utilisant le coefficient de corrélation de Spearman. Ce coefficient permet en effet de détecter des liaisons entre variables quantitatives, que ces liaisons soient ou non linéaires.

Les relations entre la croissance et la teneur en éléments minéraux ont été étudiées dans un modèle linéaire de régression multiple. Pour cela, on a comparé les valeurs explicatives de toutes les combinaisons linéaires possibles entre les concentrations des différents éléments minéraux utilisés.

2.5. ANALYSE DES RELATIONS NUTRITIONNELLES SOL - PLANTE

Pour compléter ce travail, on a étudié la cohérence des quantités des éléments minéraux entre le sol, les feuilles matures et les feuilles sénescentes. Quelques points ont été détaillés, notamment la relation croissance – azote et la relation croissance – type de sol.

Pour préciser la relation croissance – azote, on a évalué les relations entre l'azote foliaire et l'azote du sol. Pour l'azote, on sait que l'azote total du sol (principalement sous forme organique)

ne représente pas l'azote disponible pour la plante car la plante absorbe l'azote minéral du sol. La minéralisation dans les sols a été évaluée par différents moyens :

- par des photos de la litière de chaque parcelle afin d'estimer la vitesse de minéralisation à partir de la proportion d'espace occupé par la litière sur la photo;

- par le ratio C/N : Ce ratio est considéré comme un critère important de la disponibilité en N. Plus la valeur du C/ N est élevée, moins la minéralisation est rapide et moins l'azote est disponible (Gordon, 1964 ; Kerr & Cahalan, 2004).

- par des analyses chimiques de l'azote minéral (NO_3^- et NH_4^+) de l'horizon organique de chacune des 6 parcelles étudiées. Pour cela, un échantillon de cet horizon a été prélevé par parcelle. L'azote (NO_3 réduit en NO_2) a été déterminé par la méthode Griess et l'ammonium (NH_4) par la méthode Berthelot. L'azote minéral est la somme des deux.

Pour préciser l'influence du type de sol, la matrice des corrélations entre la croissance des arbres (par site, n = 6) et quelques paramètres du sol (pH, matière organique MO, CEC, taux de saturation BS) a été examinée. Quelques tendances concernant ces caractéristiques générales des sols ont été détaillées.

3. RESULTATS

3.1. ANALYSE DE LA VARIABILITE DE LA CROISSANCE EN HAUTEUR DES ACCRUS (PUBLICATION SOUMISE A NEW FORESTS)

ARE TREES COLONIZING ABANDONED GRASSLANDS LIKELY TO DEVELOP INTO VALUABLE FORESTS? FIRST RESULTS ON GROWTH CHARACTERISTICS OF ASH SPONTANEOUS FOREST STANDS IN THE PYRENEES NATIONAL PARK

O. Mdawar · A. Gavaland · G. Bertoni · G. Balent · A. Cabanettes

O. Mdawar · A. Gavaland · G. Balent · A. Cabanettes

Institut National de la Recherche Agronomique, UMR 1201 DYNAFOR, F–31326 Castanet–Tolosan, France.

(e–mail: alain.cabanettes@toulouse.inra.fr, fax: +33561285411, phone: +33561285410)

G. Bertoni

Institut National Polytechnique, Ecole Nationale Supérieure Agronomique, UMR 1201 DYNAFOR, F–31326 Castanet–Tolosan, France.

Abstract

Six ash stands issued from natural afforestation of former grasslands in the Pyrenees (elevation 700–1100 m a.s.l.) were investigated. Ash growth was assessed using dendrometric measurements. Height growth dynamics was characterized in three stands from stem analysis of dominant trees. The nutritional status of the trees was assessed through soil and leaf analysis.

Two height growth dynamics patterns were observed and related to site management. Initial ash development was either immediate or delayed by browsing for more than 10 years. Growth modelling required the use of a model fitted to age at 1.5 m height. The estimated height at 50 years, calculated from a growth index, was in the range 14 – 25 m, with differing site–dependant valorisation possibilities (from firewood to timber). Low P and K nutrition was observed in most stands. However, the growth differences between stands could not be accounted for in terms of macronutrient leaf concentrations. The possible involvement of other factors such as water availability and soil acidity was discussed. The validity of the method for site classification and dominant height prediction of small afforestation stands in the Pyrenees is discussed.

Key words: ash, mineral nutrition, natural afforestation, site index, tree growth

3.1.1. INTRODUCTION

In Western Europe, ash (*Fraxinus excelsior* L.) plantations are usually established on formerly cultivated fertile plots (McEvoy and McAdam 2008). To minimize tree competition, such plantations are often thinned after ten years to reach a final density of 40 – 70 stems/ha (Armand and Courrivault 2003). Fewer nutrient and water stress problems are then expected.

In contrast, in mountain areas such as the Pyrenees, ash natural afforestation occurs on grasslands with poor accessibility which are no longer grazed or mown (Bozon et al. 1994; Julien et al. 2006; Mottet et al. 2007). Ash rapidly colonizes these abandoned grasslands because of its high colonizing ability due to the presence of seed trees in hedge, to its high capacity of dispersion, to its high recovery capacity after mowing or grazing (Julien et al. 2006) and to the adaptation of juvenile trees to survival under cover (Wardle 1959; Tapper 1992).

In these new forest stands resulting of a colonization process, the variability in soil fertility due to management history of grasslands (Balent and Duru 1984), the grazing management of the colonized grasslands and the high tree density resulting from the total absence of silvicultural practices such as thinning, may influence ash growth.

As far as we know, no data are available on the growth characteristics of ashes in such environment. This is why scientific research is very much in demand from local stakeholders to provide biological references and tools to help them to manage these new forest stands. To answer this demand we decided to develop an in situ exploratory research on ash growth despite the harsh mountainous environment, the limited possibility of destructive measurements on trees on private stands and the difficulty to find a sufficient number of spontaneous forest patches large enough to settle a canonical experimental design.

In this particular context, the aims of our research are:

– to characterize the growth of ash in these newly afforested stands,

– to compare growth patterns between the different study sites and to consider the possible effect of nutritional limitations due to the management history of colonized grasslands.

3.1.2. MATERIALS AND METHODS

3.1.2.1. Study sites

Six pure ash stands (S1 to S6) issued from natural afforestation were selected in the "Département des Hautes–Pyrénées" (France). From West to East, these stands are located in three valleys, the Gave de Pau valley (S1, S2; 42°56' N, 0°01' W), the Adour valley (S3, S4; 43°01' N, 0°08' E) and the Aure valley (S5, S6; 42°54' N, 0°21' E). In each valley, two stands developed on former pastures of at least half an hectare and devoid of any adult tree before grazing

discontinuation were selected. Within each stand, the measurements were carried out on a 600 m^2 homogeneous plot, excluding any boundary effect.

The elevation was in the range 700–1100 m a.s.l. The slopes were between 25 and 40 % in sites S1, S3, S4 and S5, and in the range 50–55 % in sites S2 and S6. The annual rainfall and average temperature were in the range 900–1200 mm and 8–10 °C, respectively, using data from the nearest meteorological stations in Ayros–Arbouix, Campan–Artigues and Arreau–Bordères over the period 1954–2005. Monthly summer rainfall was commonly over 60 mm.

The parent rocks (shales or sandstony shales; Debroas and Souquet, 1976) gave rise to rather deep (>75 cm), acidic brown soils, with the exception of S2 (50 cm deep, wet peat soil). Gravels and stones amounted to 5–15 % in S2, S3, S4 and S5, 30 % in S6 and 60 % in S1. Soil parameters were measured according to standard methods (Table 1): soil pH in water extract (1:2.5 v/v), total N concentration by Kjeldahl method, organic C by Anne method, P by Olsen method, cation exchange capacity (CEC) at soil pH using the cobaltihexamine method (Orsini and Rémy 1976). Exchangeable cations are determined in the CEC extract using ICP–AES method. Base saturation was calculated as the ratio $(Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+})/(Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} + Al^{3+} + H^{+})$

Table 1: Main characteristics of the soils of the sites investigated: Values refer to soil (0 – 15 cm depth) unless otherwise specified. Subsoil values refer to 15 – 80 cm depth in S1, S2, S3 sites, and 15– 50 cm depth in S4, S5, S6 sites. “exch.” refers to the exchangeable cations in the CEC.

site	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Texture (sand/silt/clay, %)	22/47/31	34/34/32	13/46/41	10/58/32	46/37/17	42/34/24
Soil pH	4.9	5.1	4.7	5.3	5.1	4.8
Organic matter ($g.kg^{-1}$)	202	204	73	82	73	87
C/N	10.3	13.9	9	9.7	10.6	11.5
Total N ($g.kg^{-1}$)	11.4	8.5	4.7	4.9	4	4.4
CEC ($cmol+ kg^{-1}$)	21.1	21.1	5.1	7.8	9.2	6.1
Base saturation ratio (%)	94	96	61	91	95	82
Exch. Ca ($cmol+ kg^{-1}$)	19.7	19.6	2.8	7.2	7.1	2.5
Exch. Mg ($cmol+ kg^{-1}$)	1.93	0.88	0.62	0.90	1.48	0.55

Exch. K (cmol+ kg^{-1})	0.24	0.22	0.10	0.25	0.86	0.13
Exch. K [1] (cmol+ kg^{-1})	0.16	<0.02	0.04	0.06	0.21	0.04
Olsen P (mg kg^{-1})	14	5	8	9	30	12
Olsen P [1] (mg kg^{-1})	14	< 4	< 4	< 4	17	< 4

Superscript [1] refers to subsoil values.

3.1.2.2. Tree measurements

In each plot, the diameter at breast height of all the standing trees was measured (± 1 mm) at 1.3 m above the soil level (DBH). The height of the dominant trees (i.e. the largest tree every one hundred square meters) was assessed (± 0.1 m). The average of these heights constituted the "dominant height" of the plot.

For the determination of the average tree age, the diameter classes of the tree population were considered and basal wood cores were sampled on 9 trees per plot (Tab. 2).

Due to the destructive character (tree felling) of the stem analysis method, the sampling was limited to three stands (S1, S2 and S3) and to three dominant trees per stand. The rings were counted on wood disks cut out every 50 cm from trunk base to top to record height–age data pairs.

3.1.2.3. Modelling of the tree height–age relationship

Height–age data pairs from stem analysis of the 9 trees were used for growth modelling. As the browsing of young trees randomly increases the ring number between soil level and browsing height (Vila et al. 2003), the ring number below 1.5 m is not relevant for growth modelling. The initialization of growth modelling was thus selected at 1.5 m height (age 0 at 1.5 m).

The function used for growth modelling was adapted from the "transcendental function" (Décourt and Lemoine 1969;Nanang and Nunifu 1999) usually written as :

$$H = k_1 \cdot A^{k2} e^{k3 \cdot A} \quad (1)$$

where H is the tree height, A the age, e the base of the natural logarithm, and k_1, k_2 and k_3 are the parameters. To initalize age at 1.5 m height and to fix the age of function maximum, the equation (1) become :

$$H = 1.5 + k_1 \cdot A^{-k3 \cdot Am} e^{k3 \cdot A} \quad (2)$$

where *A* is the tree age from 1.5 m height and *Am* the age corresponding to function maximum.

The model was fitted to each tree taking into account the first-order autocorrelation dependence between successive heights with the GNLS function of R software (R Development Core Team, 2008).

An average model was fitted to the whole data set and led to the parameter values of equation 5, where the *Am* value (72 years) was calculated from the oldest stand.

In order to classify the sites according to height growth, the age of 3 dominant trees per plot was assessed on wood cores taken at 1.5 m above ground and the heights of these trees were measured. The growth kinetics of each of the 18 trees (indexed *i*) was then assumed to be described by a model which is the product of equation 1 by a proportionality criterion I_i. The *Ii* criterion was taken as the tree growth index:

$$H_i = 1.5 + I_i \cdot \left(k_1 \cdot A^{-k3 \cdot Am} e^{k3 \cdot A}\right) \quad (3)$$

where H_i is tree *i* height.

The site index *SI* was defined for each stand as the mean of the growth indices I_i of the three dominant trees on that stand. Thus the dominant height *H* at a given *age* of a stand of site index *SI* is given by the following equation:

$$H_i = 1.5 + SI \cdot \left(k_1 \cdot A^{-k3 \cdot Am} e^{k3 \cdot A}\right) \quad (4)$$

3.1.2.4. Mineral nutrition

Tree nutrition was studied using leaf analysis. Leaf sampling concerned three dominant trees per plot in 2006 and 2007. Sampling took place from 10th July to 10th August. Mature leaves were harvested on the selected trees by climbing up the trees and then cutting one or two south–west oriented twigs on the upper third of the tree crown according to Bonneau (1995). Twenty healthy and mature leaves per tree were taken from the twigs each time. The leaflet fraction of the mature leaves was analysed for macro nutrients. Nitrogen was determined using Dumas method. The other nutrients (P, K, Ca, Mg) were measured after dry ashing by the ICP – Radial Analysis method at the USRAVE (Unité Service Recherche Analyses Végétales Environnementales, INRA Laboratory, Bordeaux).

3.1.3. RESULTS

3.1.3.1. Characteristics of the tree populations

The characteristics of the tree populations investigated are presented in Table 2. The average tree age was between 28 and 67 years, which means that, in some sites, grazing was first discontinued as early as at the end of World War 2.

Table 2: Main characteristics of the stands. The values mentioned are either unique, or mean ± standard deviation. *N* values are the sample sizes.

Stand	S1	S2	S3	S4	S5	S6
			Observed parameters			
Average DBH (mm)	105 ± 36	126 ± 69	90 ± 51	169 ± 66	170 ± 74	120 ± 43
N	*198*	*138*	*155*	*63*	*87*	*90*
Dominant height (m)	19.3 ± 0.3	23.2 ± 3.7	20.1 ± 1.8	22.5 ± 2.5	23.5 ± 1.5	16.1 ± 1.1
N	*6*	*6*	*6*	*6*	*6*	*4*
Average age (years)	26.7 ± 7.3	68.4 ± 6.2	37.3 ± 2.7	31.8 ± 3.1	44.6 ± 5.6	50.4 ± 6.9
N	*9*	*9*	*9*	*9*	*9*	*9*
Density (trees ha^{-1})	3308	2308	2575	1050	1450	2250
			Estimated parameters			
SI	1.12 ± 0.08	0.99 ± 0.13	0.93 ± 0.10	1.01 ± 0.04	0.96 ± 0.03	0.62 ± 0.02
H50 (m)	24.9 ± 1.6	22.3 ± 2.8	21.1 ± 2.0	22.7 ± 0.8	21.7 ± 0.7	14.4 ± 0.4

H50 is calculated from equation 5 with age =50 years

3.1.3.2. Tree height growth modelling

The reconstitution of the height of three dominant trees in three plots (S1, S2 and S3) by stem analysis is presented in the form of individual kinetics in Figure 1.

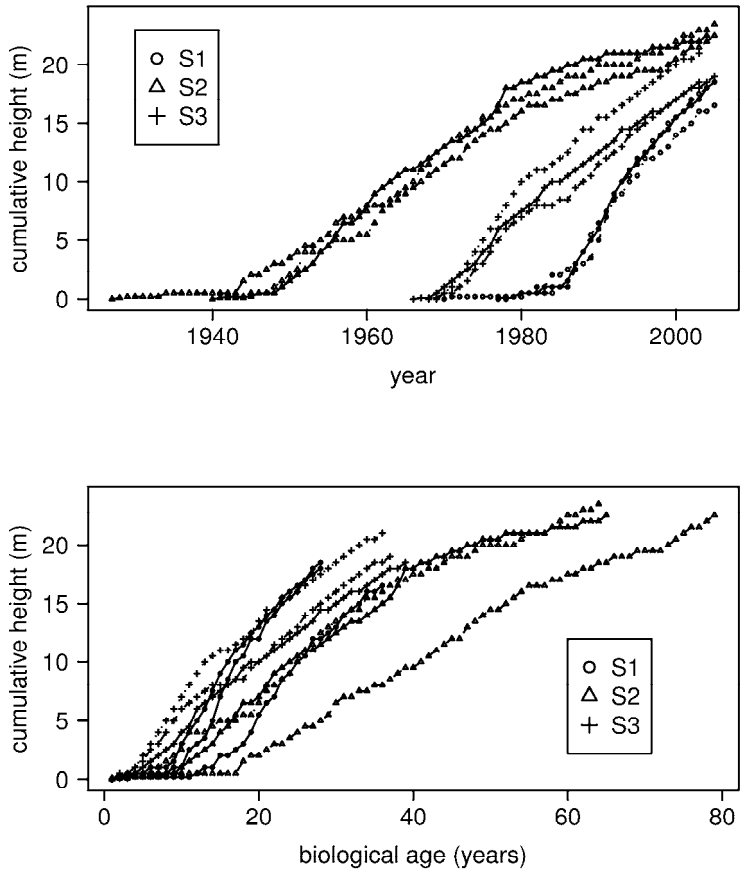


Figure 1: Comparison of the growth kinetics obtained through stem analysis in relation to years (1a) and to tree age (1b).

In two plots (S1 and S2) out of three, the very slow initial growth observed for some trees (with an elongation of less than 1 m over more than 10 years) was assigned to browsing (Fig. 1a). The most severely inhibited trees (S2, figure 1b) thus exhibited a growth lag.

The application of growth model (4) to the height–age pairs (age at 1.5 m) of 9 trees provided the following equation:

$$H = 1.5 + SI \cdot \left(0.65 \cdot A^{1.08} e^{-0.015 \cdot A}\right) \qquad (5)$$

with *H* expressed in metres and age in years, *SI* = 1 for the average model (Fig. 2). The Residual Square Error (RSE) obtained was 3.01 m for 565 degrees of freedom.

The height vs age curves obtained from equation 4 and the position of height–age pairs of the sample trees are shown in Figure 2.

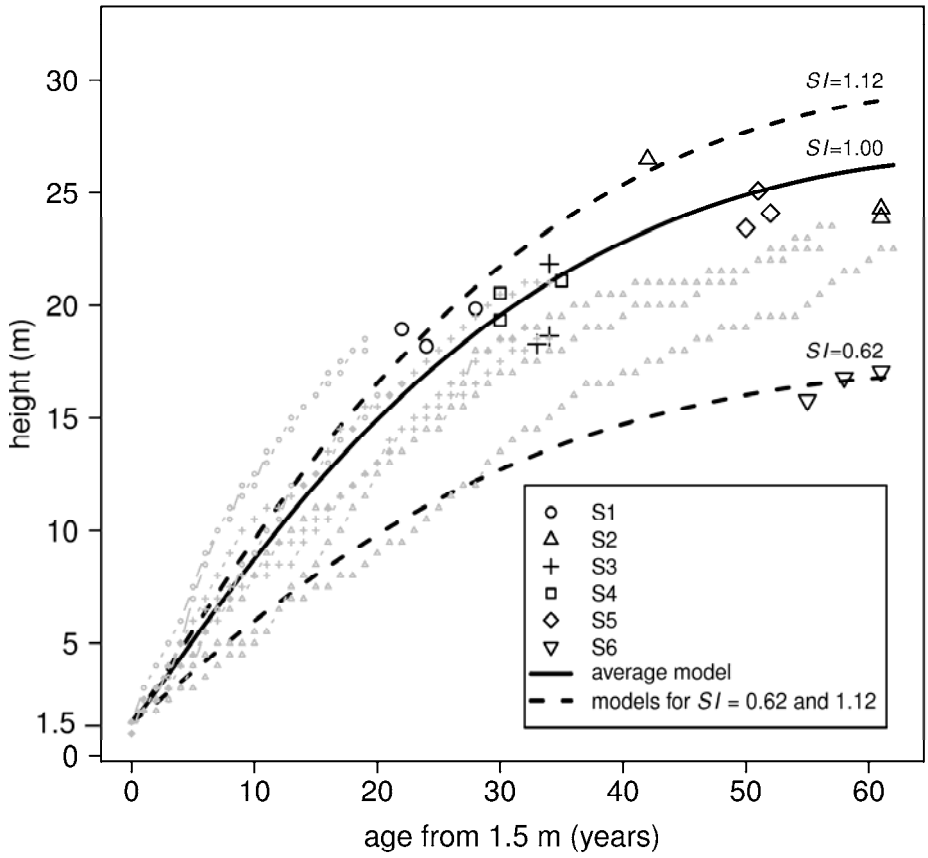


Figure 2: Relationships between height and age for the 27 sample trees in the 6 sites investigated. The solid line is the average growth model curve (*SI* = 1, equation 4). The two dashed lines correspond to the *SI* values 0.8 and 1.2. The black big symbols represent the position of the 18 dominant trees. The small grey symbols represent the 9 stem analysis trees.

The similarity of the height – age pairs on a same stand results in neighbouring values of the growth indices corresponding to the trees of that stand (Fig. 2). The use of the average growth index *SI* (Table 2) as the site index for the stand and for the comparison of ash stands of different ages is then quite justified. Most stands display site indices (SI) in the range 0.93–1.12, which correspond to *H50* of 21–25 m. The lowest height was observed in plot S6 (*SI* = 0.62, *H50* = 14.4 m, Table 2).

3.1.3.3. Mineral nutrition

N and Mg concentrations (Tab. 3) were above the critical nutrient level for demanding deciduous trees (N 25, Mg 2 g kg^{-1}, Bonneau 1995). P and K concentrations were below or close to the values considered as normal (P 2, K 15 g kg^{-1}, Bonneau 1995) in all sites with the exception of S5. The site with the lowest *SI* (S6) presented low N, P and K concentrations but they were not significantly different from those of the other sites (Table 3).

Table 3: Nutrient concentrations in the mature leaflet fraction of ash (g kg^{-1} of dry matter) in 2007. Values are the mean ± SD of three dominant trees per site. Values sharing a letter are not different between sites according to Tukey's test ($P< 0.05$).

Stand	S1	S2	S3	S4	S5	S6
N	29.0 ± 1.3 ab	29.9 ± 0.6 a	25.2 ± 1.5 b	27.8 ± 2.0 ab	31.1 ± 1.6 a	25.3 ± 1.6 b
P	1.4 ± 0.2 b	1.3 ± 0.2 b	1.5 ± 0.0 ab	1.6 ± 0.1 ab	1.9 ± 0.0 a	1.4 ± 0.2 b
K	7.4 ± 2.6 b	12.0 ± 1.7 ab	8.7 ± 1.1 b	9.8 ± 2.3 b	16.3 ± 0.8 a	8.4 ± 1.9 b
Ca	24.6 ± 5.2 a	21.9 ± 1.3 ab	19.5 ± 2.3 ab	19.9 ± 3.4 ab	15.9 ± 1.3 ab	15.4 ± 4.2 b
Mg	3.6 ± 0.8 ab	2.5 ± 0.6 b	4.4 ± 0.6 a	3.2 ± 0.3 ab	3.7 ± 0.5 ab	3.2 ± 0.5 ab

3.1.4. DISCUSSION

The stem analysis showed the occurrence of two types of initial growth (Fig. 1). In sites S1 and S2, the rapid initial growth of some trees was in contrast to the slow development of others as the likely result of browsing (Vila et al. 2003; McEvoy and McAdam 2008). The occurrence of a relationship between the development of ash trees and pasture management was suggested by Julien et al. (2006). When the grazing pressure is low, some trees totally escape browsing, whereas the growth of other trees is dramatically delayed. Figures 1a and 1b show that browsed trees display a height handicap for several decades. For some trees, in the absence of recovery, newer elongation remains below that of undamaged trees (plot S2, Fig. 1a). The assessment of the growth potentiality of natural ash stands requires the knowledge of the age of the trees at a sufficient height (for example 1.50 m height, i.e. above the browsing height by livestock). This age can then be used for the height growth modelling of any tree (Fig. 2). Another practical consequence is that browsed trees with a lower growth potential should not be preserved when thinning is to be considered.

In the ash stands investigated, dominant heights at 50 years were in the range 14–25 m with an average of 21.2 m (Tab. 2). These results are comparable to those reported for silvicultural

ash stands (10 to 24 m in Kovacs 1981; 10 to 26 m in Le Goff and Levy 1984; 22 to 28 m in Claessens et al. 1999). The data obtained suggest that, in the Pyrenees, the growth conditions of the ash populations are not thoroughly unfavourable.

The use of a proportionality criterion (*Ii*) at a given age allowed tree growth comparison on a same stand and growth potentiality assessment of ash stands established on different sites through the site index (*SI*). The *SI* values were generally close to unity, but the possible occurrence of another class of sites with more severe growth limitations was suggested by the value observed for site S6 (*SI* = 0.62, Table 2).

In the present case, the nature of growth limitations is not known. All sites except S5 (Table 1) were K– deficient whether in the soil (K < 0.4 cmol+ kg^{-1}; Bonneau, 1995) or in the subsoil (K < 0.12 cmol+ kg^{-1}; Bonneau 1995). Most sites, with the exception of S1 and S5, were low in Olsen P (P < 8 mg kg^{-1}; Mallarino and Attia 2005). Although P and K concentrations of ash leaflets (Table 3) were generally lower than the critical values published for demanding trees (P 2 , K 15 g kg^{-1}; Bonneau 1995), no relationship was observed between the site index (Table 2) and the mean leaf nutrient concentrations (Table 3). Other site factors such as water availability (Le Goff and Levy 1984) or soil acidity (impaired mycorrhizal development (Weber and Claus 2000) and detrimental Al toxicity (Weber–Blaschke et al. 2002; Kinraide 2003)) might also be involved.

The assessment of the growth potential of the trees is required for the selection of the most suitable economical valorisation: highly valuable timber production is to be considered only for the best growth conditions (Gordon 1964; Le Goff and Levy 1984, Kerr and Cahalan 2004). The questions pending in the highest yielding sites ($SI \geq 1$) concern the selection of the trees to be maintained, their reaction to thinning, and the silvicultural valorisation as timber wood (Claessens 1997). In contrast, in the least favourable Pyrenean sites such as S6 (*SI* = 0.62, Table 2), the local valorisation of ash stands as firewood without neglecting local externalities, such as protection against erosion and landscape management, should be considered.

From a methodological standpoint, the results presented here cannot be extended to smaller stands (less than 0.5 ha) as they are heterogeneous due to boundary effects and the number of trees is too low for relevant investigations. In further investigations, small acreages should be fused or aggregated taking into account the values of the environmental factors (climate, slope and soil) and using the acreage as a covariable.

The results discussed above are the first available on ash growth characteristics in spontaneous forest stands. Therefore as expected, they will be helpful to local managers to start thinking about the future of these new forest stands. But these first results suffer some limitations. Most of the patches of colonizing ashes have a very small area with strong edge effect. As we decided, to avoid edge effect, to start tree measurement only in patches of 0.5 ha or more, our results cannot be extended to smaller stands without risk. The difficulty we have to found 1 ha patches also resulted in a limited number of study sites and a low variability within our sample. Finally, because working in private plots, it was only possible to proceed to destructive measurement on a limited number of trees. For all these reasons, despite their local interest, our results need to be strengthened to be applied more generally. In further investigations, we plan to study ash growth in a large number of small patches of spontaneous forest using a comparative analysis

taking into account the values of environmental factors such as local climatic conditions, slope and soil characteristics, management history of colonized grasslands, and using the patch area as a covariable.

Acknowledgments

The authors are indebted to the owners of the experimental plots: Mrs Lacroix, Mrs and Mr Cabanel, Mrs and Mr Nogué, and Mr Bonnefous. J. Willm and L. Burnel brought technical assistance for tree measurement, Mr Lapeyre for field technical advice, L. Larrieu (CRPF Midi–Pyrénées) for soil description. Discussions with D.R. Sayag (INP–ENSAT), D. Auclair, and M. Goulard (INRA) strengthened the manuscript. This research was supported through a Syrian Government fellowship to O. Mdawar as well as a National Research Agency grant (POPULAR: ANR-06-PADD-014), a joint INRA and Midi-Pyrenees Region PSDR grant (CHAPAY: R-9090170) and a joint Midi–Pyrenees and Aquitaine Region CCRRDT grant (MIPAQUI: R-93900173).

References

Armand G, Courrivault C (2003) Planter le frêne à large espacement...voire à densité définitive. *Forêt Entreprise* 149, 40–44

Balent G, Duru M (1984) Influence des modes d'exploitation sur les caractéristiques et l'évolution des surfaces pastorales: cas des Pyrénées centrales. *Agronomie* 4:113–124

Bonneau M (1995) *Fertilisation des forêts dans les pays tempérés.* ENGREF, Nancy. 367 p.

Bozon N, Brun JJ, Grossi JL (1994) Distribution of some hardwood deciduous trees in the French Alps (*Fraxinus excelsior* L., *Acer pseudoplatanus* L., *Prunus avium* L.) multilevel approaches. *Ecologie* 25:111–118

Claessens H (1997) Itinéraires sylvicoles pour la production de frêne de qualité. *Les Cahiers Forestiers de Gembloux* 20, 21 p.

Claessens H, Pauwels D, Thibaut A, Rondeux J (1999) Site index curves and autecology of ash, sycamore and cherry in Wallonia (Southern Belgium). *Forestry* 72:171–182

Debroas EJ, Souquet P (1976) Sédimentogénèse et position structurale des flyschs crétacés du versant Nord des Pyrénées Centrales. *Bulletin du BRGM* 4:305–320

Décourt N, Lemoine B (1969). Le pin maritime dans le Sud–Ouest de la France. *Ann Sci For* 26:3–44

Gordon AG (1964) The nutrition and growth of ash, *Fraxinus excelsior*, in natural stands in English Lake district as related to edaphic site factors. *J Ecol* 52:169–187

Julien MP, Alard D, Balent G (2006) Patterns of ash (*Fraxinus excelsior* L.) colonization in mountain grasslands: the importance of management practices. *Plant Ecol* 183:177–189

Kerr G, Cahalan C (2004) A review of site factors affecting the early growth of ash (*Fraxinus excelsior* L.). *For Ecol Manage* 188:225–234

Kinraide TB (2003) Toxicity factors in acidic forest soils: attempts to evaluate separately the toxic effects of excessive Al^{3+} and H^{+} and insufficient Ca^{2+} and Mg^{2+} upon root elongation. *Eur J Soil Sci* 54:323–333

Kovacs F (1981) Construction of a new yield table for ash (*Fraxinus excelsior*) with help of mathematical statistical relation. *Erdeszeti–Kutatasok* 74:321–334

Le Goff N, Levy G (1984). Productivité du frêne (*Fraxinus excelsior* L.) en région Nord–Picardie. B.– Etude des relations entre la productivité et les conditions du milieu. *Ann For Sci* 41:135–170

Mallarino AP, Attia AM (2005) Correlation of a resin membrane soil phosphorus test with corn yield and routine soil tests. *Soil Sci Soc Am J* 69:266–272

McEvoy PM, McAdam JH (2008) Sheep grazing in young oak *Quercus* spp. and ash *Fraxinus excelsior* plantations: vegetation control, seasonality and tree damage. *Agrofor Syst* 74:199–211

Mottet A, Julien MP, Balent G, Gibon A (2007) Agricultural land–use change and ash (*Fraxinus excelsior* L.) colonization in Pyrenean landscapes: an interdisciplinary case study. *Environ Model Assess* 12:293–302

Nanang DM, Nunifu TK (1999) Selecting a functional form for anamorphic site index curve estimation. *For. Ecol. Manage.* 118 :211–221

Orsini L, Rémy JC (1976) Utilisation du chlorure de cobaltihexamine pour la détermination simultanée de la capacité d'échange et des bases échangeables des sols. Bulletin de l'Association Française d'Etude du Sol 4, 269–279

R Development Core Team (2008) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3–900051–07–0, URL http://www.R–project.org

Tapper P (1992) Demography of persistent juveniles in Fraxinus excelsior. Ecography 15:385–392

Vila B, Torre F, Guibal F, Martin JL (2003) Growth change of young Picea sitchensis in response to deer browsing. For Ecol Manage 180:413–424

Wardle P (1959) The regeneration of Fraxinus excelsior in woods with a field layer of Mercurialis perennis. J Ecol 47:483–497

Weber G Claus M (2000) The influence of chemical soil factors on the development of VA mycorrhizas of ash (Fraxinus excelsior L.) and sycamore (Acer pseudoplatanus L.) in pot experiments. J Plant Nutr Soil Sci 163:609–616

Weber–Blaschke G, Claus M, Rehfuess KE (2002) Growth and nutrition of ash (Fraxinus excelsior L.) and sycamore (Acer pseudoplatanus L.) on soils of different base saturation in pot experiments. For Ecol Manage 167:43–56

3.2. RESULTATS COMPLEMENTAIRES SUR LA PRODUCTION ET LA NUTRITION MINERALE DES PEUPLEMENTS

3.2.1. BIOMASSE LIGNEUSE ET SURFACE TERRIERE

L'ajustement des données à l'équation (0) pour calculer la biomasse ligneuse aérienne dans les 6 parcelles a donné l'équation suivante :

$$W = 3.115 + 0.000216\ DBH^{2.59} \quad (6)$$

Où DBH est exprimé en mm et W en kg. L'erreur résiduelle standard est égale à 14,87 kg pour 61 degrés de liberté.

La production en biomasse ligneuse de chaque parcelle est présentée dans le tableau 4.

Avec une biomasse ligneuse annuelle moyenne de 2,9 à 6,3 t ha^{-1} an^{-1}, la production en biomasse est comparable à celles de taillis de charme, de bouleau et de chêne (1,9 – 4,1 t ha^{-1} yr^{-1}, Auclair & Metayer, 1980) et de châtaignier (3 t ha^{-1} yr-1, (Bédéneau, 1988). La biomasse la plus importante (A3 /« S5 », 283 t ha^{-1} liée à la hauteur dominante de 23,5m) est comparable à celle des accrus de frêne en Italie de (280 t ha^{-1} pour une hauteur dominante de 28 m, (Alberti *et al.*, 2005). Ce niveau de production est hors d'atteinte dans les parcelles A4 /« S6 » et B6 /« S3 », qui ont une fertilité faible.

En ce qui concerne les surfaces terrières, elles sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques supplémentaires des peuplements étudiés.

Parcelle	**M2**	**Pr1**	**B6**	**B10**	**A3**	**A4**
Production moyenne annuelle en biomasse ligneuse ($t.ha^{-1}.an^{-1}$)	5,7	3,3	2,9	5,9	6,3	3,2
Surface terrière ($m^2.ha^{-1}$)	31,0	45,9	21,8	28,3	41,5	30,6
Biomasse foliaire ($kg.ha^{-1}$)	3195	2637	2499	3426	3503	2282

3.2.2. RELATION CROISSANCE-NUTRITION MINÉRALE

Les corrélations de Spearman entre l'indice de croissance Ii et les teneurs en quelques éléments minéraux dans les folioles (au niveau individuel) sont présentées dans le tableau 2. Des corrélations significatives ont été trouvées uniquement entre Ii et les combinaisons (N, Ca) et (N, Ca, P).

Tableau 2: Relations entre l'indice de croissance I_i et les teneurs en quelques éléments minéraux dans les folioles des 18 arbres. Rho représente les valeurs de coefficient de Spearman.

Eléments	**Rho**	**P**
N	0,38	0,12
N + Ca	0,49	0,04
N + Ca + P	0,55	0,02

La partie non expliquée de la variabilité de l'indice de croissance ($1 - R^2 = 0,70$, Tableau 2) est importante. La disponibilité en eau, la profondeur de sol et la pente sont des paramètres qu'il faudrait prendre en compte dans une étude ultérieure (Le Goff and Levy, 1984, Claessens *et al.*, 1999).

La corrélation faible qui comprend N et Ca ensemble et N, Ca et P ensemble est difficile à expliquer. La corrélation positive entre Ii et N est en accord avec les études précédentes de Gordon (1964) et d'Evans (1986), mais ce résultat a été trouvé ici pour une gamme de teneurs en N plus élevées que dans ces études (24 – 32 g. kg^{-1} contre 18 – 26 g.kg^{-1}, Gordon, 1964; N <17 g kg^{-1}, Bergmann, 1983; N < 25 g.Kg^{-1}, Bonneau, 1995) : il ne devrait donc pas être limitant dans notre cas. En ce qui concerne la teneur en Ca dans nos feuilles, elle est plus importante que les valeurs critiques (3 g kg^{-1}) trouvées par Bergmann (1983). La corrélation positive entre Ii et les teneurs en Ca (Tableau 2) ne peut donc pas être due à un manque en calcium.

Ainsi, dans les corrélations N, Ca et N, Ca et P, un effet indirect de l'acidité du sol peut être envisagé : les parcelles S3 et S6 qui sont plus acides et plus pauvre au niveau de Ca et Mg échangeables, avec un faible taux de saturation (Tableau 1 dans l'article), semblent être moins fertiles en N et P et être moins favorables au frêne (Pinto & Gégout, 2005). Cet effet de l'acidité peut être relié à la mycorhization (Weber & Claus, 2000) ou à la toxicité de l'aluminium (Al) (Weber-Blaschke *et al.*, 2002).

3.2.3. RELATION SOL - FEUILLES MATURES - FEUILLES SENESCENTES

On a testé la relation entre la quantité des éléments minéraux dans le sol (kg.ha^{-1}, Tableau 3) et la quantité de ces éléments dans les feuilles matures (kg.ha^{-1}) et dans les feuilles sénescentes (Tableau 4).

Tableau 3 : Quantités des éléments minéraux dans les sols des 6 parcelles étudiées (Kg. ha^{-1}).

Parcelle	N total	K	P
A3	12323	918	132
A4	15579	273	35
B6	27961	186	56
B10	26423	451	65
M2	44204	427	76
Pr1	18686	164	20

Tableau 4 : Coefficient de la corrélation de Spearman entre les quantités des éléments minéraux (première lettre) dans le sol (deuxième lettre = « S »), les feuilles sénescentes (deuxième lettre = « L ») et les feuilles matures (deuxième lettre = « F »). Les corrélations significatives à P< 0,05 apparaissent en gras.

	NF	NL	NS	PF	PL	PS	KF	KL	KS	CaF	CaL	MgF
NF	1,00											
NL	**0,94**	1,00										
NS	-0,14	-0,03	1,00									
PF	**0,94**	**0,89**	-0,03	1,00								
PL	-0,83	0,77	-0,09	**0,94**	1,00							
PS	0,77	-0,83	0,03	**0,89**	**0,94**	1,00						
KF	**0,94**	-0,83	-0,31	0,83	0,66	0,54	1,00					
KL	**0,94**	**0,89**	-0,31	0,83	0,77	0,71	**0,89**	1,00				

KS	0,77	0,71	-0,26	0,83	**0,94**	**0,89**	0,60	0,83	1,00			
CaF	0,60	0,66	0,54	0,49	0,31	0,37	0,49	0,54	0,26	1,00		
CaL	0,77	0,71	0,43	0,83	0,77	0,71	0,60	0,66	0,66	0,77	1,00	
MgF	0,77	0,83	0,03	**0,89**	**0,94**	**1,00**	0,54	0,71	**0,89**	0,37	0,71	1,00
MgL	0,49	0,26	-0,20	0,66	0,77	0,54	0,43	0,43	0,71	-0,09	0,54	0,54

Il existe des corrélations significatives entre les quantités en éléments minéraux dans les feuilles matures et la litière pour N, P et K. Les corrélations entre les quantités dans les feuilles et le sol diffèrent selon les éléments et selon la nature des feuilles (matures ou sénescentes). Pour le P les relations sont significatives quel que soit le compartiment analysé. Pour l'azote il n'y aucune relation entre le sol et les feuilles. Pour le potassium, la relation est meilleure avec les feuilles sénescentes.

Ces résultats suggèrent que les feuilles sénescentes peuvent être utilisées pour représenter la disponibilité de P dans le sol et qu'elles rendent assez bien comptes de la nutrition de la plante observée sur les feuilles matures, pour N, P et K.

Les quantités foliaires de Ca et Mg ont été ajoutées à ce tableau pour montrer leurs corrélations avec les variables précédentes : pour Ca ce sont des corrélations positives mais assez faibles. Pour Mg, il y a une corrélation significative du Mg des feuilles matures avec tous les paramètres de la nutrition en P (G. Bertoni, *communication personnelle*).

3.2.4. L'AZOTE MINERAL

Etude des litières

La comparaison des photos des litières des 6 parcelles montre une différence importante entre la litière de la parcelle A3 et celle de la parcelle A4 (Photo 1). L'absence de la litière dans la parcelle A3 par rapport à la litière dense de la parcelle A4, traduit des conditions du milieu favorables dans la parcelle A3 permettant une décomposition rapide de la litière et donc une quantité relativement importante de N minéral disponible pour les frênes dans cette parcelle par rapport à A4. La différence de la teneur en N dans les feuilles matures de ces deux parcelles (31,1g.kg^{-1} en A3 vs 25,3g.kg^{-1} en A4) pourrait donc être expliquée par une différence de la quantité de N disponibles pour les arbres entre les deux parcelles.



Photo 1 : La litière dans la parcelle A3 (1) et dans la parcelle A4 (2).

Pour les litières des autres parcelles (Photo 2), le simple examen visuel ne permet pas de distinguer des différences et il faudrait éventuellement procéder à des notations ou à des mesures. Dans cet esprit nous avons étudié le C/N de la matière organique du sol (MO) et la concentration en azote minéral du sol.



Photo 2 : La litière dans les parcelles B6 (1), B10 (2), M2 (3) et Pr1 (4).

Le ratio C/N

Ce ratio n'a montré aucune corrélation significative avec la teneur en N total dans le sol ($p = 1$), ni avec la teneur moyenne en N dans les feuilles matures ($p = 0,29$) et ni avec l'indice de croissance SI ($p = 0,80$). Cependant ce ratio a montré une corrélation significative positive avec la concentration en nitrates du sol ($Rho = 0,89$, $p = 0,03$).

$NO3^-$ et $NH4^+$ de l'horizon organique

Les résultats de cette analyse ne montrent aucune corrélation entre la quantité de l'azote minéral dans le sol (NO_3, NH_4, N minéral) et les teneurs en azote dans les feuilles matures (aux niveau parcelle et individuel), ni entre la quantité de l'azote minéral dans le sol et la quantité de l'azote dans les feuilles matures.

3.2.5. EFFET DES CARACTERISTIQUES DU SOL

Le pH est un facteur limitant de l'existence du frêne puisque le frêne est absent des sols présentant un pH < 4,2 (Wardle , 1961). Le pH a aussi un impact sur la croissance du frêne. La croissance maximum est observée pour des pH plutôt élevés comme par exemple, pH 7,6 sur Lake District en Grande Bretagne (Gordon, 1964). Cependant le frêne est capable de s'adapter à des pH plus faibles et notamment de pH 4,7 à 5,3 dans les sites Pyrénéens étudiés. Dans la gamme de pH de nos sites, sa croissance ne semble pas en corrélation avec le pH (Tableau 5).

Par contre, au-dessous de pH 4,9, on est dans le domaine des sols acides et favorables à la toxicité de l'aluminium. L'acidité pourrait ainsi expliquer une partie de la faible croissance des parcelles B6 et A4 par rapport aux autres parcelles (Figure 2). La zone dans laquelle se situent les pH des autres parcelles (Figure 2) pourrait correspondre à une gamme située au-dessus de ce seuil, où l'effet du pH n'est pas visible. Cela correspond à ce que Devauchelle & Levy (1977) ont trouvé sur l'absence de l'effet du pH sur la croissance du frêne dans le nord est de la France, pour une gamme proche de pH (4,6 à 7.9). Avec un effectif plus important et des valeurs plus variables (extrêmes et surtout basses) de pH, on aurait probablement une corrélation plus nette (Figure 2).

Un faible taux de saturation (BS) est associé aux parcelles acides. La corrélation entre BS et la teneur en éléments minéraux dans les feuilles matures va donc dans le même sens que l'observation sur l'acidité.

Un taux de saturation élevé est aussi un indice d'une bonne garniture de la CEC en éléments nutritifs et d'une bonne fertilité. La teneur en N dans les feuilles matures est en corrélation significative et positive avec BS (Tableau 5). Enfin, la teneur en P dans les feuilles matures est corrélée négativement au taux de matière organique du sol, peut être en raison d'une association entre le manque de P et une mauvaise minéralisation de la MO (Marschner, 1995) (Tableau 5).

Cependant ces caractéristiques (pH, BS, CEC, MO) montrent de faibles corrélations avec l'indice de site SI. Le pH du sol (corrélation de 0,58) et le taux de saturation (corrélation de 0,72) apparaissent comme des pistes à explorer dans un travail ultérieur pour évaluer l'adaptation du frêne aux conditions de sol.

Tableau 5 : Coefficient de la corrélation de Spearman (Rho) entre les teneurs en éléments minéraux dans les feuilles matures ($g.kg^{-1}$) et l'indice de site (SI) d'une part et les caractéristiques de sol d'autre part. Les corrélations significatives sont en gras.

	pH	**MO**	**CEC**	**BS**
Ca	0,29	0,58	0,70	0,43
Mg	-0,38	-0,81	-0,41	-0,43
K	0,58	-0,29	0,14	0,54
P	0,29	**-0,84**	-0,26	-0,14
N	0,64	0,23	0,81	**0,94**
SI	0,58	0,41	0,49	0,72

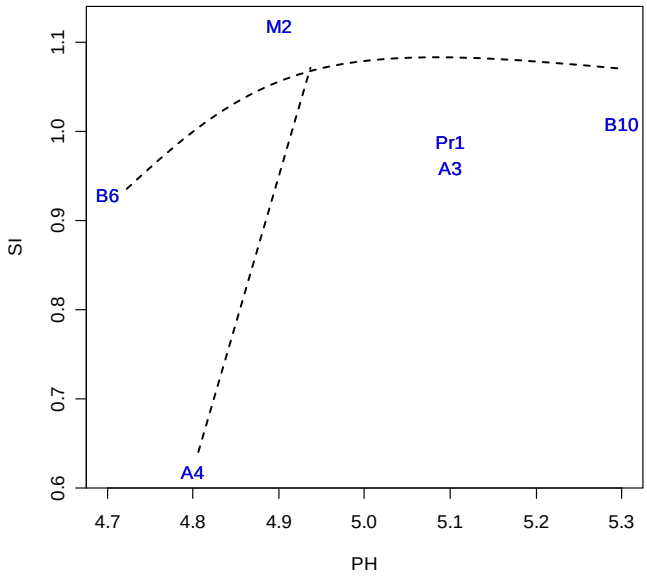


Figure 2 : Relation entre l'indice de site (SI) et le PH. En pointillé le modèle d'interprétation de la relation SI – pH.

4 - CONCLUSION

Dans l'ensemble, les données de l'analyse foliaire sont cohérentes entre elles (bonnes corrélations entre feuilles matures – feuilles sénescentes). Par contre au niveau du sol, il n'a été observé de relation qu'entre le phosphore du sol et le phosphore plante. Il y a des différences importantes de nutrition selon les sites avec des sites bien alimentés (M2, A3) et des sites où la nutrition est très faible (A4).

La démarche de modélisation a permis de modéliser de façon satisfaisante la croissance des arbres et a débouché sur une classification des sites par l'indice de site SI. Là encore, on a observé des différences significatives de croissance entre sites.

Cependant il n'y a pas de corrélation simple dans l'échantillon entre nutrition minérale et croissance. Même au niveau individuel, avec 18 échantillons d'analyse foliaire, les corrélations entre la croissance (Ii) et la teneur en éléments minéraux ne sont pas évidentes. L'absence de liaison entre la nutrition minérale sur la croissance du frêne n'est pas étonnante car même avec un effectif de 81 échantillons, (Knorr, 1987) n'a pas trouvé des corrélations importantes entre ces deux variables. Ceci peut s'expliquer soit par l'absence réelle de relations, soit par le fait qu'elles soient cachées par d'autres facteurs, ou par des effets de seuil qui n'ont pas été pris en compte.

Pour tenir compte d'éventuels autres facteurs, comme l'alimentation hydrique, Il faudra évaluer le bilan hydrique dans chaque parcelle étudiée.

Une autre explication réside dans le nombre limité de sites étudiés (6) qui ne permet probablement pas de montrer toutes les corrélations possibles entre ces variables. Ceci est dû à la difficulté de trouver des parcelles de taille suffisante et d'obtenir l'accord des propriétaires. Pour augmenter la taille de l'échantillon il faudrait réduire la quantité de mesures destructives et essayer d'étudier les parcelles de moins de 0,5 ha. Enfin, la méthode utilisée pour récolter les feuilles matures (grimpage) a limité le nombre d'arbres utilisés pour l'analyse foliaire. Il serait utile de trouver une autre méthode, plus accessible et plus rapide, pour récolter les feuilles, ce qui permettrait d'avoir plus d'échantillons. A ce sujet les résultats obtenus avec la récupération des feuilles sénescentes sont encourageants. Avec un effectif plus important, et centré sur une question plus précise, comme celle par exemple de l'adaptation du frêne aux sols acides, on pourrait probablement trouver des corrélations plus nettes.

Bibliographie

Alberti, G., Candido, P., Peressotti, A., Turco, SH., Piussi, P., Zerbi, G., 2005. Aboveground biomass relationships for mixed ash (*Fraxinus excelsior* L.) and Ulmus glabra Hudson) stands in Eastern Prealps of Friuli Venezia Giulia (Italy). Annales of Forest Science 62, 831-836.

Auclair, D., Metayer, S., 1980. Méthodologie de l'évaluation de la biomasse aérienne sur pieds et de la production en biomasse des taillis. Acta Oecologica. , Oecologica Plant 4, 357-376.

Bédéneau, M., 1988. Croissance du taillis de châtaignier en France : premiers résultats. Annales des Sciences Forestières 45, 265-274.

Bentouati, A., Oudjehih, B., Alatou, D., 2005. Croissance en hauteur dominante et classes de fertilité du pin d'Alep (*Pinus halepensis* MILL.) dans le massif de Ouled-Yakoub et des Beni-Oudjana (Khenchela-Aures). Sciences & Technologie C 23, 57-62.

Bergmann, W.1983. Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. Entstehung und Diagnose.

Caritat, A., Bertoni, G., Molinas, M., Oliva, M., Dominguez-Planella, A., 1996. Litterfall and mineral return in two cork-oak forests in northeast Spain. Annales des Sciences Forestières 53, 1049-1058.

CRPF Provence Alpes Côte d'Azur, 2009. Qu'est ce que la surface terrière ?, http://www.ofme.org/documents/ForetPrivee/fiches/181102.pdf

Debouche C., 1979. Présentation coordonnée de différents modèles de croissance. Revue de Statistique Appliquée 4, 5-22.

Devauchelle, R., Levy, G., 1977. Propriété stationnelles et croissance du Frêne dans l'Est de la France, Etude de certaines caractéristiques de cette essence. Annales des Sciences Forestières 34, 231-244.

Evans,J., 1986. Nutrition experiments in broadleaved stands: I.Pole-stage ash and oak. Quaterly Journal of Forestry 80, 85-94.

Faure, J.J., Jacamon, M., Lanier, L., Venet, J., 1975. Le frêne (*Fraxinus excelsior* L.) en France: Production et culture. Revue Forestière Française 2, 101-113.

Garbaye, J., 1969. Le diagnostic foliaire chez le peuplier. Rapport INRA. 13 p.

Goelz,J. C.G., Burk,T.E., 1992. Development of a well-behaved site index equation. Canadian Journal of Forest Research 22, 776-784.

Joyce, P.M., 1998. Silvicultural guidelines for ash, sycamore, wild cherry, beech and oak in Ireland. In:Growing Broadleaves. 29-49.

Knorr, A.1987. Nutritional status, site requirements and growth performance of ash in Bavaria.

Marschner, H.1995. Mineral nutrition of higher plants. London, 889 p.

Pinto, P.E., Gégout, J.C., 2005. Assessing the nutritional and climatic response of temperate tree species in the Vosges Mountains. Annals of Forest Science 62, 761-770.

Poulain, G., 2000. Planter du frêne sur d'anciennes terres agricoles. Forêt Entreprise 133, 34-37.

Thibaut, A., Claessens,H., Rondeux,J., 2002. Etablissement de courbes de productivité pour les peuplements de frêne en région limono-calcaire du Condroz et de l'Entre-Sambre-et-Meuse. Les Cahiers Forestiers de Gembloux 7, 18p.

Wardle , P., 1961. Fraxinus excelsior. Journal of Ecology 49, 739-751.

Zianis, D., Muukkonen,P., Mäkipää,R., Mencuccini,M., 2005. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. Silva Fennica Monographs 4, 1-63.

CHAPITRE 3 : CROISSANCE-CLIMAT

1- INTRODUCTION

Le climat est un des facteurs les plus importants qui contrôlent l'existence, la distribution et la croissance des végétaux (Wardle, 1961; Kerr & Cahalan, 2004; Pinto & Gégout, 2005). Les facteurs climatiques (température, pluviométrie, vent et CO2) ont une influence sur tout le cycle de vie des espèces comme la germination, la reproduction, mais aussi leur croissance (développement des bourgeons, feuilles, des racines et des fruits) et leur physiologie (synthèse des hormones, production de carbohydrates) (Fritts, 1976). Cependant l'effet des précipitations sur les végétaux est limité par les certains facteurs édaphiques (granulométrie, profondeur) et physiques (pente) qui jouent un rôle important dans la disponibilité de ces précipitations pour la plante (Duchaufour, 1970).

L'étude de l'effet du climat sur la végétation, et notamment sur la croissance des espèces ligneuses, n'est pas récente. Toutefois, l'apparition d'années sèches pendant les quarante dernières années en plusieurs régions de France, ont attiré l'attention sur l'effet de la variabilité climatique sur le développement des forêts (Lebourgeois, 2000). En particulier, suite à la canicule de 2003, le roussissement précoce et la chute prématurée des feuilles, à la fois d'un grand nombre d'espèces et dans une large gamme de conditions stationnelles, ont rappelé l'importance de la variabilité du climat sur la production des forêts. Une meilleure connaissance de la sensibilité des essences forestières au climat et à sa variabilité est indispensable pour mieux appréhender les changements climatiques actuellement en cours (Lebourgeois *et al.*, 2001; Lebourgeois, 2005).

En général, le climat est représenté par les moyennes annuelles ou mensuelles des précipitations et des températures (Charre, 1997). Pour beaucoup d'espèces d'arbres feuillus de nos régions, la saison de végétation commence en moyenne en avril et se termine en septembre : la croissance est donc influencée a priori par les paramètres climatiques de cette période mais, par le jeu de la mise en réserve des nutriments, on prend généralement en considération les paramètres à partir du mois d'octobre de l'année précédente chez les chênes (Lebourgeois *et al.*, 2004).

Le mode de croissance des ligneux sensible au climat et le plus accessible est la croissance en diamètre, qui s'enregistre annuellement dans le bois sous forme de cernes ligneux.

Les informations relatives à l'intensité et à la durée de la croissance annuelle des arbres en diamètre sont en effet enregistrées au niveau du cerne, notamment par sa largeur (Spiecker, 2002). La largeur du cerne est de ce fait l'un des principaux paramètres utilisés pour caractériser la croissance des ligneux en interaction avec le milieu (Lebourgeois, 2002; Lebourgeois *et al.*, 2004; Rozas, 2005), car elle est susceptible de répondre à plusieurs facteurs liés à la fois aux caractéristiques de l'arbre (espèce, âge, vigueur individuelle …) et à son environnement (climat, sol, compétition, intervention humaine…) (Lebourgeois, 2002).

Les cernes peuvent être étudiés à l'échelle de la largeur du cerne complet ou à l'échelle de leurs deux composantes anatomiques successives, le bois initial et la bois final, en mesurant individuellement leurs deux largeurs. La relation cerne-climat peut ainsi être analysée pour

chaque composant du cerne avec les paramètres climatiques qui leur sont contemporains. Ce niveau d'étude relativement fin est pratiqué surtout sur les espèces qui ont un bois hétérogène, c'est-à-dire dont le bois initial se différencie nettement du bois final par des vaisseaux plus larges, avec des parois minces, comme le chêne, le sapin, le hêtre….

L'étude des cernes permet d'analyser la relation entre croissance et climat en fonction du temps et de l'espace. Cette étude peut en effet être réalisée à plusieurs échelles spatiales (local, régional et hemisphérique) (Di Filippo *et al.*, 2007) et à différentes échelles de temps (infra-annuelle, interannuelle sur quelques années, ou sur le plus long terme à l'échelle du siècle) (Wattel, 1998); Lebourgeois, 2002).

L'étude des cernes a donnée naissance à la dendrochronologie, science qui a été développée initialement par A.E. Douglass et qui se base sur la mesure des épaisseurs de cernes et sur leur datation précise (Fritts, 1976 ; Lebourgeois, 2002). Sous le terme de dendrochronologie sont regroupées toutes les disciplines qui utilisent les séries chronologiques de cernes, comme la dendroclimatologie et la dendroécologie, qui utilisent les informations passées sur la croissance et ses facteurs dans le but de mieux comprendre les dynamiques présentes et de mieux appréhender les évolutions futures potentielles. Les relations entre la croissance des arbres et le climat sont étudiées dans le cadre de la dendroclimatologie (Martin, 1974).

Ce genre d'étude, lorsqu'elle concerne des peuplements forestiers, est appliqué à des arbres dominants. Elle est réalisée par le prélèvement d'une ou plusieurs « carottes » ou rondelles à des hauteurs variables selon les études, le plus souvent à la base du tronc (Timbal, 2002) ou à 1.3 m de hauteur au-dessus du niveau du sol (Lebourgeois, 2005). Le nombre total des arbres étudiés varie selon l'objectif de l'étude. Plus ce nombre est grand localement, plus il est aisé de séparer l'influence du climat de la variabilité inter-individuelle (Lebourgeois, 2002), et plus le nombre de peuplements étudiés est élevé, plus il est possible d'étudier efficacement l'interaction entre climat et station ou de comparer les effets respectifs de plusieurs types de climat sur la croissance d'une même essence forestière. Plusieurs systèmes sont utilisés pour les mesures des largeurs de cernes : image numérique en couleurs acquise avec un scanner de haute résolution à l'aide du logiciel canadien WINDENDRO II (Timbal, 2002), banc LINTAB relié à un ordinateur équipé du logiciel TSAP, le système CCTRMD et le logiciel CATRAS (Di Filippo *et al.*, 2007) ou le logiciel COFECHA (Rozas, 2003).

En Europe, comme le chêne et le hêtre représentent les principales espèces des forêts, ce sont les espèces les plus étudiées au niveau de la relation de leur croissance avec le climat (Gutierrez, 1988; Bednarz & Ptak, 1990; Poivesan & Schirone, 2000). En France comme en Europe, ce sont le chêne pédonculé, le hêtre mais aussi le chêne sessile et les pins qui sont les espèces les plus étudiées (Lebourgeois, 2000; Lebourgeois *et al.*, 2004; Lebourgeois, 2006) avec pour objectif la mise en évidence des facteurs climatiques limitants de leur croissance, la détection de leur sensibilité au climat, l'explication de leur dynamique de croissance passée, en particulier lors des années climatiquement exceptionnelles, et la prédiction de leur réaction au changement climatique à venir. Ces études montrent que la réponse au climat est différente d'une espèce à l'autre à cause de la différence de physiologie entre les espèces. Par exemple, en France, les recherches menées sur le réseau « Renecofor »* ont mis en évidence que les bilans hydriques de

juillet et d'automne ainsi que la température hivernale limitent la croissance des chênes sessile et pédonculé; en revanche, pour le hêtre, c'est le bilan hydrique de début d'été le plus déterminant (Lebourgeois, 2005 ; Lebourgeois, 2006). De plus, les réponses des espèces varient d'une région à l'autre. Ainsi la croissance du hêtre est influencée par le bilan hydrique de début d'été dans plusieurs régions françaises (Lebourgeois, 2005), alors qu'au nord de l'Espagne ce sont les températures estivales de l'année en cours et les températures de juillet de l'année précédente qui influencent négativement sa croissance radiale (Rozas, 2001). Ces différences peuvent s'expliquer par les différences de facteurs stationnels entres ces régions. Ainsi, Lebourgois (2005) a montré que les caractéristiques stationnelles modulent la réponse moyenne du hêtre au climat : les stations les plus sèches ont une sensibilité très forte au déficit hydrique en début d'été, alors que les stations d'altitude ou les stations humides ont des sensibilités plus faibles. De plus, les caractéristiques du sol, qui déterminent le bilan hydrique et donc les périodes de sécheresse en association avec le climat (Lebourgeois, 1999; Lebourgeois, 2006) influencent aussi les réponses de croissance des arbres. Ainsi, il a été montré que la réserve utile en eau du sol influence la sensibilité des peuplements de hêtre au climat et la significativité de la relation de leur croissance avec les paramètres climatiques (Lebourgeois *et al.*, 2005).

D'un point de vue dendrochronologique et surtout climatologique, le frêne est une espèce très peu étudiée dans la littérature par rapport aux autres essences feuillues. Il semblerait cependant que le changement actuel du potentiel de la croissance du frêne serait lié à des changements climatiques (Wattel, 1998) et certaines études indiquent des relations entre quelques facteurs climatiques (précipitations de mai) et la croissance des individus de cette espèce (Wardle, 1961).

La rareté de ce genre d'étude sur le frêne et son absence totale dans les Pyrénées, confortent l'importance de notre travail dont l'un des objectifs est de tester la sensibilité des boisements spontanés de frêne dans les Pyrénées centrales aux aléas climatiques, afin de pouvoir détecter leur avenir en termes de stabilité et d'exploitabilité.

L'étude présentée dans ce chapitre concerne l'analyse de l'effet du climat sur la croissance des accrus de frêne à l'échelle de la parcelle, en utilisant 3 parcelles situées dans deux vallées différentes. Trois hypothèses ont été testées :

- les différentes conditions climatiques entre les deux vallées étudiées induisent des réponses de croissance des peuplements de frêne différentes

- la réponse de croissance au climat varie en fonction de l'âge du peuplement et des conditions stationnelles du site sous un même régime climatique.

- dans les Pyrénées, où les précipitations sont relativement abondantes et bien réparties le long de l'année, les précipitations ne sont pas ou peu limitantes sur la croissance en diamètre du frêne.

Pour cela, les variations infra- et inter- annuelles des paramètres climatiques (précipitations, températures minimales et maximales) des sites étudiés ont été analysées. Pour comprendre la dynamique de croissance en fonction du climat dans nos peuplements, les cernes (largeurs et surfaces) ont été étudiées à l'échelle individuelle et à l'échelle du peuplement. Enfin, la relation entre la surface des cernes et les paramètres climatiques a été analysée en cherchant à déterminer les facteurs climatiques mensuels limitants de la croissance de nos accrus. Pour mieux prendre en compte le rôle éventuel du paramètre hydrique dans la croissance; le sol (profondeur et texture) et l'évapotransipration ont été intégrés avec les données de précipitation et de température pour estimer un bilan hydrique moyen à l'échelle de la décade.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. DONNEES CLIMATIQUES

Nous avons acquis à Météo France (2007) quatre types de données climatiques à l'échelle décadaire provenant des stations météorologiques les plus proches de nos parcelles d'étude. : précipitations totales, moyennes des températures journalières minimales, moyennes des températures journalières moyennes, et moyennes des températures journalières maximales.

Pour les parcelles de la vallée du Gave de Pau (M2 et Pr1), les données disponibles concernent les stations météorologiques d'Argelès-Gazost (43°00`N, 0°05`W, 8km) et d'Ayros-Arbouix (42°59`N, 0°04`W, 6km) : les données d'Argelès-Gazost couvrent la période de 1949 à 1981 en ce qui concerne les précipitations, et la période de 1964 à 1981 pour les températures ; pour les années postérieures à 1981, nous avons pris en compte les données de la station météorologique d'Ayros-Arbouix (1982-2006). Ces deux stations météorologiques sont proches de nos parcelles mais situées à moindre altitude, respectivement à 420 et 470 m, alors que nos deux parcelles se situent en moyenne à 1050 m d'altitude.

Pour la parcelle de la vallée de l'Adour (B6), nous avons utilisé les données de la station météorologique de Campan-Artigues (42°55`N, 0°12`E, 12km). Celle-ci, présente le désavantage d'être située à 1200m d'altitude sachant que notre parcelle est située à 730 m d'altitude. Les données de cette station couvrent la période de 1952 à 2006 pour les précipitations et la période 1959-2006 pour la température.

Les données climatiques mensuelles complètes des deux vallées sont fournies dans l'annexe 2.

2.2. CALCUL DU BILAN HYDRIQUE

Le modèle de bilan hydrique choisi correspond à un objectif de diagnostic des épisodes de sécheresse (existence, intensité et durée du stress) affectant la croissance (fermeture des stomates, donc arrêt des échanges gazeux liés à la photosynthèse), afin d'expliquer une partie des variations interannuelles de croissance. À cette fin, nous avons estimé l'évolution mensuelle de la réserve utile (RU) du sol, qui correspond à la quantité d'eau du sol disponible pour la plante, c'est-à-dire retenue dans le sol par des forces d'intensités intermédiaires entre celles du point de flétrissement permanent et de la capacité au champ*. La quantité maximale de cette eau disponible est la « réserve utile maximale » (RUM). La RU varie en fonction de la RUM, définie à partir de paramètres physiques du sol (granulométrie, texture et profondeur), des précipitations (P) et de l'évapotransipration réelle (ETR) selon la formule :

$$RU = RUM + (P-ETR) \quad [avec \ 0 < RU < RUM] \qquad [1]$$

Le calcul est initialisé au 1er janvier (t = 0) puis estimé par itération de mois en mois (t) :

pour t=0 , RUt= RUM

pour t>0 RUt= RUt-1 + (Pt-ETRt)

Le bilan entre les valeurs mensuelles de P et ETR permet de connaître la RU, dont le niveau par rapport à la RUM définit l'existence ou l'absence d'une régulation stomatique, elle-même indicatrice de stress hydrique (Granier *et al.*, 1995).

La Réserve Utile Maximale (RUM) de chaque parcelle a été évaluée à partir des observations texturales effectuées sur le terrain, des résultats d'analyses granulométriques et les résultats de l'analyse de ces données dans le logiciel Adishatz (Delarue & Larrieu, 2002). On a estimé la RUM dans chaque parcelle :

$$RUM = (Ep \times i)-(g \times Ep \times i) \qquad [2]$$

Où : Ep épaisseur de sol, i : coefficient de remplissage en eau (mm d'eau/cm d'épaisseur de sol). g : % des éléments grossiers observé.

L'ETR a été estimée à partir des valeurs de l'EvapoTranspiration Potentielle (ETP), qui est la quantité maximale d'eau pouvant être perdue par évapotranspiration, indépendamment de la nature du sol et de la végétation. L'ETP mensuelle a été calculée à l'aide de la formule de

Thornthwaite (Thornthwaite, 1948), qui présente l'avantage d'utiliser des données simples qui sont facilement disponibles :

$$ETP = 1.6 * D\,[(10T)/I]^{a} \qquad [3]$$

Avec : - T : Température moyenne mensuelle (°C).

- D : Coefficient correcteur par latitude et par mois correspondant à la latitude de 43°N dans le cas de nos parcelles (Thornthwaite, 1948).

- i : Indice de chaleur = $(T/5)^{1.514}$

- I : Somme des i mensuels pour la période de référence.

- $a = 6.75*10^{-7} * I^3 - 7.71 * 10^{-5} * I^2 + 1.792 * 10^{-2} * I + 0.49239$

Pour le calcul de l'ETP, nous avons utilisé les moyennes climatiques mensuelles de la période étudiée des stations météo utilisées.

Nous avons estimé ensuite l'ETR en faisant l'hypothèse, selon Granier *et al.* (1995), que l'ETR est dans notre cas égale à un certain pourcentage de l'ETP hors période de régulation stomatique.

Dans notre cas, compte tenu de la forte compétition existant dans nos peuplements, nous estimons que le LAI (Leaf Area Index)* est proche de 6 m^2/m^2 (Le Goff *et al.*, 1995), et que de ce fait l'ETR peut être estimée comme valant 80% de l'ETP hors période de régulation stomatique. Cette régulation intervient lorsque la RU devient inférieure à 40% de la RUM (Granier *et al.*, 1995; Granier & Breda, 1996) : c'est ce chiffre-seuil que nous avons repris dans nos parcelles de frêne pour définir les mois présentant une régulation stomatique, indice de stress hydrique.

Dans la période de régulation stomatique (RU < 40 % de RUM), la régression linéaire croissante de Granier et al. (1995) a été appliquée :

$$ETR/ETP = 0.2 + 1.5\,(RU/RUM) \qquad [4]$$

2.3. RECOLTE ET LECTURE DES CERNES D'ACCROISSEMENT

2.3.1. ÉCHANTILLONNAGE

Cette étude a été effectuée sur les parcelles B6, M2 et Pr1. On a choisi des arbres de même statut compétitif « dominant » en supposant que dans ce cas les arbres, relativement moins soumis à la compétition, réagissent de façon maximale et similaire aux aléas climatiques. Les effectifs et les dimensions de ces arbres sont indiqués dans le tableau 1.Pour chacun d'entre eux, les prélèvements ont été effectués sous forme de carottes (pour les arbres sur pied) ou de rondelles

(pour les arbres coupés pour un autre objectif). Le carottage a été réalisé à l'aide d'une tarière de Pressler de 5 mm de diamètre intérieur. Pour les parcelles M2 et Pr1, une carotte a été prélevée sur chaque arbre (Rozas, 2001 ; Rozas, 2003; Lebourgeois, 2005) (sauf dans le cas de coeur non-atteint : 2 à 3 carottes ont été alors prélevées en supplément). Pour la parcelle B6, 3 carottes séparées par un angle de 120° ont été prélevées (Tableau1). En cas de pente, la carotte a été prise sur le côté haut de la pente afin de prendre en compte de manière standard l'effet de la pente sur la déformation basale du tronc.

Le prélèvement des carottes et rondelles et la lecture de cernes des arbres de la parcelle B6 ont été effectués dans le cadre d'un stage de fin d'étude (Gonzales, 2007), avec un protocole légèrement différent (Tableau 1).

Tableau 1: Caractéristiques de l'échantillonnage des arbres, des carottes et des rondelles pour étudier l'effet du climat sur la largeur des cernes annuels.

Parcelle	**Effectif des arbres**	**Intervalle de dbh des arbres (mm)**	**Nombre d'échantillons par arbre**	**hauteur de prélèvement des échantillons (cm)**
B6	21	135-244	3	50
M2	18	104-212	1	base
Pr1	20	205-411	1	base

2.3.2. LECTURE DE CERNES

Les carottes et les rondelles ont été séchées à l'air ambiant, puis poncées, afin de mieux révéler les cernes (Rozas, 2001; Rozas, 2003). Les cernes ont ensuite été lus sur une plate forme de mesure en laboratoire.

Sous un stéréo-microscope binoculaire (LEICA), l'épaisseur de chaque cerne a été mesurée à l'aide d'un banc dendrologique manuel (LINTAB) relié à un ordinateur équipé d'un programme d'enregistrement TSAP (Rinn, 1996) à une précision de 0.01mm (Photo 1). Pour ces mesures, on dépose la carotte ou la rondelle sur le banc manuel et l'on visualise les cernes au travers du stéréo-microscope.

Pour les rondelles, nous avons mesuré les largeurs de cernes sur 2 rayons différents (le rayon le plus grand et le plus petit) et nous avons moyenné les largeurs à chaque niveau en calculant la moyenne quadratique.



Photo 1 : Matériel de lecture de cernes.

2.3.3. VERIFICATION DE LA DATATION DES CERNES

Après la lecture des cernes, il faut vérifier la synchronisation des séries individuelles de croissance de manière à pouvoir attribuer à chaque cerne l'année exacte de son élaboration (interdatation) en tenant compte des erreurs éventuelles de lecture et des malformations de cernes. En effet, l'objectif est de mettre en relation deux processus (la croissance et le climat) se produisant impérativement la même année. Cette interdatation se base sur l'existence d'« années caractéristiques » auxquelles correspondent des conditions de croissance remarquables (Lebourgeois, 2002) : cela a pour conséquence, ces années-là, de faire varier la croissance relative, par rapport à l'année précédente, dans le même sens (en + ou en -) pour un grand nombre d'arbres. Ainsi, pour des arbres soumis au même environnement, les fluctuations climatiques interannuelles vont entraîner des variations synchrones de la croissance des cernes lors de ces années caractéristiques, c'est-à-dire que la largeur du cerne sera majoritairement plus grande ou plus petite par rapport à celle du cerne précédent. Nous avons repéré ces années caractéristiques par le calcul, pour chaque arbre et chaque année disponible « n » de l'Ecart Relatif à la Croissance (ERC) :

$$ERC_n = 100 \times (L_n - L_{n-1}) / (Ln_{-1}) \qquad [5]$$

Où : L_n est la largeur de cerne

On a calculé ensuite la moyenne des ERC pour chaque année disponible en utilisant les carottes et les rondelles de tous les arbres étudiés.

Une année caractéristique est une année pour laquelle deux critères doivent être satisfait à la fois :

- La moyenne des ERC des arbres de l'échantillon doit être supérieure à un seuil minimum S1 ;
- Le pourcentage d'arbres dont les ERC sont supérieurs à S1 doit lui-même être supérieur à un seuil limite S2.

Afin de mettre en place des critères pour définir les années caractéristiques, nous avons testé plusieurs seuils S1 et S2 et choisi celui qui nous assurait un bon niveau d'exigence pour ces

années caractéristiques, tout en retenant un nombre d'années suffisant pour permettre une bonne synchronisation. En effet, plus le seuil S2 choisi est élevé, plus le nombre d'arbres ayant la même variation d'accroissement est important, et donc moins nous sélectionnons d'années caractéristiques**.** De même, plus S1 est élevé, plus les années choisies sont caractéristiques mais moins nous sélectionnons d'années caractéristiques. Ainsi, nous avons défini comme étant une année caractéristique, une année pour laquelle :

1. l'écart relatif moyen est au moins de 10% en valeur positive ou négative ;
2. au moins 70% des arbres étudiés présentent une ERC > 10 % pour le cerne concerné.

Ces critères sont également ceux utilisés par Lebourgeois (2002) pour un effectif des arbres étudiés de 20 arbres au minimum.

Une fois ces années caractéristiques mises en évidence, nous avons comparé les courbes individuelles d'ERC avec la courbe des ERC moyennes (jouant le rôle de courbe de référence), afin de détecter d'éventuelles erreurs de lecture se manifestant par des décalages au niveau de ces années caractéristiques (synchronisation ou interdatation). Lorsqu'un décalage est trouvé pour certains arbres, une relecture de cerne de ces arbres est faite pour savoir les causes du décalage (cerne(s) en trop ou cerne(s) manquant(s)) et corriger les erreurs quand elles existent (Figure 1).

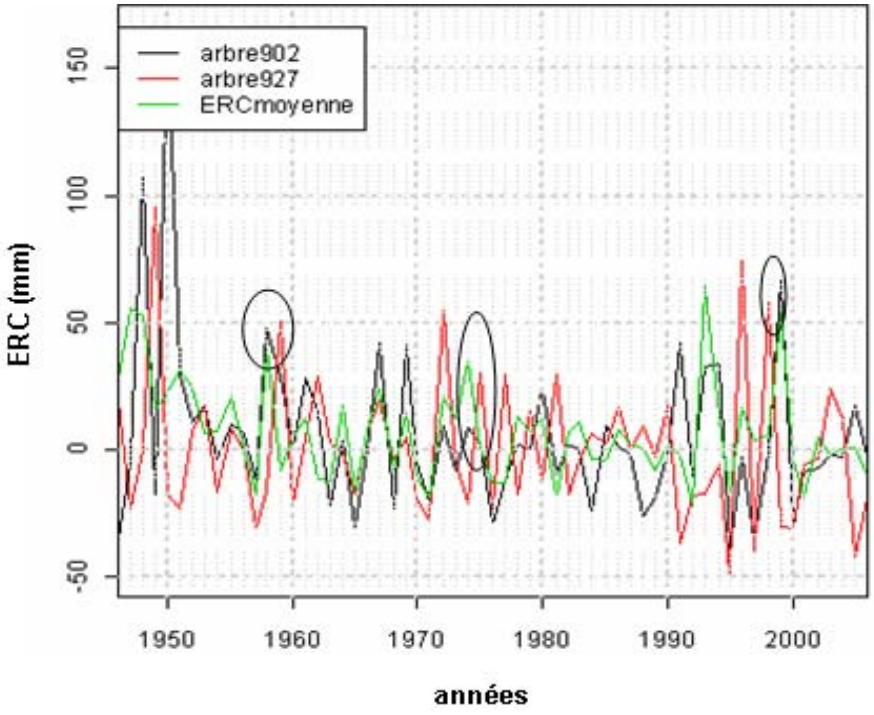


Figure 1 : Courbes des ERC de 2 arbres de la parcelle Pr1 et de l'ERC moyenne de 20 arbres de cette parcelle. Décalage de la courbe de l'arbre 927 par rapport aux autres courbes en 1958, 1974, 1999. le décalage au niveau des 3 années caractéristiques est entouré par des cercles. Une vérification de la lecture de cernes de cet arbre était nécessaire.

2.3.4. AUTRES PARAMETRES

Plusieurs autres paramètres synthétiques caractérisant l'espèce ou les peuplements ont été calculés également à partir des largeurs de cernes. Tous ces paramètres ont été calculés à partir des largeurs de cernes (et non des surfaces) à fin de rendre leurs valeurs comparables à celles de la littérature.

- nous avons étudié la sensibilité des arbres au climat (Sensibilité Moyenne individuelle: Sj) qui exprime l'ampleur relative des changements affectant l'épaisseur des cernes de deux années successives, et est estimée sur l'ensemble des années successives prises deux à deux. Cet indice se calcule au niveau des arbres en utilisant l'équation suivante :

$$Sj = \frac{1}{n-1} \times \sum_{t=1}^{t=n-1} \left| \frac{2(x_{t+1} - x_t)}{x_{t+1} + x_t} \right| \qquad [6]$$

Où : xt : largeur de cerne formé l'année t, xt+1 : largeur de cerne formé l'année t+1, n : le nombre d'années disponibles.

- nous avons calculé la sensibilité moyenne (SMi) des peuplements dans chaque parcelle selon la formule :

$$SM_i = \frac{1}{n-1} \times \sum_{t=1}^{t=n-1} S_j \qquad [7]$$

- on a calculé le coefficient d'interdatation (SR) est le rapport entre SM, la sensibilité moyenne calculée sur la chronologie maîtresse (c'est-à-dire sur la moyenne annuelle des largeurs de cernes de tous les arbres) et SMi :

$$SR = \frac{SM_m}{SM_i} \qquad [8]$$

Il correspond au plus ou moins bon synchronisme des arbres d'un même peuplement.

- On a estimé l'autocorrélation partielle entre les surfaces des cernes successifs en utilisant la fonction « pacf » dans R (R Development Core Team, 2008) pour quantifier la persistance de l'influence des conditions conduisant à l'élaboration du cerne d'une année donnée sur la largeur des cernes des années suivantes.

Le coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 (AC) a été calculé aussi par la formule :

$$AC = \frac{(1/n) \cdot \sum_{t=1}^{t=n} (Y_t - Y)(Y_{t-1} - Y)}{\sum_{t=1}^{t=n} (Y_t - Y)^2} \qquad [9]$$

Où : Y_t : Largeur de cerne de l'année t, Y_{t-1} : Largeur de cerne de l'année t-1, Y : Largeur de cerne moyenne, n : Nombre d'années étudiées.

2.4. ANALYSE DES RELATIONS ENTRE LE CLIMAT ET LA LARGEUR DES CERNES

On souhaite étudier ici les relations entre les caractéristiques climatiques mensuelles et la croissance annuelle moyenne des arbres de chaque parcelle, sur une séquence d'années communes.

Pour étudier ces relations on a choisi de travailler sur les surfaces de cernes et non sur les largeurs, car les surfaces intègrent mieux les variations interannuelles de croissance (Lebourgeois, 2002). En fait, la surface de cerne a l'avantage de tenir compte de la dimension initiale du tronc avant le développement du cerne et correspond donc mieux à la quantité de bois réellement produite une année donnée. Les différentes lectures des largeurs de cerne ont été moyennées (moyenne quadratique) pour chaque arbre, puis converties en surfaces dans le logiciel R (R Development Core Team, 2008).

D'autre part, afin d'étudier l'effet du climat sur la croissance, il est important de s'affranchir de l'effet de l'âge de l'arbre au moment de la formation du cerne, qui influence les accroissements annuels en diamètre. Cette correction, que l'on appelle la « **standardisation** » (Fritts, 1976; Lebourgeois, 2002; Timbal, 2002; Rozas, 2005) se base sur l'ajustement des surfaces individuelles de cernes (I) en fonction de l'âge qu'avait l'arbre lors de la formation du cerne. Cet ajustement fournit donc des valeurs calculées (C) qui représentent des surfaces moyennes de

cerne à un âge donné. La standardisation peut se faire soit à l'aide des indices I/C soit à l'aide des résidus I-C.

C'est le logiciel 3Pbase (Guiot & Goeury, 1996) qui a été choisi pour l'analyse des relations entre croissance et climat, compte tenu de la disponibilité de ce logiciel et de sa rapidité pour traiter les données. Il convient au traitement des données dendrochronologiques, climatologiques et paléoécologiques.

Ce logiciel prend en charge la standardisation des surfaces de cernes en ajustant les surfaces initiales par un filtre polynomial (Guiot & Goeury, 1996) puis il calcule les indices I/C. La relation entre climat et surfaces des cernes est ensuite calculée en utilisant une « fonction de réponse **bootstrappée » (FRB)** qui permet de tester la significativité et la stabilité des coefficients de régression entre croissance et paramètres climatiques (Guiot, 1991). La fonction « FRB » a été calculée ici en utilisant les 12 valeurs climatiques mensuelles (du mois d'octobre de l'année précédente à septembre de l'année de croissance) de chacune des variables climatiques étudiées comme variables explicatives (régresseurs) et l'indice moyen de chaque année (I/C) comme variable dépendante. Cette corrélation a été étudiée sur une période qui correspond aux années communes à la croissance des arbres étudiés et à la disponibilité des données climatiques (période 1950-2006 pour les précipitations et 1965-2006 pour les températures à Pr1, période 1971-2005 à M2, période 1975-2006 à B6).

On obtient ainsi, pour chaque variable climatique et chaque parcelle, un coefficient de régression (R) et son écart-type (S) pour chacun des 12 mois étudiés. Quand le ratio R/S est dans l'une des quatre gammes de valeurs : 1.65-1.95, 1.96-2.57, 2.58-3.29 ou >3.29, la significativité des coefficients de régression est respectivement de probabilités 90%, 95%, 99% ou 99.9%.

3. RESULTATS

3.1. VARIABILITE INTERANNUELLE DU CLIMAT

Notre objectif étant de confronter les données climatiques à la croissance annuelle des frênes, nous serons surtout attentifs ici à la *variabilité internannuelle* des variables du climat, tant en valeurs globales annuelles qu'en valeurs mensuelles. Cette variabilité est principalement caractérisée par les coefficients de variation des grandeurs. Les années extrêmes mentionnées sont situées dans les deux « inter-déciles »* extrêmes des distributions des variables considérées.

Nous présentons dans les deux figures suivantes les variabilités interannuelles et mensuelles du climat dans les 2 vallées étudiées.

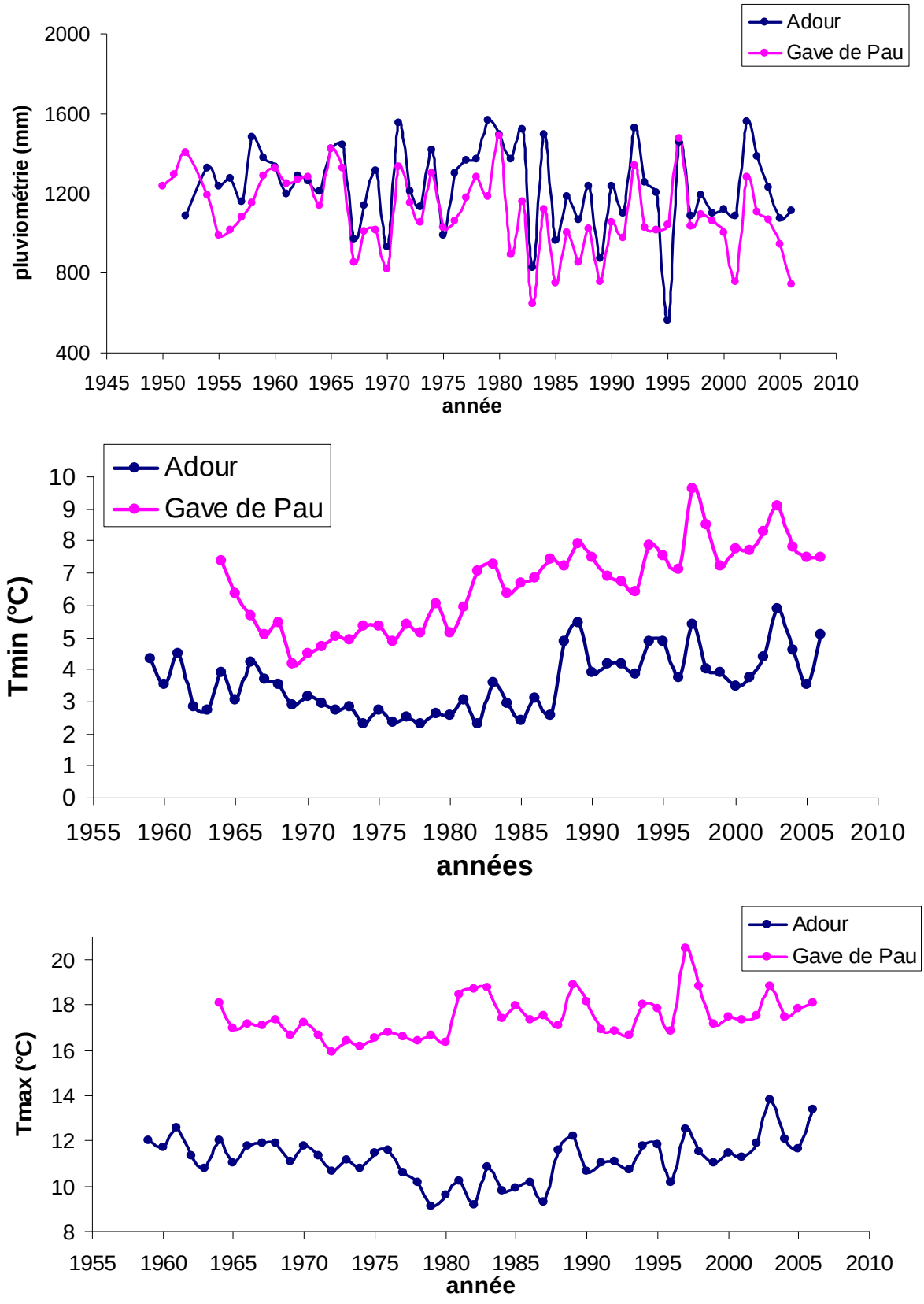


Figure 2 : Variation des précipitations annuelles, des températures minimales et maximales annuelles dans les 2 sites selon les données climatiques obtenues auprès des stations météo les plus proches.

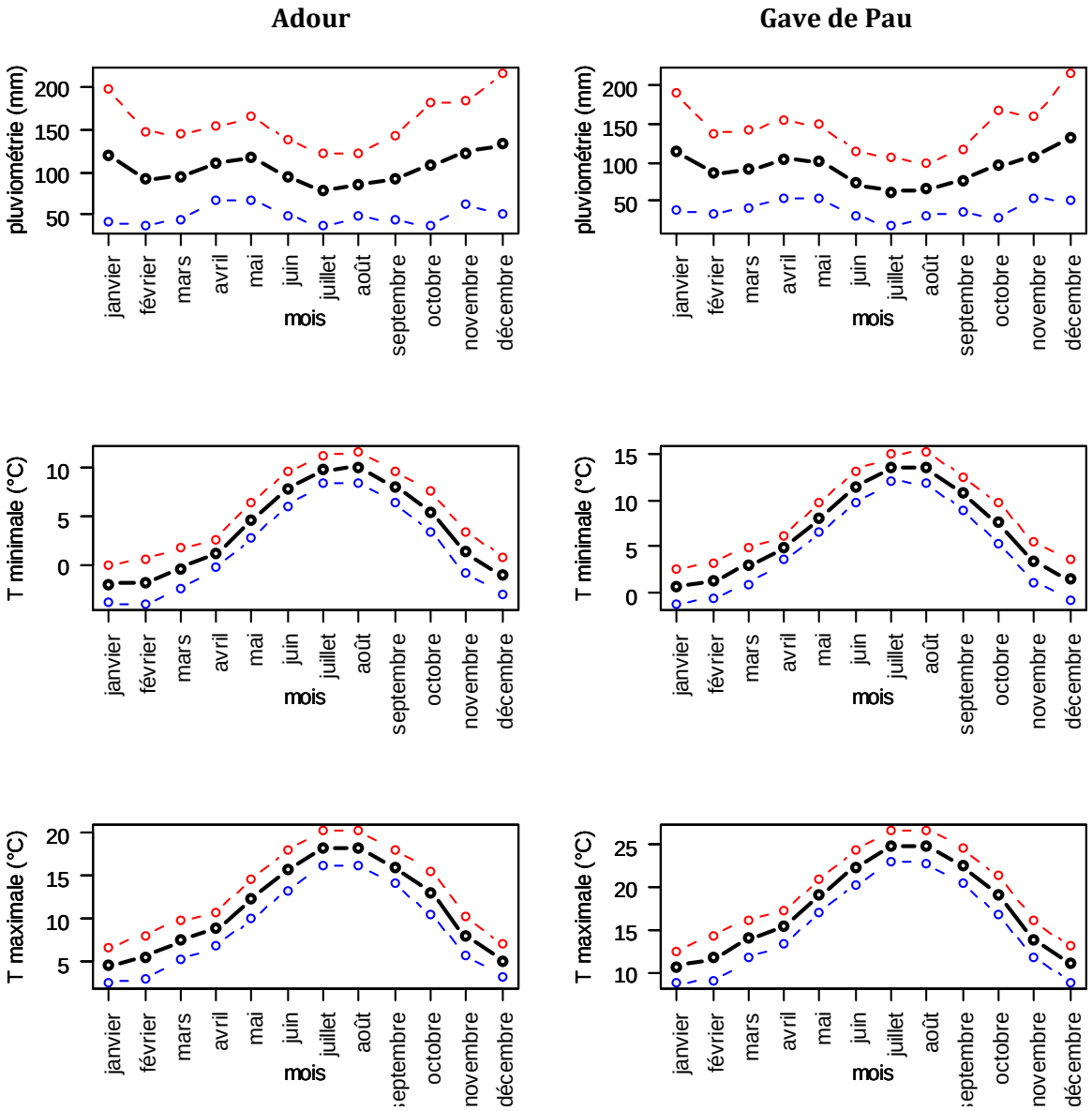


Figure 3 : Variation des paramètres climatiques mensuels (précipitations, température minimale et température maximale) dans les 2 sites selon les données climatiques obtenues auprès des stations météo les plus proches. Les figures à droite représentent les paramètres climatiques dans la vallée de l'Adour. Les figures à gauche concernent la vallée du Gave de Pau. Les moyennes mensuelles des précipitations ont été calculées pour la période 1952-2006 dans les deux sites. Les moyennes mensuelles des températures ont été calculées pour la période 1965-2006 dans les deux sites. Les lignes en noir représentent les valeurs moyennes des paramètres climatiques. Les lignes en rouge représentent les valeurs moyennes + l'écart type. Les lignes en bleu correspondent aux valeurs moyennes - l'écart type.

3.1.1 VARIABILITE DES PARAMETRES CLIMATIQUES DANS LES DEUX VALLEES

Dans la vallée de l'Adour, les précipitations et la température minimale sont plus variables d'une année à l'autre que la température maximale par rapport à la moyenne (coefficient de variation CV de 16,6% et 26,3%, contre 8,9%). On constate la même variabilité pour la vallée du Gave de Pau : des températures maximales relativement peu variables (CV de 5,3%) et une variabilité interannuelle au niveau des précipitations et des températures minimales plus importante (CV de 17.6%, 19.8% respectivement).

Au niveau mensuel, on constate que certains mois présentent davantage de variabilité interannuelle que d'autres, en ce sens que leur CV interannuel est situé à plus d'un écart-type de la valeur moyenne de ce CV pour l'ensemble des mois. Pour les précipitations dans la vallée de l'Adour, ce sont les mois de janvier, d'octobre et de décembre qui sont les plus variables (CV de 65,1, 66.3 et 62,1%). Pour les températures minimales, ce sont les mois de février, mars, avril, novembre et décembre qui présentent la variation la plus importante (CV de 124,6, 492,5, 115,4, 173,1 et 171,8), alors que la température maximale mensuelle est peu variable au niveau annuel par rapport aux deux autres paramètres. Cependant, les mois de janvier et février représentent les températures maximales les plus variables par rapport aux autres mois (CV de 43,9, 47,1%) dans cette vallée. Dans la vallée du Gave de Pau, les précipitations de juillet et d'octobre sont les précipitations les plus variables d'une année à l'autre (CV de 74,8, 72,7%). Les températures hivernales sont très variables : un CV de 306,5 pour la température minimale de janvier, 151,7 pour février et 156,9 pour décembre) et des températures maximales de février et de décembre plus variable que ceux des autres mois (CV de 23, 19,2%) (Annexe 3).

3.1.2 ANNEES REMARQUABLES

En considérant les années qui ont à la fois des précipitations et des températures extrêmes (appartenant aux inter-déciles 1-2 et 9-10) (Annexe 4) et qui ont un impact potentiel sur le bilan hydrique, on a extrait ci-après les années particulières à chacune des deux vallées (voir aussi Tableau 2). On a également extrait les années qui représentent des précipitations élevées en mai pour voir ensuite si ces années ont un effet sur la croissance de nos peuplements comme trouvé par ailleurs par Wardle (1961) :

- Dans la vallée de l'Adour, c'est l'année 1983 qui est la plus pauvre en précipitations (Tableau 2) du fait d'un déficit des précipitations en janvier, juillet et septembre (sachant qu'il y des données manquantes pour l'année 1995 qui semble sur la figure1 l'année la plus pauvre). L'année 1979 est la plus riche en précipitations grâce aux précipitations élevées de janvier, février, avril et mai. Cette richesse en précipitations est accompagnée par une température annuelle maximale basse (avril, juin, août et septembre).

L'année 2003 a les températures annuelles (Tmin, Tmax et Tmoy) les plus élevées pendant la période 1959-2006 (mars, avril, juin, juillet, août et pour Tmin on ajoute décembre). Mais au niveau de précipitations, rien de particulier n'est à signaler pour cette année.

L'année 1984 a les températures minimales et maximales de mai les plus basses parmi les 47 années (Tmin de 0.6°C, Tmax de 6.6°C) dont on a les températures et cette année-là a également les précipitations de septembre les plus élevées de la période. Les précipitations les plus élevées de mai se sont produites en 1977, 1956 et 2002.

- Dans la vallée du Gave de Pau, l'année 1983 est également l'année la plus pauvre au niveau des précipitations pour la période 1952-2006, ces précipitations sont accompagnées par des températures maximales et moyennes annuelles élevées. En regardant les données mensuelles, on trouve que les précipitations de janvier, juin et septembre de cette année sont les responsables de cette pauvreté en précipitations et que les températures maximales de juillet, septembre, novembre et décembre sont élevées par rapport aux autres années. Par contre, l'année la plus riche en précipitations est l'année 1980 grâce aux précipitations élevées de mars, avril, octobre et décembre. Cette année a une température maximale annuelle basse (ce sont les mois de mai, juillet et décembre qui ont des températures maximales relativement basses).

L'année 2003 présente également dans cette vallée des températures annuelles (Tmin, Tmax, Tmoy) extrêmes élevées et en particulier pour certains mois (Tmax de mars, juin et août, Tmin de mars, avril, juin, juillet, août, septembre, novembre et décembre). Les précipitations les plus élevées de mai sont situées en 1951, 1977 et 1978.

Tableau 2 : années extrêmes dans les 2 vallées. Le symbole + représente le paramètre pour lequel l'année est considérée comme extrême car elle a une valeur élevée au niveau de ce paramètre. Le symbole – représente le paramètre pour lequel l'année a une valeur basse et pour cela elle est considérée comme extrême. pp représente les précipitations, Tmin : la température minimale, Tmax : la température maximale.

année remarquable	**vallée de l'Adour**			**vallée du Gave de Pau**		
	pp	**Tmin**	**Tmax**	**pp**	**Tmin**	**Tmax**
1971				+	-	
1979	+		-			
1980	+		-	+		-
1982	+	-	-			
1983	-			-		+
1984	+		-			
1989	-	+	+	-	+	+
2003		+	+		+	+

3.1.3. COMPARAISON DES VALLÉES

Les courbes des paramètres climatiques étudiés des deux vallées se synchronisent bien entre elles. Sans doute du fait de la différence d'altitude entre les deux stations météo, la vallée de l'Adour a des précipitations moyennes plus importantes et des températures moyennes plus basses que la vallée du Gave de Pau (Figure 4 et 5). La correction de la température en fonction de l'altitude des parcelles étudiées (-0.65°C pour chaque 100m d'altitude ; anonyme, 2009), montre que les parcelles de la vallée du Gave de Pau ont toutefois des températures minimales plus basses que la parcelle de la vallée de l'Adour du fait de l'altitude plus importante de ces parcelles (1053m contre 732m).

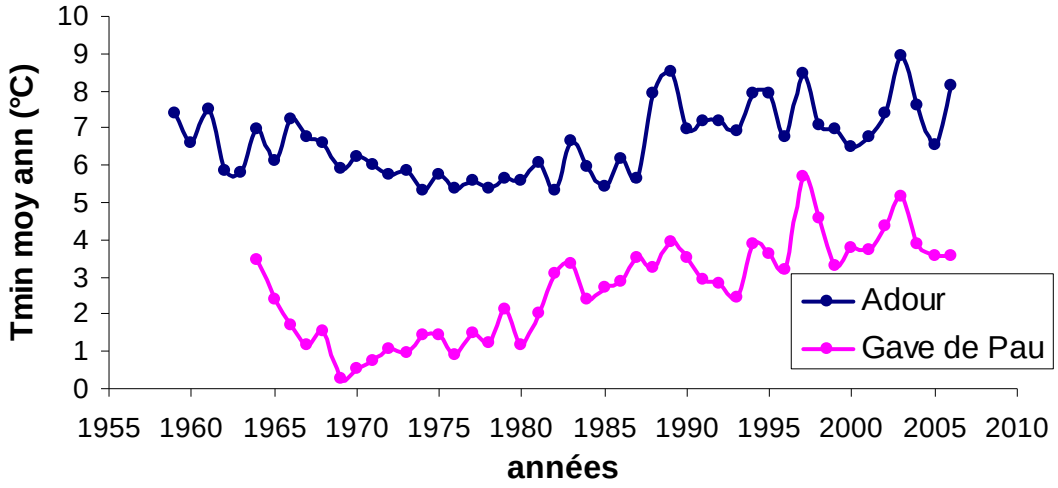


Figure 4 : évolution de la température minimale corrigée selon l'altitude des sites étudiés, en fonction du temps.

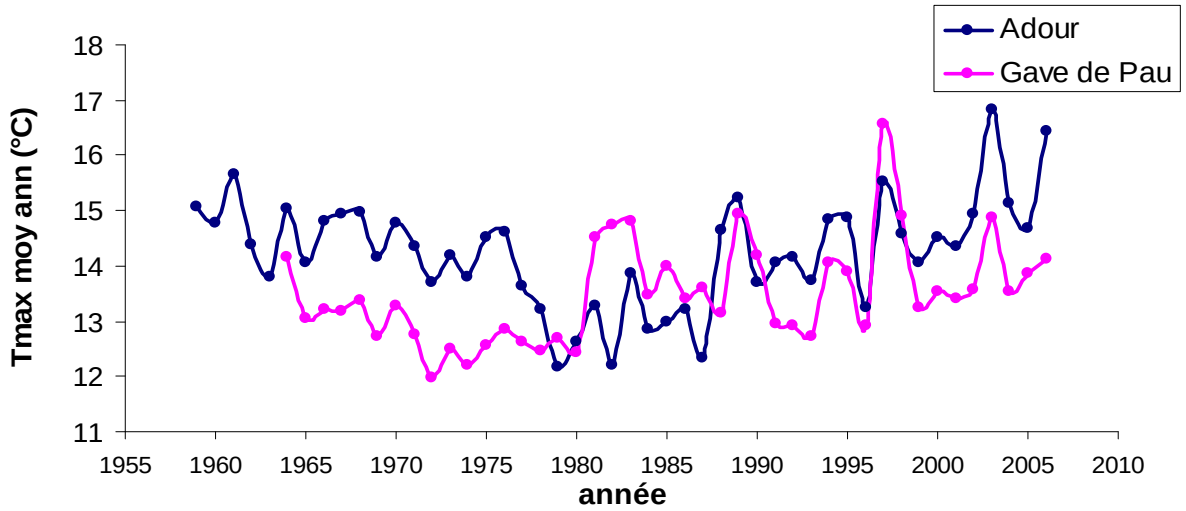


Figure 5 : évolution de la température maximale corrigée selon l'altitude des sites étudiés, en fonction du temps.

Les températures maximales des parcelles du Gave de Pau sont elles aussi plus basses que celles de la parcelle de la vallée de l'Adour, sauf pour la période 1979-1987 où la température maximale dans ces deux parcelles devient plus élevée.

Les paramètres annuels sont très comparables dans les deux vallées en terme de variabilité interannuelle (valeurs proches de CV) même si la variabilité interannuelle des températures annuelles et mensuelle dans la vallée de l'Adour est plus élevée que celle du Gave de Pau comme nous l'avons vu ci-dessus au niveau des CV. Les paramètres climatiques mensuels les plus variables au cours de temps sont presque les mêmes dans les deux vallées (paragraphe 3.1.1.).

Par contre, les années extrêmes pour les paramètres climatiques annuels ne sont pas les mêmes dans les deux vallées même si on trouve quelques années extrêmes communes (années 1983, 1989 et 2003). Le classement des années selon les données climatiques mensuelles est différent d'une vallée à l'autre. En général, les années classées comme extrêmes pour un paramètre climatique mensuel dans la vallée de l'Adour sont différentes de celles trouvées dans la vallée du Gave de Pau pour le même paramètre, malgré l'existence de plusieurs années communes (ex. l'année 1977 est l'année la plus riche en précipitations du mois de mai dans les deux vallées).

Les deux vallées ont quelques caractéristiques climatiques très proches et se différencient pour d'autres : bonne synchronisation entre les courbes des paramètres climatiques annuels et mensuels des deux vallées, variabilité voisine en terme des précipitations, variabilité plus élevée pour les températures dans la vallée de l'Adour, et quelques années extrêmes communes. Le pourcentage des années extrêmes communes entre les deux vallées, au niveau des précipitations annuelles, de température minimale annuelle et de température maximale annuelle sont respectivement de 25%, 20% et 16%.

3.2. VARIABILITE INTERANNUELLE DE LA CROISSANCE EN DIAMETRE

3.2.1. VARIABILITE INTER-ARBRES DE LA CROISSANCE EN DIAMETRE

3.2.1.1. Effet de l'âge sur la croissance en diamètre :

En reliant les surfaces moyennes des cernes de tous les arbres étudiés avec l'âge des arbres lors de la formation de ces cernes, on constate que les arbres arrivent en moyenne à une valeur maximale de l'accroissement annuel de la surface de cerne (point d'inflexion de la courbe de la figure 6) à l'âge de 17 ans. Les surfaces de cernes continuent ensuite d'augmenter, avec des fluctuations liées au nombre variable d'arbres utilisés dans le calcul de la moyenne, puisque nous utilisons des arbres d'âges différents. Cependant, l'âge à partir duquel la croissance devient significative et l'âge auquel l'arbre atteint sa croissance maximale sont variables : il y a des arbres qui mettent plusieurs années pour démarrer (5 à 18 ans) (figure 7 à gauche) et d'autres qui démarrent tout de suite (Figure 7 à droite). Certains arbres arrivent tôt à leur croissance maximale (à l'âge de 10 à 20 ans) (Figure 8 à gauche) et d'autres arrivent à cette croissance très tard (à l'âge de 66 ans) (Figure 8 à droite).

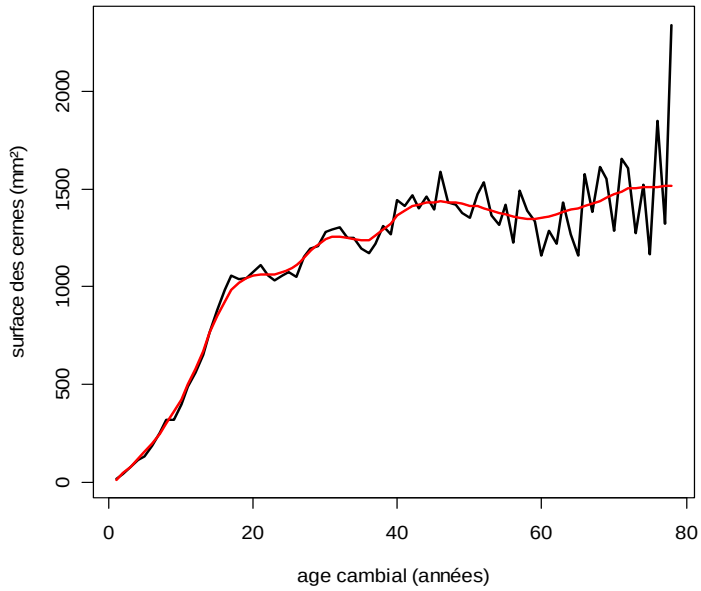


Figure 6 : évolution de la surface moyenne des cernes de tous les arbres étudiés (mm^2) en fonction de l'âge des arbres lors de la formation des cernes. La ligne en rouge représente le lissage [15].

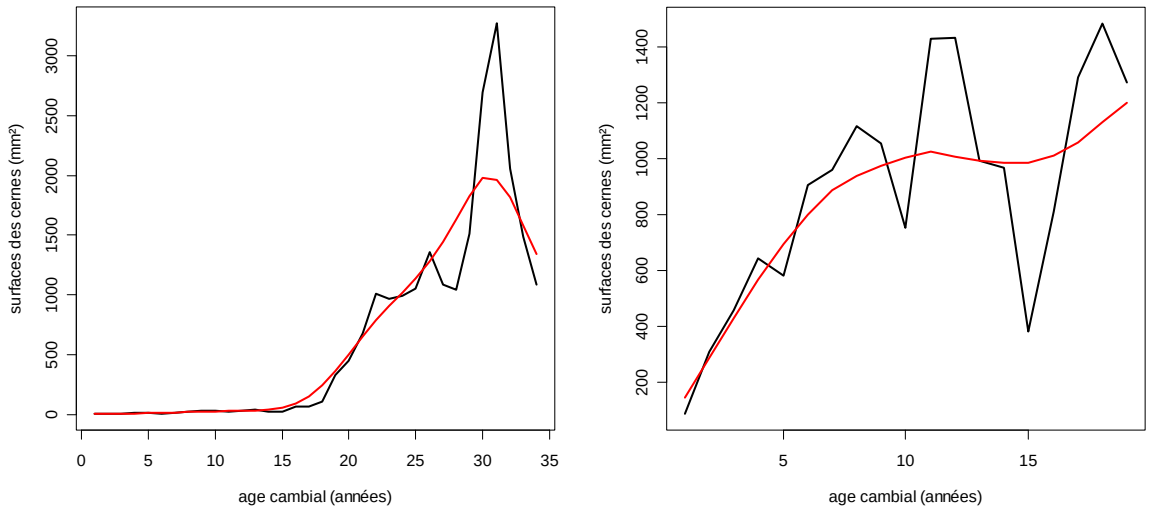


Figure 7 : à gauche : arbre de croissance initiale lente (démarrage à 18 ans), à droite : arbre de croissance initiale rapide. Les lignes en rouge représentent le lissage des courbes.

[15] Pour l'ensemble des courbes présentées, les lissages figurés ont été calculés à l'aide de la fonction « supsmu » du logiciel R.

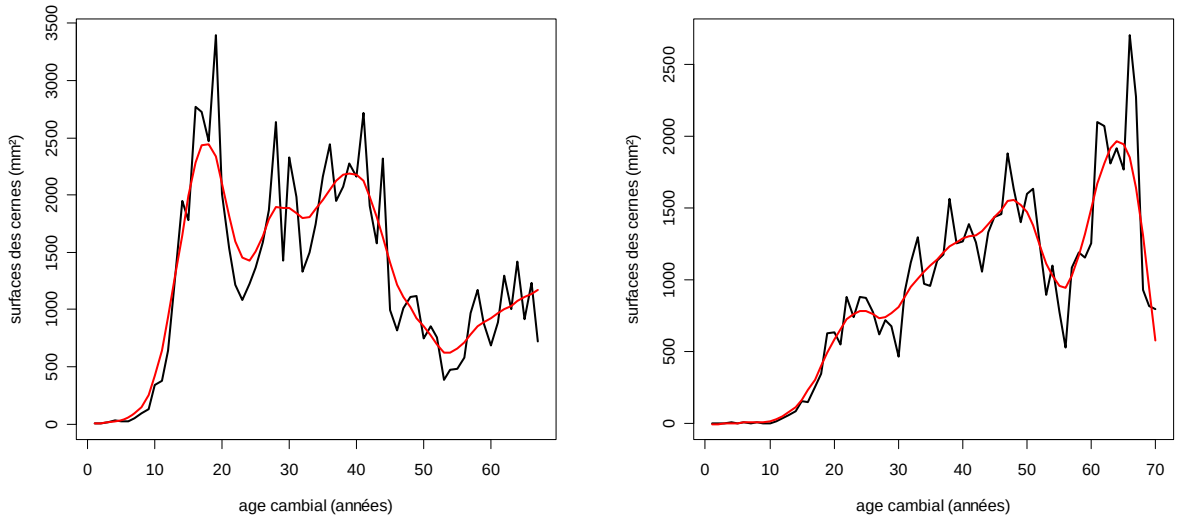


Figure 8 : à gauche a : arbre à croissance maximale en diamètre précoce (à 19 ans), à droite b : arbre à croissance maximale en diamètre tardive (à l'âge de 66 ans). Les lignes en rouge représentent le lissage des courbes.

La plupart (93%) des valeurs des résidus entre les valeurs réelles des surfaces de cernes et les valeurs issues du lissage de ces surfaces en fonction de l'âge, se situent entre -200 et +200 mm^2. Dans la mesure où on considère que le lissage représente l'effet de l'âge, cela signifie qu'il subsiste encore une importante variabilité de la croissance en diamètre sous l'effet d'autres facteurs comme le climat, la compétition, la génétique…

3.2.1.2. Variabilité de la sensibilité et de la « mémoire » de la croissance individuelle vis-à-vis du climat

- Sensibilité moyenne annuelle :

Les individus étudiés semblent avoir des sensibilités peu variables au climat (Figure 9). La valeur moyenne de la sensibilité de ces individus étudiés au climat est de 0,24 avec un coefficient de variation C.V. de 23,82%. Le calcul de Sj sur des cernes des années communes entre tous les arbres a donné la même valeur précédente (0,24) avec presque la même gamme de valeurs (0,11-0,44) malgré une différence entre les âges des arbres utilisés, ce qui pourrait signifier que l'âge ne joue pas un rôle important sur la sensibilité des arbres au climat.

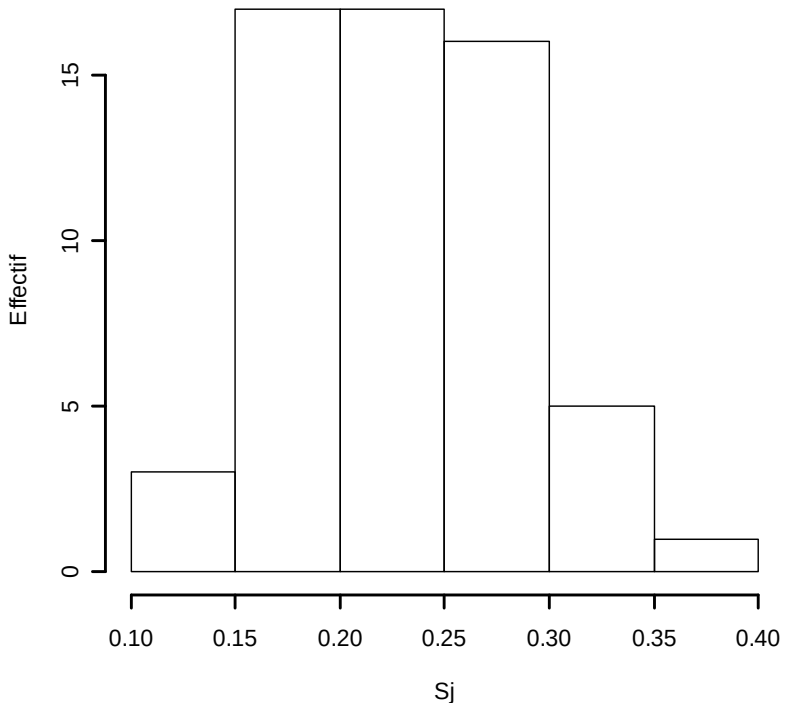


Figure 9 : Histogramme de la répartition des valeurs de la sensibilité individuelle (Sj) au climat des arbres des 3 parcelles étudiées.

- Autocorrélation partielle :

L'estimation de l'autocorrélation partielle entre les surfaces des cernes successifs en utilisant la fonction « pacf » dans R montre que 97% des arbres ont une corrélation entre la surface de cerne de l'année en cours avec la surface du cerne de l'année précédente (autocorrélation d'ordre 1) (Tableau 3). 69% des arbres n'ont qu'une seule autocorrélation d'ordre 1.

Tableau 3 : Pourcentage d'arbres présentant des autocorrélations entre largeurs de cernes successifs selon l'ordre de cette autocorrélation.

Ordre d'autocorrélation	% arbres
-1	97
-2	15
-3	7
-4	7
-5	5
-6	2
-7	2
-10	2

Ce résultat est confirmé par le calcul du coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 (AC). La plupart des valeurs de AC calculé est supérieure à 50% (Figure10). Cependant, le AC moyen de nos arbres est de 0,65 avec une médiane de 0,72.

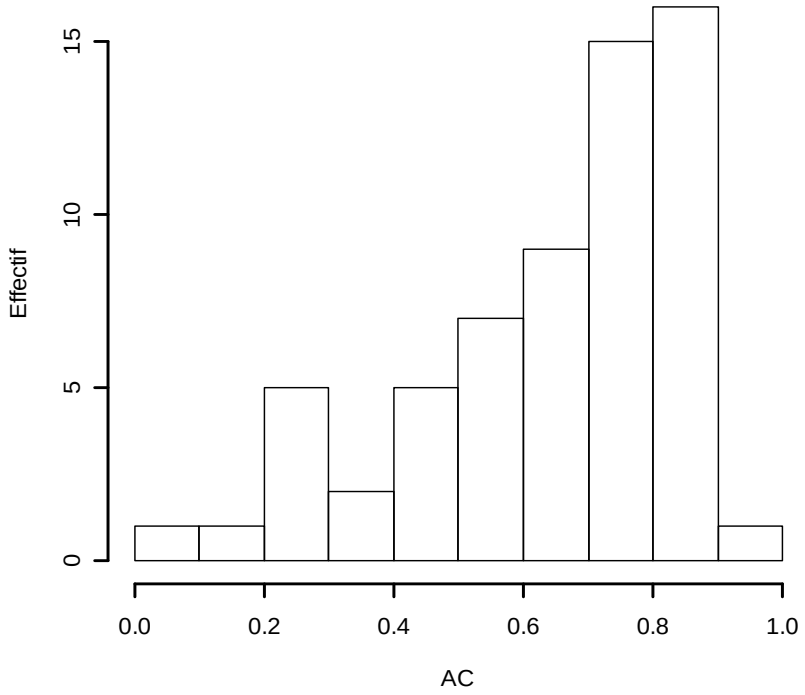


Figure 10 : histogramme de la répartition des valeurs du coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 des arbres des 3 parcelles étudiées.

3.2.2. VARIABILITE INTER-PARCELLES DE LA CROISSANCE EN DIAMETRE

3.2.2.1. Comparaison des dynamiques de croissance en fonction de l'âge

L'âge moyen des arbres carottés est de 38 ans dans la parcelle B6, 29 ans dans la parcelle M2 et de 67 ans dans la parcelle Pr1. La largeur moyenne de cernes est de 2,52 mm dans B6, 3,26mm à M2 et de 2,09 mm à Pr1.

Les arbres de chacune des parcelles suivent la même tendance trouvée sur la courbe moyenne (Figure 6) de tous les arbres en fonction de l'âge (croissance maximale à un âge donné puis stabilisation de croissance), sauf les arbres de la parcelle M2 dont la croissance a tendance à diminuer après avoir atteint sa valeur maximale (17 ans) (Figure 11). La densité élevée et donc la compétition pourraient expliquer cette diminution de croissance à cet âge-là.

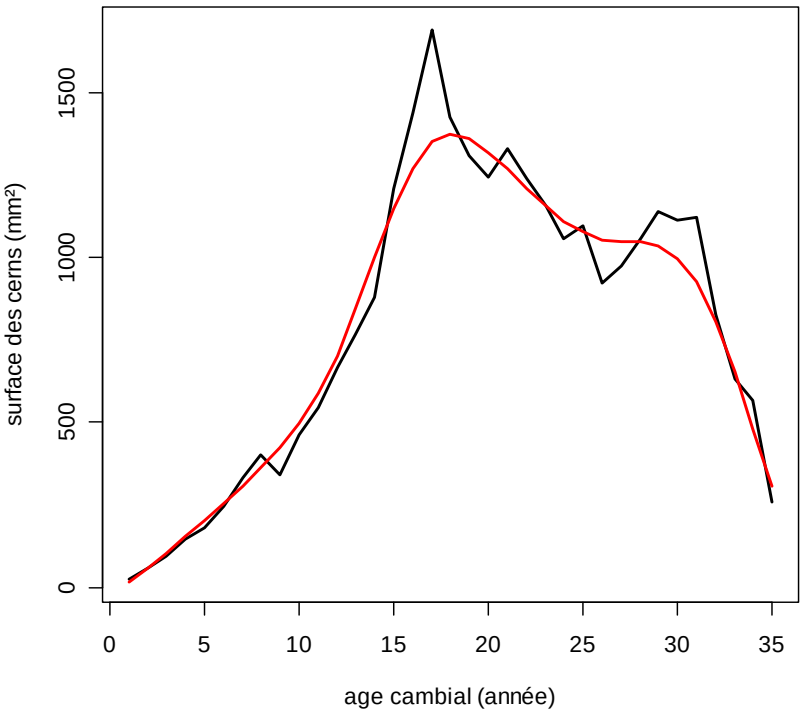


Figure 11 : surface moyenne des cernes des arbres de la parcelle M2 en fonction de l'âge des arbres lors de la formation de ces cernes. La ligne en rouge représente le lissage de cette relation.

3.2.2.2. Caractéristiques des peuplements basées sur les largeurs de cernes

- Le calcul de la sensibilité moyenne (SMi) des peuplements dans chaque parcelle sur la même période (1990-2006) montre que les peuplements des parcelles M2 et Pr1 ont des sensibilités moyennes proches (0,27, 0,29) malgré la différence d'âge entre eux, ce qui confirme que l'âge n'aurait pas d'influence sur la sensibilité au climat (voir paragraphe 3.2.13), alors que la parcelle B6 est moins sensible au climat (SM de 0,18) (Figure 12).

- Par ailleurs, le coefficient d'interdatation (SR) est relativement élevé dans la parcelle B6 (0,64; Figure 12), ce qui traduit une assez bonne homogénéité de réponse des arbres sur cette parcelle.

- L'estimation de la corrélation partielle entre cernes successifs par la fonction « pacf » dans R pour les individus de chaque parcelle, a montré que 95% des arbres de la parcelle B6 ont une corrélation entre la surface de cerne de l'année en cours avec la surface de cerne de l'année d'avant (autocorrélation d'ordre 1) et que 86% des arbres n'ont pas d'autocorrélations avec d'autres années précédentes. Pour la parcelle Pr1, tous les arbres ont une autocorrélation de l'ordre 1 et 50% n'ont pas d'autres corrélations d'autres ordres. 94% des arbres de la parcelle M2 ont des autocorrélations d'ordre 1 et 78% des arbres n'ont pas d'autres autocorrélations.

Le calcul de la moyenne par parcelle des **coefficients d'autocorrélation** AC individuels, a donné des valeurs très proches (0,40) dans les 3 parcelles quand ce coefficient est calculé sur des années communes entre les parcelles (16 ans) (Figure 12), alors qu'il donne des valeurs plus

élevées pour les arbres de la parcelle Pr1 et de la parcelle B6 (0,77 et 0,75) si on le calcule en utilisant tous les cernes disponibles pour les arbres étudiés de ces parcelles. Cela pourrait indiquer que la largeur de cerne des arbres de ces 2 parcelles est davantage dépendante de celle de l'année précédente que chez les arbres de la parcelle M2, mais ce sont aussi les deux parcelles les plus âgées.

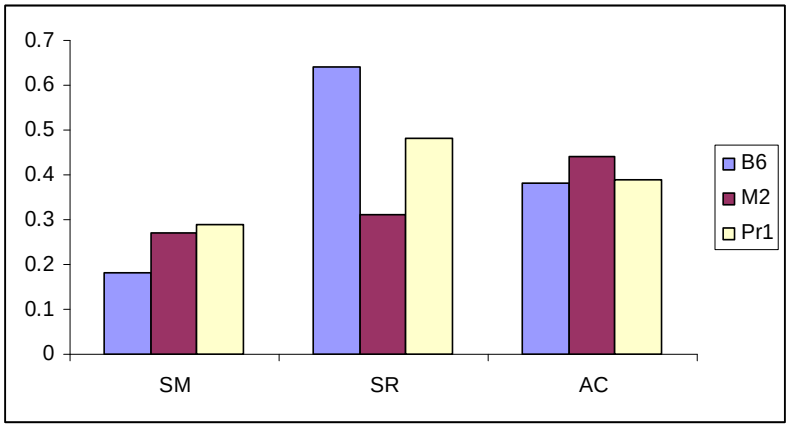


Figure 12 : comparaison des paramètres des largeurs de cernes entre les 3 parcelles.

3.2.2.3. Les années caractéristiques

Le nombre d'années « caractéristiques » calculé selon la méthode indiquée au paragraphe 2.3.3. varie d'une parcelle à l'autre (de 1 à 11 ans) (9 années positives et 10 années négatives) (Tableau 4).

Tableau 4 : Années caractéristiques dans les 3 parcelles.

site	**années positives**	**années négatives**	**nombre d'années positives**	**nombre d'années négatives**	**1ère année prise en compte**
B6	1973-1975-2002	1984-1990-1992-1995	3	4	1973
M2	1998		1		1990
Pr1	1948-1958-1974-1993-1999	1957-1965-1971-1976-1981-1992	5	6	1946

Cette variation est due à la longueur de la série des cernes étudiés (âge des parcelles). Ex. la parcelle Pr1 qui est la parcelle la plus âgée (série de cernes longue) a le nombre d'années caractéristiques le plus important (11 années).Seules les parcelles B6 et Pr1 présentent une

année caractéristique commune (année 1992). Cette année-là, les frênes ont réagit négativement (diminution de croissance de -18 % pour 70% des arbres de la parcelle B6 et de -22 % pour 80% des arbres de la parcelle Pr1). On trouve que l'effet des années caractéristiques positives sur les arbres est très fort dans les 3 parcelles (augmentation relative de croissance de 34 à 67%).

3.3. RELATION ENTRE CROISSANCE ET CLIMAT

On compare dans cette partie les années extrêmes (qui ont des données climatiques extrêmes) et les années caractéristiques (où on a des surfaces de cernes extrêmes par rapport à la surface du cerne de l'année précédente) pour avoir une idée des facteurs climatiques pouvant expliquer ces années caractéristiques. Ensuite, on teste directement les corrélations entre le climat et la croissance au niveau des parcelles en cherchant les facteurs climatiques déterminants de la croissance et on compare ces facteurs entre les parcelles. On essaie de comprendre l'effet de ces facteurs limitants et les différences entre les parcelles (s'il y en a).

3.3.1. COMPARAISON ENTRE ANNEES EXTREMES ET ANNEES CARACTERISTIQUES

En regardant les années caractéristiques (Tableau 4) et les années extrêmes (Annexe 4 et Tableau 2) au niveau des conditions climatiques, les relations ne sont pas évidentes entre les deux. Cependant, l'année 1984 qui est une année caractéristique négative sur les cernes des arbres de la parcelle B6, est une année extrême au niveau des précipitations (précipitations élevées surtout en septembre) et des températures qui sont très basses en mai dans la vallée de l'Adour. En outre, l'année 1971 qui est une année caractéristique négative sur les arbres de la parcelle Pr1, est aussi une année extrême au niveau des précipitations (surtout en février) et des températures basses en mars et juin.

L'année 1958 qui est caractéristique sur les arbres de Pr1, a les précipitations les plus élevées en avril par rapport aux autres années. L'année caractéristique 2002 sur les arbres de la parcelle B6, a les précipitations de mai les plus importantes par rapport aux autres années dans la vallée de l'Adour. On peut donc penser que les précipitations de printemps (avril- mai) pourraient avoir un effet positif sur la croissance de nos accrus de frêne et que les températures basses au printemps pourraient avoir un effet négatif sur cette croissance. Il semble que les précipitations annuelles élevées n'ont pas influencé la croissance.

3.3.2. CORRELATIONS ENTRE CROISSANCE ET CLIMAT AU NIVEAU DES PARCELLES

Les corrélations sont étudiées entre les données climatiques mensuelles et les surfaces de cernes des arbres de chaque parcelle étudiée. Ces corrélations sont exprimées par le ratio R/S (voir paragraphe 2.4. dans matériel et méthodes) présenté dans la figure 13.

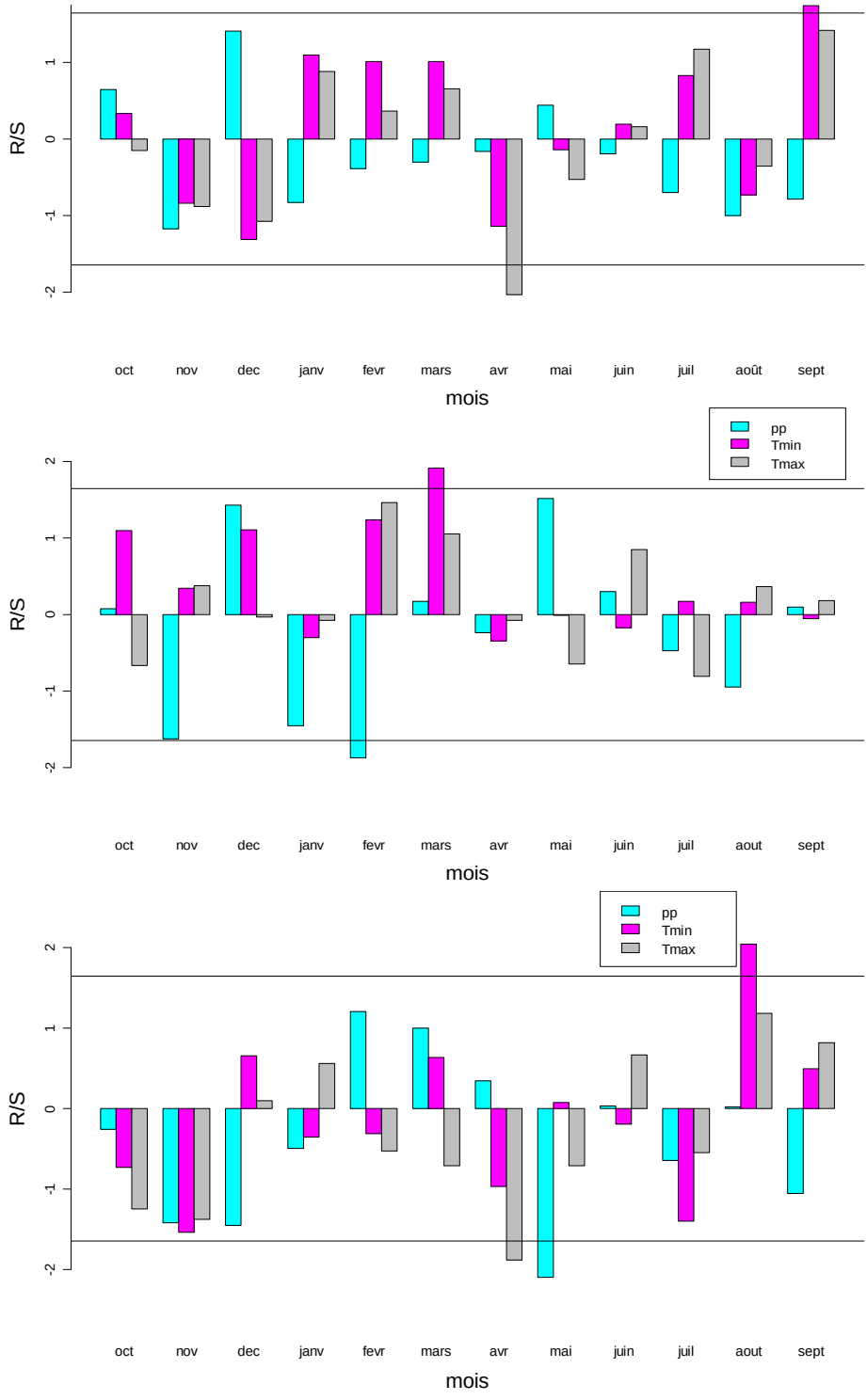


Figure 13 : Corrélations, exprimées en valeurs de R/S, entre les surfaces des cernes des arbres de la parcelle B6 (en haut), M2 (au milieu) et Pr1 (en bas), et les données climatiques mensuelles. pp représente les précipitations mensuelles, Tmin représente la température mensuelle minimale, et Tmax la température mensuelle maximale. Les lignes horizontales représentent le seuil de corrélation significative pour une probabilité de 90%.

Sur les arbres de la parcelle B6, on trouve que la température minimale de septembre a un effet significatif positif pour une probabilité de 90% (RS de 1,75) sur les surfaces des cernes et que la température maximale d'avril a un effet significatif négatif plus fort (pour une probabilité de 95%, RS de -2,04) sur ces surfaces de cernes (Figure 13). Pour les précipitations, aucun effet significatif n'a été observé sur les cernes des arbres de cette parcelle.

Pour les arbres de la parcelle M2, c'est la température minimale de mars (RS de 1,92) et les précipitations de février (RS de -1,87) qui influencent le plus les surfaces des cernes avec une probabilité de 90% (effet positif pour le premier facteur et négatif pour le deuxième).

La température minimale d'août a un effet significatif positif sur les surfaces des cernes des arbres de la parcelle Pr1 avec une probabilité de 95% (RS = 2,05). Par contre, la température maximale d'avril et les précipitations de mai ont des effets significatifs négatifs sur les arbres de cette parcelle (RS de -1,88 et de -2,10 respectivement).

3.3.3. COMPARAISON ENTRE PARCELLES AU NIVEAU DES FACTEURS CLIMATIQUES LIMITANT LA CROISSANCE

On voit que les facteurs climatiques limitant de la croissance dans deux parcelles qui appartiennent à deux vallées différentes (parcelles : B6 et Pr1) se ressemblent au niveau des températures (effet positif de la température minimale de fin d'été et effet négatif de la température maximale d'avril). Ce n'est pas le cas pour les précipitations qui ne semblent pas représenter un facteur limitant dans la parcelle B6. Pour la parcelle M2, on voit que les facteurs semblant limiter la croissance de ses arbres sont très différents de ceux trouvés dans les autres parcelles (même que ceux trouvés dans la parcelle Pr1 qui est dans la même vallée).

3.3.4. COMPARAISON ENTRE CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES DES ANNEES CARACTERISTIQUES ET LES FACTEURS CLIMATIQUES LIMITANT LA CROISSANCE

En regardant les facteurs climatiques limitants de la croissance dans chaque parcelle, au niveau des années caractéristiques, on trouve que 3/4 des années caractéristiques négatives pour B6 ont des températures maximales d'avril supérieures à la moyenne portant sur 48 années, alors que les années caractéristiques positives sont très variables au niveau de ce facteur. Pour la température minimale de septembre, 3/4 des années caractéristiques négatives dans cette parcelle ont des températures minimales de septembre inférieures à la moyenne pendant 48ans alors qu'aucune année positive n'a une température minimale supérieure à la moyenne en septembre.

Pour la parcelle Pr1, 4/5 des années caractéristiques négatives ont des températures maximales d'avril supérieures à la moyenne, alors que 2/3 des années caractéristiques positives ont des températures maximales inférieures à la moyenne en avril. En ce qui concerne la température minimale d'août, 4/5 des années caractéristiques négatives ont des températures inférieures à la

moyenne, alors que 1/3 des années caractéristiques positives (l'année 1999) a une température supérieure à la moyenne. En fait, la croissance importante en 1999 pourrait être due à la température minimale relativement élevée en août de cette année-là et à la Tmin élevée en août de l'année précédente (Tmin extrême en août 1998), ce qui aurait permis une mise en réserve d'assimilats disponibles pour la croissance en 1999. Au niveau des précipitations de mai, seulement 2/6 des années négatives ont des précipitations supérieures à la moyenne. Par contre, 3/4 des années positives ont des précipitations inférieures à la moyenne.

L'année positive trouvée à M2 (1998), a peu de précipitations en février et une température minimale élevée en mars. Ce qui pourrait confirmer que ces facteurs sont limitant de la croissance dans cette parcelle.

3.4. BILAN HYDRIQUE

La parcelle B6 n'a montré aucun déficit hydrique durant l'année, alors que les arbres des parcelles de la vallée du Gave de Pau (M2 et Pr1) présentent une régulation stomatique à partir de la 3ème décade de juillet jusqu'à fin août (Figure 14).

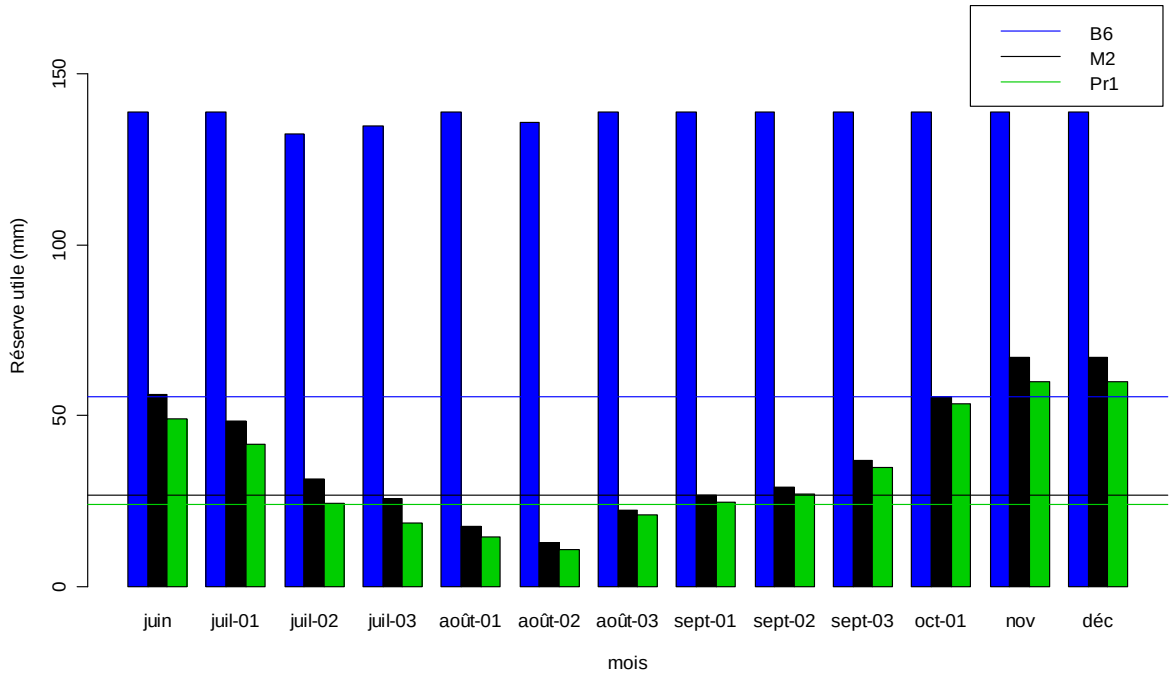


Figure 14 : Evolution moyenne de la réserve utile en eau calculée entre juin et décembre dans les 3 parcelles. 01, 02, 03 représentent les 3 décades successives des mois. Les lignes horizontales représentent les seuils de régulation stomatique sur chaque parcelle.

4- DISCUSSION

On aborde dans cette discussion les relations entre croissance et climat sous deux angles correspondant chacun à deux types de variabilités des paramètres climatiques : d'une part, sous l'angle de la variabilité inter-annuelle des caractéristiques annuelles globales du climat, et d'autre part de sous l'angle de la variabilité inter-annuelle des caractéristiques mensuelles du climat. On discute ensuite les résultats relatifs au bilan hydrique et on donne quelques limites et perspectives concernant ce chapitre.

4.1. RELATION ENTRE LA CROISSANCE ET LES PARAMETRES ANNUELS DU CLIMAT

Malgré quelques différences entre les paramètres climatiques des 2 vallées, on peut considérer que ces deux vallées ont le même climat, un climat de température moyenne annuelle de 3,1°C en janvier et de 16,2 °C en juillet. Ce climat correspond bien à un climat océanique avec une composante montagnarde apparaissant sous la forme d'un effet important de l'altitude sur les variations de température.

La stabilité relative des températures maximales d'une année à l'autre n'a pas pu être identifiée comme une particularité du climat pyrénéen et est peut-être une caractéristique climatique plus générale.

On pourrait penser a priori qu'un facteur limitant est un facteur relativement variable, qui franchit de ce fait plus facilement des seuils fonctionnels, limitant un processus comme la croissance, mais ce n'est pas vrai dans notre cas où les facteurs limitants mis en évidence ne sont pas très variables. La température maximale d'avril est par exemple un facteur limitant de la croissance de nos accrus de frêne (CV de 21,31% dans la vallée de l'Adour et de 12,8% dans la vallée du Gave de Pau). Cette « limitance » signifie qu'un petit changement dans ces facteurs limitants entraîne un changement important de croissance. Cela pourrait indiquer soit une sensibilité élevée de nos accrus de frêne à ces facteurs limitants, soit l'existence de valeurs seuils de ces facteurs.

Parmi les 11 années caractéristiques trouvées sur les arbres de nos parcelles, 7 années ont été identifiées sur des peuplements de hêtre et de chêne pédonculé dans les Hautes-Pyrénées (Lebourgeois, 2005 ; Lebourgeois, 2006). En fait, l'année humide de 1958 et l'année sèche de 1976 sont remarquables au niveau européen car elles sont été observées dans de très nombreux peuplements feuillus (Kelly *et al.*, 1989; Lebourgeois *et al.*, 2004; Lebourgeois, 2006). Dans la parcelle Pr1, l'année positive 1958 s'est traduite par une augmentation de croissance de 41%. Avec la source présente dans Pr1, on pense que l'augmentation de croissance pendant une année humide n'est pas due à la pluviométrie mais à d'autres facteurs comme la température dont on ne dispose pas des valeurs pour cette année-là dans les deux vallées. Par contre, l'année sèche de 1976, s'est manifestée par une diminution de croissance de 13%, mais avec la source de cette

parcelle on pense que ce n'est pas le déficit hydrique qui a causé cette diminution, mais plutôt la température minimale très basse de janvier de cette année-là (-2.6 °C) par un effet négatif de gel hivernal. En effet, ce gel pourrait endommager les arbres et donc leur croissance en provoquant soit une cavitation (Cochard, 2006) soit une contraction des cellules pour abaisser le point de congélation interne (Cochard, 2007).

Les années remarquables au niveau des précipitations ne sont jamais des années caractéristiques. Il semble donc que la pluviométrie de ces années n'a pas influencé les largeurs de cernes. L'année 1984 qui est remarquable au niveau de la température maximale et minimale de mai (très basses) dans la vallée de l'Adour, est une année caractéristique négative. On pense que le démarrage de croissance dans ces zones montagneuses où la croissance commence tard (débourrement à partir de début avril) a été retardé par ces températures. Dans la vallée du Gave de Pau, l'année 1971 qui a les températures les plus basses en mars, est une année caractéristique négative pour Pr1. En fait, cette année a eu des températures minimales inférieures à zéro à partir de décembre jusqu'à la première décade de mars (-5°C). Les arbres de la parcelle Pr1 ont donc subi un gel hivernal important en 1971, ce qui explique la réduction de leur croissance (Lebourgeois, 2006).

La période 1979-1987 où la température maximale dans les parcelles M2 et Pr1 devient plus élevée que pour la parcelle B6 (Figure 5), est en particulier marquée par la faible croissance des arbres de la parcelle Pr1 lors de l'année caractéristique négative 1981, qui a une température maximale d'avril élevée.

Les années extrêmes même au niveau des facteurs climatiques limitants ne sont pas toujours des années caractéristiques, et les années caractéristiques n'ont pas toujours des caractéristiques extrêmes, ce qui limite l'intérêt des années caractéristiques dans notre cas et ne permet pas leur interprétation en termes climatiques. En fait, il faut garder à l'esprit que le calcul des ERC traite de croissances relatives et non absolues, mettant en avant des accroissements significativement différents de l'année précédente. Par exemple, si une année à croissance exceptionnellement forte est suivie par plusieurs années à croissance exceptionnellement faibles, les ERC ne révèleront que la première année de la série à croissance faible.

De plus, on a trouvé que le frêne a une « mémoire » de croissance par rapport à l'année précédente de l'année de croissance (autocorrélation importante d'ordre 1) (paragraphes : 3.2.1.2., 3.2.2.2.). Cela pourrait aussi expliquer la non-correspondance entre les années caractéristiques et les facteurs limitants de la croissance. Par exemple, une année de bonne croissance pourrait avoir des valeurs des facteurs climatiques contemporains peu favorables, mais des valeurs plus favorables l'année précédente, à l'origine de réserves de carbohydrates réutilisés l'année suivante.

Les caractéristiques de certaines années caractéristiques ne peuvent pas correspondre de ce fait aux facteurs limitants de la croissance.

Comparaison entre parcelle

On peut considérer que la sensibilité au climat des arbres des parcelles M2 et Pr1 est relativement élevée car les valeurs de la sensibilité moyenne (SMi) (0,27, 0,29) sont proches des valeurs trouvées pour le hêtre (connu comme espèce sensible au climat) et le chêne par Lebourgeois (2002). Par contre, la parcelle B6 est moins sensible au climat (SMi de 0,18). Le confinement de la parcelle B6 rendrait peut-être ces arbres moins sensibles aux variations climatiques, mais leurs réponses au climat sont relativement homogènes (un coefficient d'interdatation SR de 0,64), ce qui pourrait être lié à l'homogénéité des âges des arbres de cette parcelle (de 36 à 40 ans contre 17 à 35 ans sur M2 et 62 à 78 ans sur Pr1).

Les valeurs proches de SMi des parcelles M2 et Pr1 calculées sur la même période, malgré leur différence d'âge, pourraient indiquer que l'âge n'aurait pas d'influence sur la sensibilité au climat. Cette hypothèse est confirmée aussi par la valeur stable de la Sensibilité individuelle Sj moyenne de tous les arbres des 3 parcelles (0,24) même si elle est calculée avec des arbres plus âgés.

D'un point de vue statistique, on pense que plus la série d'années étudiées pour calculer l'autocorrélation d'ordre 1 est longue, plus cette autocorrélation a une probabilité élevée d'être élevée. Cette hypothèse est confirmée par les valeurs faibles de AC des peuplements de Pr1 et B6 (0,40) lors de l'utilisation des séries courtes (16 années), alors qu'elles étaient élevées quand on a utilisé des séries plus longues (0,77 pour Pr1 et 0,75 pour B6). Cela expliquerait aussi la valeur faible de ce coefficient pour le peuplement de M2 (0,40) car on a utilisé des années communes entre les arbres de cette parcelle (16 années), alors qu'on a trouvé des autocorrélations plus importantes quand elles sont calculées sur toutes les années disponibles de tous les arbres de cette parcelle (une valeur minimale de AC de 0,56 et une valeur maximale de 0,92).

4.2. CORRELATION ENTRE LA CROISSANCE ET LES PARAMETRES MENSUELS DU CLIMAT

En France comme dans les autres pays, les études visant à expliquer le déterminisme climatique de la croissance radiale du frêne commun par une approche dendroécologique sont très rares. Une étude dans le nord de l'Iran a montré que les largeurs de cernes du frêne commun sont surtout influencées par les précipitations de mai de la 2ème année précédant l'année de croissance et celles de mars de la 3ème année précédant l'année de croissance (effet positif) ; mais curieusement elle n'a pas trouvé de relation de la croissance avec les conditions climatiques de l'année en cours ou celles de l'année précédente (Jalilvand, 2008). La différence du climat entre cette zone et notre zone d'étude explique sans doute la différence des résultats. Nos résultats sont aussi différents de ce qui a été trouvé en Angleterre par Wardle (1961), où les précipitations de mai influencent positivement la croissance radiale du frêne. Par contre, nos résultats sont comparables à ce qui a été trouvé pour le hêtre dans l'est du massif des Alpes (un effet positif de la température de septembre et un effet négatif des précipitations de mai dans les

montagnes et les hautes montagnes). Ces résultats montrent le rôle joué par la région climatique dans la nature des paramètres influents.

L'effet positif de la température minimale d'août ou de septembre sur la croissance des arbres des parcelles B6 et Pr1 pourrait être dû à une prolongation de la saison de végétation suite à l'augmentation de Tmin de ces mois, ce qui contribuerait à augmenter l'épaisseur des parois des cellules de bois d'été (Lebourgeois *et al.*, 2005 ; Di Filippo *et al.*, 2007) et donc d'avoir un cerne plus large.

L'augmentation de la température maximale d'avril, qui est le mois de débourrement du frêne dans ces zones étudiées, (observation personnelle), pourrait causer un « coup de chaleur » et endommager les bourgeons et donc le développement des feuilles et la croissance.

La relation négative entre les précipitations de mai et la croissance des arbres de la parcelle Pr1 peut être expliquée par la sensibilité du frêne à la saturation de sol en eau, surtout avec les précipitations élevées dans notre zone d'étude, s'ajoutant à la neige fondue à cette période-là et surtout à la source existante dans cette parcelle, ce qui pourrait entraîner une saturation en eau pendant le mois de mai et donc une mauvaise oxygénation des racines. Cette justification peut être confirmée par l'absence de l'effet des précipitations de mai sur les arbres de la parcelle B6 et même sur la parcelle M2 où il n'y a pas de source qui pourrait entraîner la saturation en eau.

Pour la parcelle M2, la longueur limitée de la série des années utilisée pour M2 à cause de l'âge jeune des arbres de cette parcelle rend les résultas trouvés moins fiables au niveau statistique. De plus, à cet âge-là, un peuplement forestier est réputé peu sensible aux facteurs climatiques (compétition forte et faible hiérarchisation entre les arbres). C'est pourquoi les facteurs semblant limiter la croissance de ces arbres sont très différents de ceux trouvés dans les autres parcelles (même de ceux trouvés dans la parcelle Pr1 qui est dans la même vallée).

Il est possible que les facteurs limitants de la croissance de nos accrus de frêne des Pyrénées ne soient donc pas les mêmes facteurs pour d'autres accrus dans d'autres sites. Notre zone d'étude est influencée par un climat océanique, avec une température minimale annuelle de 4,6 °C, une température maximale annuelle de 13,8 °C et des précipitations annuelles de 1164 mm. Pour d'autres espèces comme le chêne, il a été trouvé que la réponse au climat est très variable d'un peuplement à l'autre et il est difficile de déterminer les facteurs climatiques déterminants de la croissance du chêne (Lebourgeois, 2006) par rapport au hêtre. Pour les chênes en général, selon la région étudiée, ce sont les précipitations de printemps et d'automne, ou le bilan hydrique estival ou printanier de l'année de croissance, ou encore les températures hivernales ou le climat de l'automne précédent qui sont déterminants pour la croissance radiale (Lebourgeois et al., 2004 ; Lebourgeois, 2006). De même chez le frêne, le climat n'a pas les mêmes facteurs limitants selon le degré d'inondation (Tardif and Bergeron, 1997), et peut même ne pas avoir d'effets significatifs dans certains cas (Merton, 1970).

4.3. BILAN HYDRIQUE

Dans notre zone d'étude, le déficit hydrique ne peut pas expliquer la croissance des accrus de frêne car il est faible. La faiblesse de ce facteur est due à des précipitations et à une RUM élevées dans la parcelle B6 (RUM=139 mm). Les mêmes résultats ont été trouvés par Lebourgeois (2005) pour un peuplement de hêtre dans les Hautes-Pyrénées où le plus faible déficit hydrique a été noté par rapport à 14 autres peuplements de hêtre dans d'autres régions de France (RUM de 188mm), alors que ce facteur et surtout la sécheresse en début d'été (juin-juillet) limite la croissance radiale de hêtre dans une grande gamme de conditions pédo-climatiques en Europe (elle explique 7,9-30,6% de la variation de croissance dans plusieurs régions en France) (Lebourgeois, 2005). Dans la parcelle Pr1, la valeur faible de RUM (60mm) et les précipitations non corrigées selon l'altitude de cette parcelle à cause de l'absence de critères généraux de correction, entraînent un déficit hydrique possible pendant les derniers dix jours de juillet et le mois d'août, mais ce déficit hydrique est compensé par la source, non-prise en compte dans le calcul du bilan hydrique, existante dans cette parcelle. Pour la parcelle M2, en plus des précipitations non corrigées, le déficit hydrique trouvé dans cette parcelle serait dû aussi à une valeur faible de RUM (67mm) qui risque de n'être pas correcte à cause d'une incertitude sur la profondeur de sol exploitable par les racines et du pourcentage de cailloux en profondeur élevé (60%) qui n'empêcherait pas les racines de trouver de l'eau à une distance non-prise en compte dans le calcul de la réserve utile dans cette parcelle, et ce qui augmenterait la valeur de RUM. On pense en effet que les racines, en cherchant l'eau, peuvent aller davantage en profondeur.

De ce fait, on considère que le déficit hydrique qu'on a estimé dans les deux parcelles (M2 et Pr1) n'est pas réel et qu'il ne peut donc pas expliquer la croissance de nos accrus de frêne dans les 3 parcelles étudiées. Ces résultats confirment notre hypothèse de départ que dans nos peuplements de montagne où les précipitations sont disponibles toute l'année, le déficit hydrique ne serait pas un facteur limitant de leur croissance.

Cette étude met en évidence que sur ces sites de région montagneuse, il semblerait que les températures aient un impact plus important que les précipitations sur la croissance du frêne. Ainsi, de bonnes températures minimales à la fin de la saison de végétation (août-septembre), sont favorables au développement du cerne. Il semblerait aussi que des températures maximales élevées en avril, défavorisent la croissance en diamètre. Il reste toutefois de nombreuses zones d'ombre qui peuvent être expliquées par des imperfections liées à la méthode où encore par des lacunes dans les connaissances de la biologie du frêne.

4.4. LIMITES DE L'ETUDE

Le logiciel 3Pbase a été utilisé pour analyser les corrélations entre la croissance et les paramètres climatiques. Ce logiciel utilise l'indice moyen de croissance pour chaque année ce qui signifie qu'il ne prend pas en compte la variation individuelle de cet indice et donc la fiabilité de la moyenne. De plus, ce logiciel fonctionne avec la fonction réponse bootstrapée qui, à partir d'une série même courte de cernes est capable, par rééchantillonnage partiel des données

climatiques (bootstrap), de créer des échantillons virtuels nombreux mais donc peu informatifs dans ce cas, et d'aboutir ainsi malgré tout à attribuer trop de « poids » relatif à des événements climatiques rares.

De plus, l'utilisation des arbres jeunes donne des séries courtes de largeurs de cernes, ce qui ne peut pas donner trop de fiabilité statistiquement aux résultats de l'analyse de la corrélation entre ces largeurs et les paramètres climatiques quelle que soit la méthode de l'analyse statistique utilisée.

Avec un effectif plus important d'arbres, de peuplements et des séries plus longues, l'étude de la corrélation serait plus fiable et les résultats plus sûrs.

4.5. RECOMMANDATIONS ET PROPOSITIONS

- une utilisation de séquences temporelles plus longues (>50 ans) est à recommander pour obtenir des résultats plus fiables.

- Il serait intéressant d'étudier simultanément plusieurs parcelles pour nuancer l'effet du climat selon les stations et l'âge (ce dernier n'ayant pas d'effet ici), afin de pouvoir généraliser davantage les relations climat- frêne. Pour approfondir l'étude de l'interaction âge/ sensibilité de la croissance au climat, il faudrait peut-être mesurer la sensibilité au climat par tranches d'âges sur le même peuplement.

- Une amélioration envisageable de cette étude serait de séparer l'influence du changement climatique des 20 dernières années de celui dû aux fluctuations indépendantes du réchauffement.

- Il est nécessaire d'augmenter le nombre de peuplements étudiés, en particulier en prenant en compte les 2 parcelles d'Arreau (complément de prélèvement de carottes), qui ont à la fois un âge suffisant, et représentent 2 stations très différentes dans une même vallée (donc sous un même climat).

Bibliographie

Anonyme, 2009, Atmosphère normalisée,
http://wapedia.mobi/fr/Atmosph%C3%A8re_normalis%C3%A9e

Bednarz, Z., Ptak, J., 1990. The influence of temperature and precipitation on ring widths of oak (*Quercus robur* L.) in the Niepolomice forest near Cracow, southern Poland. Tree-Ring Bulletin 50, 1-10.

Charre, J., 1997. Dessine-moi un climat. Que penser du diagramme ombrothermique? Mappe Monde 2, 29-31.

Cochard, H., 2006. Cavitation in trees. Comptes Rendus Physique 7, 1018-1026.

Cochard, H., 2007. Pourquoi les feuilles tombent ?,
http://www.inra.fr/la_science_et_vous/apprendre_experimenter/questions_d_actu/2007/chute_des_feuilles.

Delarue, A., Larrieu, L.. 2002. Adishatz : Aide à l'interprétation des analyses de sol à usage forestier (Version 2). Rapport CRPF Midi-Pyrénées. 10 p.

Di Filippo, A., Biondi, F., Cufar, K., De Luis, M., Grabner, M., Maugeri, M., Presutti Saba, E., Schirone, B., Piovesan, G., 2007. Bioclimatology of beech (*Fagus sylvatica* L.) in the Eastern Alps: spatial and altitudinal climatic signals identified through a tree-ring network. Journal of Biogeography 34, 1873-1892.

Duchaufour, P., 1970. Physique du sol. In:Précis de pédologie. Paris, 27-86.

Fritts, H. C.1976. Tree rings and climate. 567 p.

Gonzales, E.. 2007. Quel potentiel sylvicole pour les accrus de frêne dans les Hautes Pyrénées? Détermination des facteurs climatiques et stationnels limitant la croissance de *Fraxinus excelsior* dans les Hautes-Pyrénées. Mémoire de fin d'étude. Ecole Nationale d'Ingénieurs des Traveaux Agricoles (ENITA) de Bordeaux. 60 p.

Granier, A., Badeau, V., Bréda, N., 1995. Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. Revue Forestière Francaise XLVII [n°sp], 59-68.

Granier, A., Breda, N., 1996. Intra- and interannual variation of transpiration, leaf area index and radial growth of sessile oak stand (*Quercus petrea*). Annales des Sciences Forestières 53, 521-536.

Guiot, J., 1991. The bootstrapped response function. Tree-Ring Bulletin 51, 39-41.

Guiot, J., Goeury, C., 1996. PPPBase, a software for statistical analysis of paleoecological and paleoclimatological data. Dendrochronologia 14, 295-300.

Gutierrez, E., 1988. Dendroecological study of *Fagus silvatica* L. in the Montseny mountains (Spain). Acta oecologica. Oecologia plantarum 9, 301-309.

Jalilvand, H., 2008. Tree-ring growth response of common ash (*Fraxinus excelsior* L.) to climatic variables using multiple regressions. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources 11, 597-610.

Kelly, P.M., Munro,A.R., Hughes,M.K., Goodess,C.M., 1989. Climate and signature years in west European oaks. Nature 340, 57-60.

Kerr, G., Cahalan, C., 2004. A review of site factors affecting the early growth of ash (*Fraxinus excelsior* L.). Forest Ecology and Management 188, 225-234.

Le Goff, N., Granier, A., Ottorini, J.M., Le Gall, K., Peiffer,M., 1995. Croissance du Frêne, structure de l'appareil photosynthétique et disponibilité en eau. Revue Forestière Française 48, 156-164.

Lebourgeois, F., 1999. Les chênes sessile et pédonculé (*Quercus petraea* Liebl. et *Quercus robur* L.) dans le réseau RENECOFOR : rythme de croissance radiale, anatomie du bois, de l'aubier et de l'écorce. Revue Forestière Francaise 51, 522-536.

Lebourgeois, F., 2000. Climatic signals in earlywood, latewood and total ring width of Corsican pine from western France. Annals of Forest Science 57, 155-164.

Lebourgeois, F., 2002. La dendrochronologie. In: FIF-ENGREF (Ed.).

Lebourgeois, F., 2005. Approche dendroécologique de la sensibilité du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) au climat en France et en Europe. Revue Forestière Française 57, 33-50.

Lebourgeois, F., 2006. Sensibilité au climat des chênes sessile et pédonculé dans le réseau RENECOFOR. Comparaison avec les hêtraies. Revue Forestière Française 58, 29-44.

Lebourgeois, F., Bréda, N., Ulrich,E., Granier, A., 2005. Climate-tree-growth relationships of European beech (Fagus sylvatica L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). Trees 19, 385-401.

Lebourgeois, F., Cousseau, G., Ducos, Y., 2004. Climate-tree-growth relationships of Quercus petraea Mill. stand in the Forest of Bercé ("Futaie des Clos", Sarthe, France). Annals of Forest Science 61, 361-372.

Lebourgeois, F., Granier, A., Bréda, N., 2001. Une analyse des changements climatiques régionaux en France entre 1956 et 1997. Réflexions en terme de conséquences pour les écosystèmes forestiers. Annals of Forest Science 58, 733-754.

Martin, P.1974. Analyse des cernes. Dendrochronologie et dendroclimatologie. 78 p.

Merton, L.F.H., 1970. The history and status of the woodlands of the Derbyshire limestone. Journal of Ecology 58, 723-744.

Pinto,P.E., Gégout,J.C., 2005. Assessing the nutritional and climatic response of temperate tree species in the Vosges Mountains. Annals of Forest Science 62, 761-770.

Poivesan, G., Schirone, B., 2000. Winter north atlantic oscillation effects on the tree rings of the italian beech (*Fagus sylvatica* L.). International Journal of Biometeorology 44, 121-127.

R Development Core Team. 2008. R: A Language and Environment for Statistical Computing.

Rinn, F., 1996. TSAP - Time Series Ananlysis Program. For applications in forestry, tree-rings laboratories and dendrochronology. Rinntech.

Rozas, V., 2001. Detecting the impact of climate and disturbances on tree-rings of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in a lowoland forest in Cantabria, Northern Spain. Annals of Forest Science 58, 237-251.

Rozas, V., 2003. Tree age estimates in Fagus sylvatica and Quercus robur : testing previous and improved methods. Plant ecology 167, 193-212.

Rozas, V., 2005. Dendrochronology of pedunculate oak (Quercus robur L.) in an old-growth pollarded woodland in northern Spain: tree-ring growth responses to climate. Annals of Forest Science 62, 209-218.

Spiecker, H., 2002. Tree rings and forest management in Europe. Dendrochronologia 20, 191-202.

Tardif, J., Bergeron, Y., 1997. Comparative dendroclimatological analysis of two black ash and two white cedar populations from contrasting sites in the Lake Duparquet region, northwestern Quebec. Canadian Journal of Forest Research 27, 108-116.

Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review 38, 55-94.

Timbal, J., 2002. Analyse retrospective de la croissance radiale et mise en relation avec le bilan hydrique dans un dispositif d'intensité d'éclaircie de pin maritime dans les Landes de Gascogne. Annals of Forest Science 59, 205-217.

Wardle, P., 1961. Fraxinus excelsior. Journal of Ecology 49, 739-751.

Wattel, B., 1998. Les feuillus précieux en forêt paysanne: évaluation de la ressource et de la croissance. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale d'Ingénieurs des Travaux Agricoles (ENITA) de Toulouse.
70 p.

CHAPITRE 4 :
CROISSANCE -COMPETITION

1. INTRODUCTION

La compétition est un terme utilisé pour décrire l'interaction entre plantes où au moins deux plantes sont en concurrence pour la même ressource comme la lumière, l'eau, la nutrition (Woodall *et al.*, 2003).

Elle peut avoir lieu entre les espèces (interspécifique) ou entre les individus de même espèce (intra-spécifique). Dans tous les cas, cette compétition peut influencer la croissance des plantes et la qualité du bois dans le cas des espèces ligneuses. Elle peut aussi être un des facteurs majeurs qui changent la structure et la dynamique de la communauté végétale surtout dans le cas de la compétition interspécifique (Tilman 1990 cité par Bloor *et al.*, 2008). Cette compétition ne se présente pas qu'au niveau des tiges mais elle peut aussi se produire au niveau des racines même si ce niveau de compétition n'est pas souvent pris en compte lors de l'étude de la compétition (Casper & Jackson, 1997). L'importance relative de la compétition au-dessus et au-dessous du sol dépend de l'espèce, des ressources disponibles, de la période et de la durée de l'interaction (Bloor *et al.*, 2008). L'effet de ce niveau de compétition n'est pas négligeable car il peut faire diminuer la croissance des tiges d'une manière importante. Par exemple, l'effet de la compétition aérienne entre les semis du frêne et les herbacées peut être faible alors que la compétition au niveau des racines fait diminuer la croissance des tiges de 90% (Bloor *et al.*, 2008).

La compétition entre arbres est quantifiée par des indices de compétition. L'indice de compétition est une formulation mathématique qui décrit la compétition causée sur la croissance d'un arbre cible par des arbres voisins (Schreuder & Williams, 1995). Certaines études suggèrent que la surface de la zone d'influence sur laquelle s'exerce la compétition est un élément majeur de cet indice dans la mesure où chaque arbre puise ses ressources sur une surface limitée. Les indices dépendants de la distance essaient ainsi de quantifier la zone individuelle d'influence de l'arbre (Woodall *et al.*, 2003). Ils considèrent que la contribution d'un arbre à la compétition dépend de sa dimension et de sa distance à l'arbre cible (Wimberly & Bruce Bare, 1996). Par contre, les indices indépendants de la distance se basent seulement sur la distribution des dimensions des arbres (Wimberly & Bruce Bare, 1996). Certains auteurs montrent que les deux types d'indices de compétition ont la même capacité à prédire la croissance (Holmes & Reed, 1991 cité par Wimberly & Bruce Bar, 1996). De toutes façons, il faut que l'indice de compétition soit simple et facile à mesurer lors du choix de cet indice (Richardson *et al.*, 1999).

En Europe centrale, l'éclaircie est considérée comme la principale intervention qui influence le développement des forêts. C'est un outil important pour contrôler la densité des peuplements afin d'augmenter la croissance des arbres et d'améliorer leur qualité (Zeide, 2001; Juodvalkis *et al.*, 2005).

L'éclaircie augmente les ressources disponibles pour les arbres restants en réduisant la compétition au-dessus et au-dessous du sol : la surface de transpiration et la densité des racines sont diminuées, et l'éclairement des houppiers est amélioré (Cañellas *et al.*, 2004). En fait,

l'élimination des arbres par l'éclaircie modifie le microclimat, ce qui entraîne un changement du comportement écophysiologique des arbres : l'amélioration de la disponibilité en eau du sol due à l'éclaircie conduit à une réduction de l'intensité et de la durée du stress hydrique en été, l'augmentation de la lumière surtout pour la partie basse du houppier fait augmenter la masse foliaire ce qui favorise la photosynthèse, l'amélioration de la lumière entraînée par l'éclaircie fait augmenter la température de la surface du sol et cela conduit à une minéralisation plus rapide de l'humus. Une ou plusieurs de ces nouvelles conditions améliorera donc la croissance des arbres (Aussenac, 2000). Pour toutes ces raisons, l'éclaircie est une opération essentielle de la pratique sylvicole (Pradé, 1967 cité par (Timbal, 2002)

L'intervention sylvicole (comprenant l'éclaircie) ne permet pas seulement d'obtenir une augmentation de la valeur économique des peuplements, mais aussi de changer la structure de ces peuplements en les ouvrant, d'augmenter ainsi leur valeur paysagère, de réduire le risque d'incendie (Cañellas *et al.*, 2004) et d'améliorer la biodiversité (Zeide, 2001; Parker *et al.*, 2001; Boncina *et al.*, 2007).

L'éclaircie peut influer sur la croissance de la tige en diamètre, en surface terrière et en hauteur (Cañellas *et al.*, 2004 ; Juodvalkis *et al.*, 2005; Boncina *et al.*, 2007) et sur la croissance du houppier qui essaie d'occuper l'espace rendu récemment disponible grâce à l'éclaircie. Cela permet une augmentation de la croissance des houppiers et de la production en volume (Juodvalkis *et al.*, 2005), ainsi qu'une amélioration de la forme de l'arbre et de la qualité du bois. Pour le hêtre par exemple, la qualité du bois correspondant à des usages rémunérateurs dépend du traitement sylvicole tant en ce qui concerne les propriétés physiques et mécaniques (densité, dureté, rétractibilité, résistances) (Bouchon *et al.*, 1989).

En général, l'effet de l'éclaircie concerne surtout la croissance en diamètre (Hamilton, 1981). Les études de l'effet de l'éclaircie sur la croissance en diamètre sont nombreuses pour plusieurs espèces et sur une large gamme géographique. L'éclaircie influence positivement la croissance des arbres en diamètre. Par exemple, l'augmentation de l'intensité d'éclaircie entraîne une augmentation de la croissance en dbh sur le chêne tauzin en Espagne (Cañellas *et al.*, 2004) et sur l'épicéa de Sitka, le douglas et le pin noir en Écosse (Hamilton, 1981).

L'effet de l'éclaircie ne varie pas seulement en fonction du mode de croissance de l'arbre (diamètre, hauteur,…), de l'espèce, et de l'intensité d'éclaircie, mais aussi en fonction de la qualité de site, de l'âge de peuplement, (Bouchon *et al.*, 1989 ; Juodvalkis *et al.*, 2005) et de la dimension initiale des arbres. Il a été montré par exemple que plus la dimension des pins (*Pinus ponderosa*) augmente, plus leur réponse à la compétition diminue (Woodall *et al.*, 2003). La durée de cet effet varie aussi selon l'espèce. Cet effet commence tout de suite après l'éclaircie et dure 10 ans pour le chêne noir (*Quercus velutina*), alors que l'effet ne commence qu'après 6-7 ans après éclaircie et il dure 12 ans sur le chêne écarlate (*Quercus coccinea*) (Cutter *et al.*, 1991). Dans des plantations de *Pinus radiata*, l'effet de la compétition (avec les herbacées) est immédiat sur la croissance en diamètre (pour le même arbre, l'effet est le même quand il a 1, 2 ou 3 ans), alors que ce n'est pas le cas pour l'effet de la compétition sur la croissance en hauteur (effet plus important à l'âge de 3 ans qu'à 1an) (Richardson *et al.*, 1999).

Le frêne fait partie des espèces dispersées auxquelles la sylviculture s'est rarement intéressée dans le passé. Aujourd'hui, la demande commerciale pour ces espèces est devenue supérieure à l'offre. La qualité de leur bois a permis de trouver des débouchés nouveaux et un plein essor (Thill, 1986).

Le bois de frêne se scie et se tranche, s'usine et se ponce, se colle facilement. Au niveau des propriétés mécaniques, il est l'un des meilleurs bois relativement aux autres bois feuillus indigènes d'usage courant. Sa dureté et son élasticité permettent de l'utiliser pour les outils qui demandent ces propriétés et de l'utiliser pour les meubles surtout grâce à sa couleur claire (Nepveu, 1992; Joyce, 1998). Pour profiter de ce bois aux caractéristiques intéressantes, il faudrait atteindre les dimensions les plus importantes possibles et éviter les défauts qui peuvent influencer sa qualité.

Les dimensions demandées sont différentes selon l'objectif de l'exploitation et selon le type du peuplement (Bessières, 1992; Kerr, 1995; Joyce, 1998). Pour atteindre l'objectif recherché, il faut intervenir au bon moment en utilisant une méthode appropriée car l'objectif des gestionnaires est de faire un aménagement des peuplements forestiers qui minimise les coûts et maximise les bénéfices (Richardson *et al.*, 1999).

En fait, en ce qui concerne la sensibilité du frêne à la compétition intra spécifique, Kerr (2003) suppose qu'elle n'existe pas au très jeune âge car il a trouvé que plus l'espacement initial du frêne en plantation est important, moins la croissance juvénile en hauteur, diamètre et volume de tige est importante. Plus tard, cette sensibilité apparaît, les gaulis souffrent de la concurrence intra spécifique, donnent naissance à des « loups » et présentent de dangereuses frottures mutuelles (à l'origine du développement et de la multiplication du chancre bactérien) (Faure *et al.*, 1975). Wattel (1998) montre qu'à un âge plus avancé le frêne devient sensible à la compétition intra spécifique, sa croissance tendant à diminuer rapidement à cause de sa sensibilité à la compétition interindividuelle. C'est une espèce qui demande beaucoup de lumière et son houppier doit rester libre de toute compétition pour se développer rapidement et donner une production de qualité (Kerr, 1995; Claessens, 2004). La compétition affecte surtout la croissance du frêne en diamètre et sa forme, et beaucoup moins la croissance en hauteur (Kerr, 2004).

Pour avoir un accroissement important en diamètre avec une bonne qualité du bois, il faut une éclaircie forte et régulière (Joyce, 1998). En fait, c'est le conseil donné par toutes les études menées sur l'éclaircie du frêne (Thill, 1986 ; Bouchon *et al.*, 1989 ; Bessières, 1992). Comme la croissance de cette espèce est rapide et soutenue, il faut intervenir très tôt (Thill, 1986). Plus la croissance est rapide, plus la proportion du bois d'été dans le cerne d'accroissement annuel est importante et plus le bois est flexible et tournant, ce qui correspond aux qualités requises pour plusieurs de ses utilisations. L'irrégularité du rythme des éclaircies avec des périodes alternant compétition et dégagement donne une irrégularité des largeurs des cernes, ce qui diminue la qualité du bois car cela augmente la tension du bois pendant le séchage (Joyce, 1998).

D'autres interventions sylvicoles dans les peuplements de frêne comme la taille de formation sont aussi souhaitables pour améliorer la qualité de son bois (Bulfin & Radford , 1998).

Les études sur l'effet des compétitions inter et intra spécifiques sont nombreuses (Kerr, 2004). Elles concernent des peuplements naturels ou plantés mais pas des accrus. Les propositions de sylviculture du frêne pour valoriser cette essence secondaire n'ont jamais concerné les accrus (Faure *et al.*, 1975; Bessières, 1992; Kerr, 1995; Poulain, 2000; Pichard, 2002). Les accrus de frêne ont été regardés comme des peuplements sans aucun intérêt technologique (Faure *et al.*, 1975).

Compte tenu des différents enjeux posés par les accrus (Curt *et al.*, 2004), de la valeur économique importante du bois de frêne, des densités élevées des accrus de frêne dans les Pyrénées (1100- 3600 arbres.ha^{-1}) où aucune étude n'a été faite sur leur croissance face à la compétition ni sur leur réaction aux interventions sylvicoles, l'étude de cette aspect semble important car elle peut contribuer à mettre au point une gestion sylvicole de ces accrus susceptible d'apporter des revenus complémentaires aux propriétaires.

Dans ce chapitre, on s'est intéressé dans un premier temps à l'effet de compétition sur la croissance du frêne dans les accrus en place hors intervention sylvicole, et aussi aux facteurs possibles modulant cet effet. Cette partie de l'étude a été conduite au niveau de la parcelle en utilisant 3 parcelles situées dans deux vallées différentes des Pyrénées (B6 dans la vallée de l'Adour, M2 et Pr1 dans la vallée du Gave de Pau). On a fait l'hypothèse que ces parcelles ayant des âges et des fertilités différentes peuvent avoir des réactions différentes à la compétition surtout pour les parcelles de la même vallée où aucune différence climatique ne peut influencer la réaction à la compétition. On a donc voulu tester l'effet de ces facteurs sur la réaction à la compétition. On a supposé aussi que les dimensions initiales des arbres pourraient être considérées comme des facteurs explicatifs de la variabilité inter individuelle de la réaction à la compétition qui pourraient donc moduler cette réaction.

On a considéré que la croissance en hauteur est moins sensible à la compétition et donc à l'éclaircie que la croissance en diamètre comme il a été trouvé pour le frêne en Lituanie (Juodvalkis *et al.*, 2005) et pour d'autres espèces (Cañellas *et al.*, 2004 ; Hamilton, 1981 ; Kerr, 2004). On s'est ainsi surtout intéressé à la croissance du tronc en diamètre, mais on a également pris en compte la croissance du houppier dans la mesure où le houppier est connu comme très sensible à la compétition chez le frêne (Claessens, 2004 ; Kerr, 1995).

L'effet de la compétition sur l'accroissement en diamètre a été étudié au niveau de la surface des cernes pour permettre une meilleure comparaison des croissances entre arbres de dimensions différentes, la largeur du cerne dépendant beaucoup, pour une même quantité de bois à produire, de la circonférence cambiale sur laquelle ce cerne se forme.

La compétition a été analysée en utilisant un indice de compétition dépendant de la distance car on voulait déterminer la distance limite de compétition et l'influence de la distance en deçà de cette limite dans nos accrus. L'utilisation de ce type d'indice spatialisé est aussi importante pour suivre l'évolution de la croissance dans des peuplements où les densités sont ponctuellement très variables ou lors d'interventions sylvicoles hétérogènes (Pouderoux *et al.*, 2001). Plusieurs indices ont été testés (Benbrahim *et al.*, 2000) pour choisir finalement l'indice le plus simple à estimer.

Dans un deuxième temps, on a étudié la réaction de nos accrus de frêne à deux modalités d'éclaircie : un détourage et une éclaircie forte. Cette partie a été également étudiée au niveau de placettes de 400 m^2 dans chaque parcelle. On a souhaité ici mesurer l'importance et la rapidité de cette réaction sur la croissance en diamètre des arbres selon l'intensité (moyenne et localisée) de l'éclaircie, mais aussi selon l'âge initial et le niveau de fertilité stationnelle. On trouve en effet que le frêne serait capable de réagir rapidement et jusqu'à un âge avancé (70 ans) aux éclaircies, mais que cette capacité dépend des conditions stationnelles (Faure *et al.*, 1975). Ce point représente un enjeu important dans la mesure où la qualité de son bois commencerait à diminuer à partir de 60-70 ans, même après éclaircie forte, si les conditions de milieu sont défavorables (Claessens, 1997) et où les capacités de croissance déclineraient inexorablement après 70-80 ans (Thill, 1986; Joyce, 1998).

Cette analyse de la réaction du frêne à la compétition intra spécifique (avec ou sans éclaircie) et des facteurs influençant cette réaction pourrait aider à construire un modèle de l'accroissement individuel du frêne en fonction de ce facteur. Ce modèle pourrait constituer un outil pour les gestionnaires forestiers permettant de comparer l'effet de plusieurs modalités d'intervention sylvicole et de choisir ainsi la modalité qui donne la dimension demandée dans des conditions stationnelles données.

L'importance et la rapidité de la réponse positive du frêne à l'éclaircie et la valeur économique de son bois pourraient justifier le développement d'interventions sylvicoles dans les meilleurs sites pour améliorer durablement ces peuplements (Cañellas *et al.*, 2004).

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Dans ce chapitre, on expose d'une part les méthodes de mesure d'arbres et d'analyse des effets de voisinage qui ont été utilisées pour évaluer l'effet de la compétition avant et après éclaircie. D'autre part, on présente en détail les modalités des deux types d'éclaircie pratiquées.

2.1. CARACTERISATION DES PEUPLEMENTS

Pour caractériser le peuplement de chaque parcelle, les mesures suivantes ont été effectuées :

- Le diamètre à 1.3m (DBH) de tous les arbres de chaque parcelle a été mesuré comme montré dans le chapitre II (croissance- nutrition minérale).
- L'âge moyen de chaque parcelle (peuplement) a été estimé en prenant l'âge d'environ 35 arbres (3 arbres de chaque classe de dbh de chaque placette, voir l'annexe 1 pour la définition de ces classes). Cette estimation a été effectuée à la base du tronc, soit par lecture de carottes de bois prélevées sur les arbres sur pied, soit par lecture des cernes sur des rondelles prises sur les arbres coupés. Le carottage a été réalisé à la tarière de Pressler, au plus près du sol (pour une meilleure évaluation de l'âge total des arbres, à raison d'une carotte par arbre ou de deux carottes dans le cas où le cœur n'est pas atteint).
- Cartographie des arbres des parcelles : pour avoir une représentation quantitative précise de la répartition spatiale des arbres de chaque placette, on a mesuré la position relative de tous les arbres (frêne et autres espèces) morts, vivants ou coupés. On a pris le centre de chaque placette comme origine des mesures. Par rapport à ce « point zéro », l'azimut et l'inclinaison verticale de chaque arbre ont été mesurés à l'aide d'un dispositif associant une boussole magnétique Mapstar et un télémètre laser Impulse 200 LR. La distance entre l'arbre et le point zéro a été estimée à l'aide d'un vertex III (Willm & Burnel, 2006) ; Photo 1). La cartographie a été étendue à une zone de 6 m de large autour de la placette pour les placettes d'éclaircie forte et témoin (Voir § 2.2.1.), alors que cette zone est de 6 m de large autour des seuls arbres désignés pour la placette détourage.



Photo 1 : Utilisation du télémètre laser, de la boussole et du vertex III pour cartographier les arbres.

2.2. ÉCLAIRCIES SYLVICOLES

2.2.1. MODALITES ET INTENSITES DES INTERVENTIONS

Dans chaque parcelle, 3 placettes **homogènes** (en termes de répartition spatiale des arbres et de leurs dimensions) de 400 m^2 ont été délimitées. Ces placettes ont été affectées au hasard à chacune des 2 modalités d'éclaircie sylvicole et à la modalité témoin :

Sur la première placette a été appliquée la méthode du « détourage » selon le protocole défini par le Centre Régional de la Propriété Forestière (CRPF) : 3 arbres d'avenir ont été désignés par des agents de cet organisme, l'objectif final étant d'obtenir environ 70 arbres d'avenir / ha (= 3 arbres/ 400m^2)). On coupe tous les arbres potentiellement concurrents autour du houppier des arbres désignés sur environ 2 mètres de rayon auquel il faut ajouter le rayon du houppier. La distance moyenne ainsi détourée autour de l'arbre est d'environ 3m. La distance entre les arbres détourés est de 10-12m (Figure 1). On n'intervient pas du tout en dehors des zones de détourage.

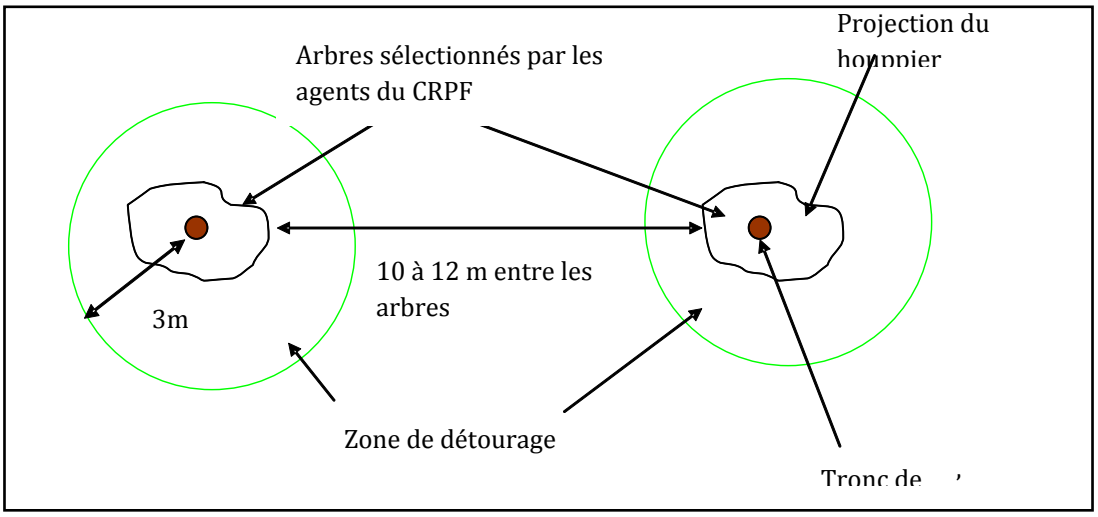


Figure 1 : Modalité détourage des arbres d'avenir.

Sur **la deuxième** placette une « éclaircie forte en plein » a été réalisée. Le critère du choix du nombre des arbres à conserver est le facteur d'espacement de Hart-Becking « S » (Pardé & Bouchon, 1988) :

$$S= 100*a/ Hdom$$

où « a » est l'espacement moyen entre les arbres conservés et Hdom est la hauteur moyenne des arbres « dominants ».

Pour déterminer l'espacement moyen final, on a cherché tout d'abord à appliquer en moyenne, sur la parcelle M2, la même mise à distance entre arbres voisins que pour les arbres détourés. Le rayon moyen du houppier des arbres de cette parcelle étant estimé à 1 m, la distance moyenne « a » entre deux arbres voisins est donc : 2 m + 2 x 1 m = 4 m (voir figure 2), ce qui correspond à 25 arbres conservés sur 400 m2.

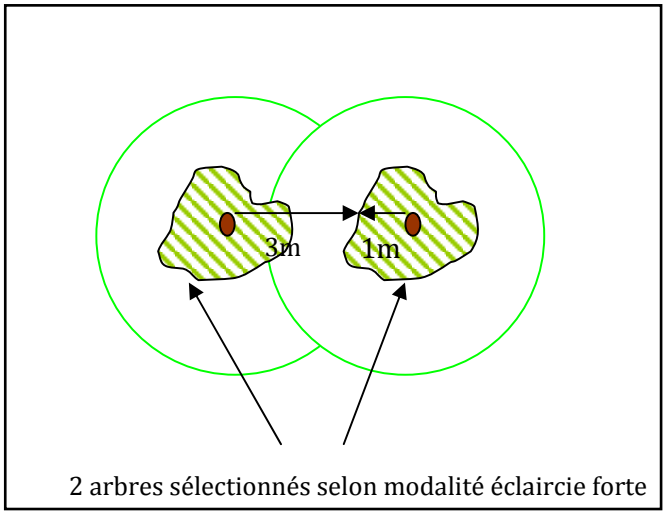


Figure 8 : Modalité éclaircie forte.

Le facteur d'espacement moyen de Hart-Becking pour la parcelle M2 a ainsi pour valeur 22 %.

Pour les autres parcelles, on a utilisé le même facteur d'espacement (22 %), ce qui aboutit à 16 arbres désignés/400 m^2 dans la parcelle Pr1, et 22 arbres désignés/400 m^2 dans la parcelle B6. L'utilisation de la même valeur du facteur de Hart-Becking dans les 3 parcelles permet d'avoir une ouverture relative des peuplements comparable. Le reste des arbres a été abattu (Figure 3).

La troisième placette a été maintenue en l'état pour servir de référence (témoin).



Figure 3 : Photos de parcelles M2. 1 : placette avant détourage, 2 : placette après détourage, 3 : placette avant éclaircie forte, 4 : placette après éclaircie forte.

Les interventions sylvicoles ont été appliquées en mars 2006 dans la parcelle M2, en novembre 2006 dans la parcelle Pr1, et en mars 2007 dans la parcelle B6.

2.2.2. CHOIX DES ARBRES DESIGNES

On appellera « arbres désignés » les arbres conservés après éclaircie (ou leurs homologues dans les placettes témoin) au profit desquels est faite l'éclaircie, et dont la croissance est donc suivie. Parmi ceux-ci, les « arbres d'avenir » correspondent aux 3 arbres par placette de 400 m^2 sélectionnés selon les critères du détourage définis par le CRPF (voir ci-dessus), et choisis sur le terrain dans les placettes détourage (D) et témoins (DT) par deux agents de cet organisme. Ces arbres d'avenir sont des arbres dominants qui présentent peu de défauts sur les six premiers mètres de bille et qui ont un diamètre supérieur au diamètre moyen des arbres du peuplement. Pour la modalité « éclaircie forte », on a sélectionné des arbres afin de respecter le facteur d'espacement final de 22 %. Ces arbres supplémentaires ont été choisis selon les critères suivants :

- des arbres de belle forme (rectitude, peu de fourches, peu de défauts).
- des arbres ayant des diamètres (dbh) variés entre la classe 2 et 6.

Dans les placettes témoin, on a sélectionné des arbres en nombre identique à celui des arbres désignés de la modalité éclaircie forte et présentant des dbh équivalent afin d'améliorer la comparaison entre ces deux modalités. L'ensemble de ces arbres sera désigné par la suite par « TEF ». La mesure des dbh de ces arbres n'a été faite que la 1ère et la dernière année de notre étude.

2.2.3. MESURES DES ARBRES DÉSIGNÉS

- Le diamètre à 1.3m (DBH) des arbres désignés a été mesuré au ruban en prenant soin de matérialiser à la peinture le niveau de mesure sur ces arbres (Photo 2). Cette mesure a été refaite chaque année à la fin de la saison de végétation.



Photo 2 : Matérialiser le niveau de mesure de DBH à la peinture.

- La hauteur totale et la hauteur des billes* de ces arbres ont été mesurées à l'aide d'un appareil à ultra-sons (« vertex »).

En fait, la mesure de hauteur s'est révélée peu précise à cause de plusieurs facteurs liés :

- au vertex, dont les mesures sont perturbées par le bruit (chute d'eau, vent, pluie, etc...)

- à l'erreur de parallaxe due au positionnement de la personne réalisant la mesure, à la visibilité du sommet visé (confusion entre plusieurs branches), à la pente, et à la forme de l'arbre.

Pour réduire l'erreur de parallaxe due à la position de l'opérateur, on a installé le récepteur exactement à l'aplomb de la cime mesurée. Mais malgré cette précaution, il n'a pas été possible d'estimer avec une précision suffisante les allongements annuels des arbres.

- L'âge des ces arbres a été estimé en prenant des carottes à la base ;
- pour estimer la surface de projection du houppier au sol, nous avons utilisé le « kronenspiegel », appareil optique qui permet de situer avec une bonne précision la verticale d'un point quelconque du bord du houppier (Pardé & Bouchon, 1988). Nous avons déterminé de cette façon et à l'aide d'une boussole la projection verticale de 8 points de la bordure du houppier situés aux orientations Nord, Nord-est, Est, Sud-est, Sud, Sud-ouest, Ouest et Nord-ouest. On a enfin mesuré la distance entre chaque point et le pied de l'arbre. Le calcul de la somme des surfaces des triangles ainsi délimités nous a permis de calculer la surface de projection du houppier (Figure 4) :

$$S = (\pi/8) * \sum_{i=1}^{8} r_i^2$$

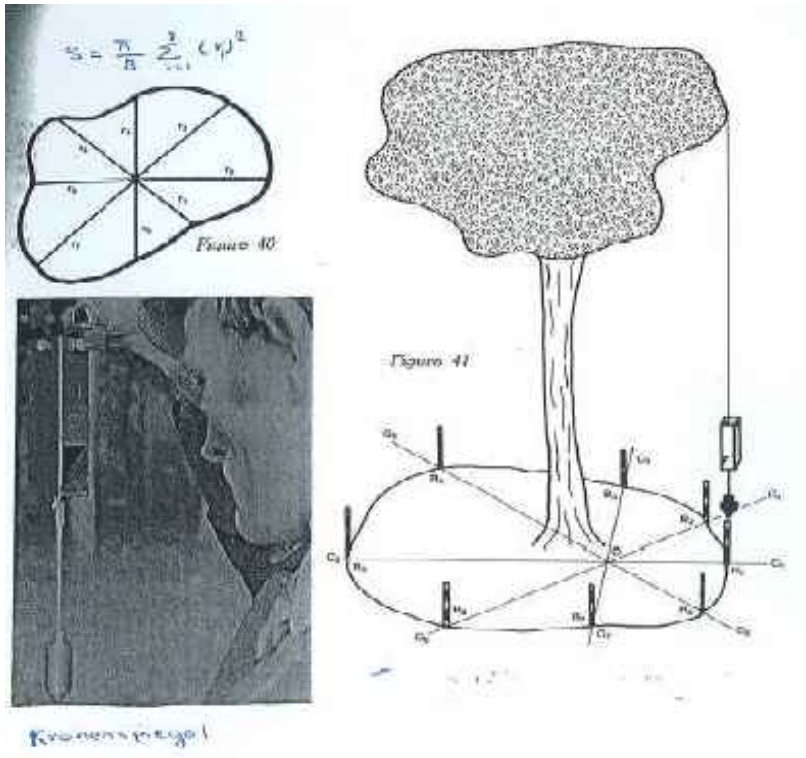


Figure 4: Mesure de la surface de projection de houppier.

L'imprécision de la mesure de surface par rapport à l'accroissement annuel en largeur du houppier suite aux interventions sylvicoles n'a pas permis de suivre l'évolution de cette grandeur au cours du temps.

- Le volume du houppier a été calculé en multipliant la surface de projection de houppier par la hauteur du houppier de ces arbres.

2.3. INDICE DE VOISINAGE SD2

Pour estimer la compétition que subit chaque arbre cible de la part de ses voisins, on a utilisé un indice de voisinage Sd2 qui représente la somme des carrés des diamètres des arbres situés autour de l'arbre cible sur une certaine surface :

$$Sd2 = \sum(dbh_i)^2$$

Plusieurs surfaces autour des arbres cibles ont été utilisées pour calculer Sd2 : 300 m^2 (rayon de 9,8 m), 100 m^2 (rayon de 5,6 m), 70 m^2 (rayon de 4,7 m) et 50 m^2 (rayon de 4 m) (Alteyrac, 2005).

Les arbres cibles autour desquels Sd2 a été calculé pour estimer l'effet de compétition avant intervention sont des arbres qui appartiennent aux différentes classes de dbh des arbres de la parcelle (30 arbres par parcelle) et dont on dispose des accroissements annuels passés (carottes ou rondelles basales).

Après les interventions sylvicoles, le calcul de Sd2 a été effectué pour les arbres restants et pour les arbres coupés.

Le calcul de cet indice a été fait avec le logiciel R (R Development Core Team, 2008) en utilisant les cordonnées des arbres enregistrées lors de la cartographie des parcelles (voir § 2.1).

2.4. ANALYSES DES CORRELATIONS

2.4.1. RELATION CROISSANCE- INDICE DE COMPETITION

Dans les peuplements en place (avant intervention), les variables de croissance étudiées ont été le dbh et les accroissements moyens annuels des 5 et 10 dernières années exprimés en surface de cerne. Le calcul des surfaces de cerne a été fait avec le logiciel R (R Development Core Team, 2008) en utilisant un programme de calcul spécifique basé sur l'épaisseur des cernes et le diamètre final. Dans le cas où la carotte de bois prélevée à la base ne passait pas par le coeur, on a utilisé la relation diamètre basal- dbh pour estimer le diamètre final puis les surfaces des cernes.

Après les interventions sylvicoles, la croissance des arbres désignés de la placette éclaircie forte (EF) a été étudiée en utilisant la croissance annuelle en surface de cerne et la croissance cumulée de cette surface pendant les années suivant l'intervention.

La corrélation entre ces accroissements et les valeurs de l'indice Sd2 de chaque arbre cible a été analysée en utilisant le coefficient de Spearman dans le logiciel R (R Development Core Team, 2008).

2.4.2. REACTION A L'ECLAIRCIE

Pour estimer l'effet de la modalité d'intervention, de la parcelle et de l'année sur la réaction des arbres à l'éclaircie exprimée en surface de cerne, on a utilisé le test de Kruskal-Wallis. Pour l'effet de l'année, les données étant « appariées », on a utilisé le test de Wilcoxon.

2.4.3. RELATION CROISSANCE- DIMENSIONS INITIALES

Pour tester l'influence éventuelle des dimensions initiales des arbres sur leur réponse à un niveau de compétition donné, nous avons pris comme dbh initial celui de l'arbre 5 ans ou 10 ans avant les mesures, en l'approximant par la différence entre son dbh actuel et la double somme des 5 ou 10 derniers accroissements annuels lus sur le rayon estimés à partir des accroissements mesurés à la base de tronc. La variable à expliquer est le résidu de la relation lissée entre croissance et sd2, calculé en utilisant la fonction de lissage « supsmu » du logiciel R, avec un taux de lissage élevé (span = 0.9). La corrélation a été analysée en utilisant le coefficient de Spearman.

Pour les arbres désignés (soumis à l'éclaircie), le rôle des dimensions initiales dans leur croissance a été étudié en calculant la corrélation de Spearman entre les accroissements en surface de cerne pendant les différentes années suivant l'éclaircie et les variables suivantes estimées avant intervention : le dbh initial, la surface de projection et le volume du houppier des arbres.

2.4.4. RELATION CROISSANCE- DYNAMIQUE PASSEE DE CROISSANCE

Pour comparer la croissance annuelle en surface de cerne des arbres désignés avant intervention (calculée pendant les 10 dernières années) avec celles des années suivant l'intervention, nous avons choisi d'analyser la modification des classements des dbh suite à l'intervention à l'aide du test de Wilcoxon. En effet, il n'était pas possible dans ce cas de comparer directement les croissances avant et après intervention, car il aurait fallu pour cela estimer la croissance passée à 1,30 m à partir des mesures faites à la base du tronc, donc avec une précision trop faible

3. RESULTATS

3.1. ESTIMATION DE LA PRESSION DE COMPETITION DANS LES PEUPLEMENTS EN PLACE

Pour étudier l'influence des arbres voisins sur la croissance en diamètre des frênes, nous avons choisi ici d'analyser les variations des trois variables suivantes : le dbh et les accroissements moyens annuels pendant les 10 et les 5 dernières années dans les accrus de frêne avant intervention. Cette analyse est effectuée d'abord globalement à l'échelle de la parcelle en recherchant les rôles respectifs de la densité et de l'âge, puis à une échelle individuelle en « résumant » le voisinage des arbres étudiés à l'aide d'un indice. À cette dernière échelle, on recherche également la contribution des dimensions initiales des arbres dans leur réponse à la compétition exercée par le voisinage

3.1.1. CROISSANCE EN DIAMETRE ET DENSITE A L'ECHELLE DE LA PARCELLE

Compte-tenu du petit nombre de parcelles, nous avons effectué le calcul à l'échelle de la placette (il y a 3 placettes par parcelle). Les données moyennes par parcelle et par placette sont indiquées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques des peuplements des 3 parcelles étudiées. acc représente l'accroissement annuel moyen en surface de cerne estimé pendant les 10 dernières années (acc.10) et pendant les 5 dernières années (acc.5) en mm^2. Le dbh est estimé en mm. La densité est représentée par le nombre d'arbres par hectare.

parcelle	placette	dbh.moy	densité	age	acc.5	acc.10
B6	D	88	2450	37	1284	1242
B6	EF	87	3100	37,8	762	676
B6	T	90	2175	37,9	896	815
M2	D	106	3100	29,0	1722	1618
M2	EF	98	3625	27,2	1032	973
M2	T	102	3200	27,3	1225	1226
Pr1	D	111	3250	66,2	1452	1507
Pr1	EF	124	2100	66,5	718	799
Pr1	T	142	1575	67,7	1442	1615

Un effet négatif de l'âge sur les accroissements exprimés en surface de cerne a été trouvé, mais pas d'effet de la densité seule (Tableau 2). Cependant, la densité et l'âge sont corrélés négativement (coefficient de Spearman Rho = -0,7, p = 0,04). Il est donc possible que les influences des ces deux facteurs obligatoirement associés se masquent mutuellement (aux grands âges sont associées les plus faibles densités et inversement). Il est donc justifié d'étudier les corrélations avec la densité indépendamment de l'âge.

Tableau 2 : Relations croissance- densité et croissance- âge des 9 placettes étudiées. « Rho » représente le coefficient de corrélation de Spearman, « p » est la probabilité de risque.

Croissance	**Densité**	**Age**
Accroissement moyen 5 ans	Rho = 0,48 ; p = 0,14	Rho = **-0,88** ; p = 0,004
Accroissement moyen 10 ans	Rho = 10,60 ; p = 0,07	Rho = **-0,82** ; p = 0,007
Accroissement moyen total	Rho = 0,31 ; p = 0,41	Rho = **-0,87** ; p = 0,004

L'analyse de la relation entre les résidus de la relation accroissement- âge et les densités a montré que hors effet âge, la densité n'explique pas significativement les variations de la croissance exprimée en surface de cerne (Tableau 3). L'âge représente donc un facteur important explicatif de la croissance moyenne des arbres de nos parcelles.

Tableau 3 : Relations entre les résidus de la relation croissance- âge, et les densités des placettes étudiées. « Rho » représente le coefficient de corrélation de Spearman, « p » est la probabilité de risque.

Résidus	**Coefficient de Spearman**
Accroissement moyen 5 ans	Rho = 0,05 ; p=0,91
Accroissement moyen 10 ans	Rho = 0,03 ; p=0,95
Accroissement moyen total	Rho = -0,50 ; p=0,18

3.1.2. CROISSANCE EN DIAMETRE A L'ECHELLE INDIVIDUELLE EN FONCTION DU VOISINAGE

3.1. 2. 1. Rôle du voisinage

La répartition spatiale des dimensions des arbres, illustrée par la figure 5, montre à la fois la variabilité des diamètres et l'irrégularité de la répartition spatiale des arbres, susceptible d'induire des différences locales d'interaction relativement importantes. Mais on voit aussi que la relation entre le diamètre d'un arbre et la densité locale n'est pas évidente.

Toutes les surfaces testées autour des arbres cibles pour calculer l'indice de voisinage Sd2, sauf 100 m^2, ont donné des corrélations significatives entre Sd2 et croissance. Les résultats des différentes corrélations sont indiqués dans le tableau 4 et illustrées dans la figure 5.

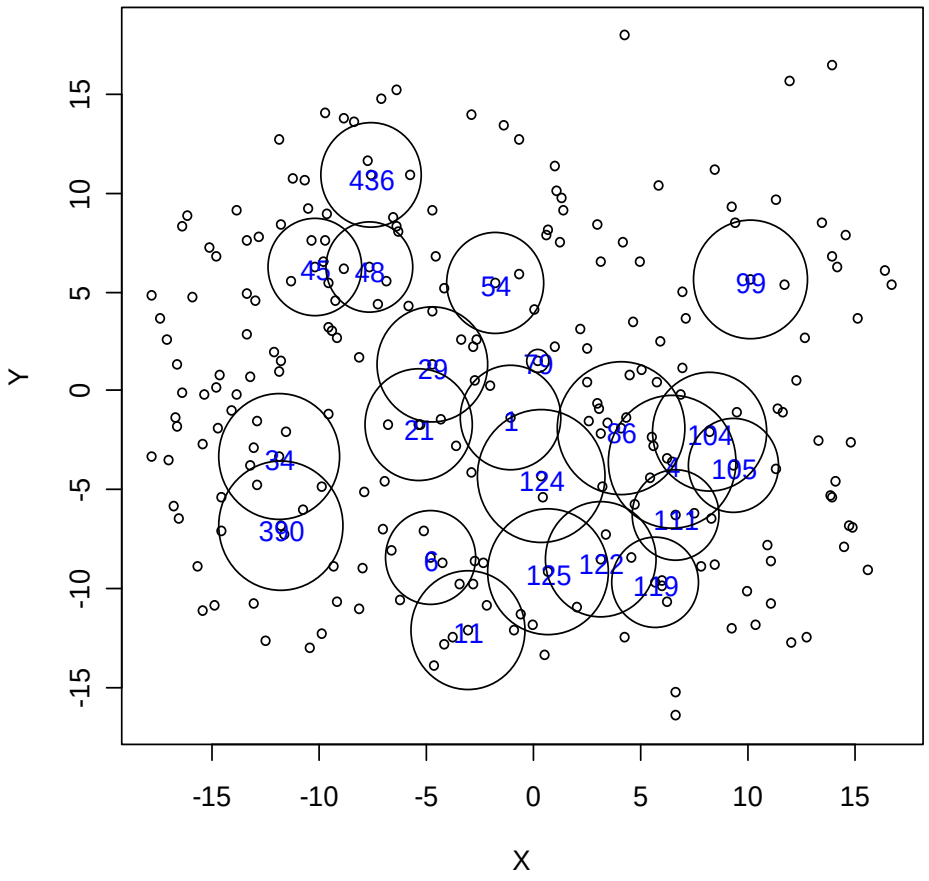


Figure 5 : Répartition spatiale des arbres de la parcelle B6. En bleu : les arbres étudiés. Les diamètres des cercles sont proportionnels aux dbh des arbres étudiés.

Tableau 4 : Corrélations entre les croissances (accroissements annuels exprimés en surface calculés pendant les 5 et les 10 dernières années) et l'indice de voisinage (Sd2) calculé par parcelle et par surface de voisinage. « Rho » représente le coefficient de corrélation de Spearman, « p » la probabilité de risque. Les chiffres en gras indiquent les corrélations significatives.

	Variables de croissance					
Parcelle /surface	**acc.5**		**acc.10**		**dbh**	
	Rho	**p**	**Rho**	**p**	**Rho**	**p**
B6 / 50	-0,080	0,673	-0,100	0,598	-0,250	0,183
B6 / 70	-0,019	0,924	-0,027	0,890	-0,293	0,123
B6 / 100	0,153	0,451	0,115	0,575	-0,068	0,740
B6 / 300	**-0,673**	**0,028**	-0,509	0,114	-0,400	0,225
M2 / 50	**-0,523**	**0,004**	**-0,487**	**0,007**	**-0,450**	**0,015**
M2 / 70	**-0,497**	**0,007**	**-0,491**	**0,007**	**-0,461**	**0,012**
M2 / 100	-0,337	0,074	-0,317	0,094	-0,329	0,081
M2 / 300	**-0,529**	**0,037**	-0,443	0,086	-0,490	0,054
Pr1 / 50	-0,219	0,291	-0,271	0,190	-0,213	0,306
Pr1 / 70	-0,337	0,107	-0,390	0,060	**-0,456**	**0,025**
Pr1 / 100	-0,209	0,375	-0,277	0,237	-0,274	0,243
Pr1 / 300	0,321	0,498	0,321	0,498	0,071	0,906

On voit dans le tableau 4 que la surface de 300 m^2 autour des arbres étudiés (rayon de 9,8 m) donne une corrélation négative et significative entre les Sd2 et les accroissements annuels des cinq dernières années dans les parcelles B6 et M2 (Figure 6). Cependant, les résultats ne sont pas significatifs dans la parcelle Pr1 avec cette surface. Dans cette dernière parcelle, la corrélation négative significative est obtenue pour des surfaces de 70 m^2 et concerne le dbh (Figure 6). Dans la parcelle M2, les corrélations négatives sont toujours significatives pour les plus petites surfaces (50 et 70 m^2) quelque soit la période de croissance utilisée.

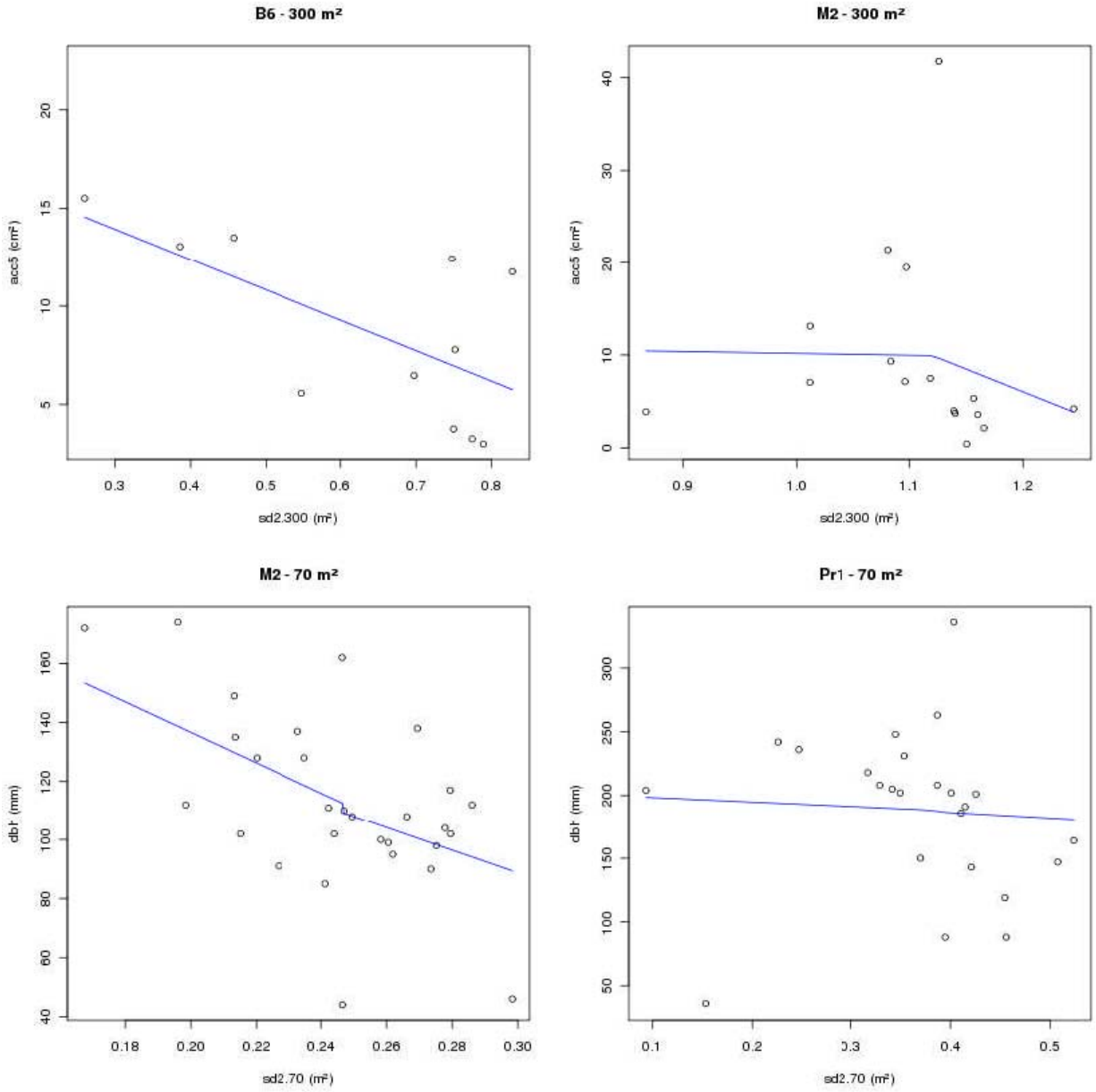


Figure 6 : Quelques relations significatives entre croissance et Sd2 et les variables de croissance dans les 3 parcelles. Les lignes bleues représentent un lissage de la tendance moyenne des nuages de points.

3.1. 2. 2. Comparaison entre parcelles

Pour comparer les parcelles entre elles et tirer partie de toute l'information fournie par les trois variables de croissance, il est nécessaire de mettre au point un indice indépendant de la surface de voisinage et de la période de croissance étudiée. L'indice C que nous avons utilisé traduit la diminution moyenne annuelle de la croissance pour une augmentation donnée de Sd2. Cet indice a été calculé à partir des courbes de lissage des relations entre les croissances et la variable sd2,

en utilisant un taux de lissage élevé (span = 0.9) afin d'éliminer le poids des points extrêmes quand ils sont peu nombreux :

$$C = \Delta v / \Delta Sd2$$

où Δv est la différence entre les deux valeurs extrêmes de croissance sur la courbe de lissage et où ΔSd2 est la différence entre les deux valeurs extrêmes de Sd2 sur la même courbe.

Pour l'indice C qui correspond à la relation dbh-Sd2, nous avons utilisé l'âge moyen des arbres étudiés pour obtenir des valeurs moyennes annuelles comparables à celles qui concernent les accroissements moyens annuels calculés pour les 5 et 10 dernières années de croissance.

Puis on a analysé les valeurs de C pour tester si elles sont dépendantes de la parcelle, de la surface étudiée et/ou de la période de croissance. Les valeurs de C sont présentées dans le tableau 5.

Tableau 5 : L'indice C calculé pour différentes variables de croissance (acc.5, acc.10 et dbh) par parcelle et par surface de voisinage. Les chiffres représentent les valeurs de C en $cm^2/an/m^2$. Cette grandeur se définit comme la variation d'accroissement annuel en section (en cm^2) par m^2 d'augmentation de Sd2. Les chiffres en gras indiquent les corrélations significatives entre Sd2 et croissance.

Parcelle	**Surface (m^2)**	**acc.5**	**acc.10**	**dbh**
B6	50	-1,26	-3,23	-8,87
B6	70	-5,76	-6,19	-9,62
B6	100	11,30	8,86	-0,09
B6	300	**-15,50**	-13,80	-2,70
M2	50	**-298,00**	**-242,00**	**-40,60**
M2	70	**-192,00**	**-172,00**	**-33,60**
M2	100	-95,60	-87,60	-15.00
M2	300	**-17,50**	-12,60	-3,00
Pr1	50	-18,40	-21,70	-3,78
Pr1	70	-16,30	-18,00	**-3,33**
Pr1	100	-6,99	-7,70	-1,11
Pr1	300	4,21	5,06	0,51

L'analyse des valeurs de C (Tableau 5) montre qu'il existe une différence significative globale entre parcelles pour la période des 5 dernières années. Elle montre également qu'il n'y a pas de différences significatives entre les valeurs de C selon les surfaces utilisées, ni selon la durée de la période de croissance récente (Tableau 6), ce qui confirme la possibilité d'utiliser cet indice pour comparer les parcelles. En revanche, le niveau de compétition semble diminuer significativement entre les périodes de croissance antérieures et postérieures à – 10 ans (voir aussi Figure 7).

On observe de plus sur la figure 7 que les valeurs de C tendent à diminuer en valeur absolue avec l'augmentation de la surface (parcelles M2 et Pr1), et que la parcelle la plus jeune (M2) présente des valeurs absolues très supérieures à celles des autres parcelles. Ce dernier résultat pourrait rendre compte d'une diminution de la compétition avec l'age des peuplements.

Tableau 6 : Analyse des variations de l'indice C en fonction des parcelles, de la surface de voisinage et du temps par le test de Kruskal-Wallis, et comparaison des accroissements moyens par le test de Wilcoxon pour données appariées. Les chiffres en gras indiquent des différences significatives.

Variable	**Facteur**	**Coefficient**	**Probabilité**
acc5	parcelle	$\chi 2 = 7,3$	p = **0,03**
acc5	surface	$\chi 2 = 1,3$	p = 0,73
acc10	parcelle	$\chi 2 = 5,7$	p = 0,06
acc10	surface	$\chi 2 = 1,7$	p = 0,64
total	parcelle	$\chi 2 = 4,5$	p = 0,11
total	surface	$\chi 2 = 5,4$	p= 0,15
acc5/acc10	aucun	V = 28,5	p = 0,43
acc5/total	aucun	V = 76	P = **0,02**
acc10/total	aucun	V = 76	P = **0,02**

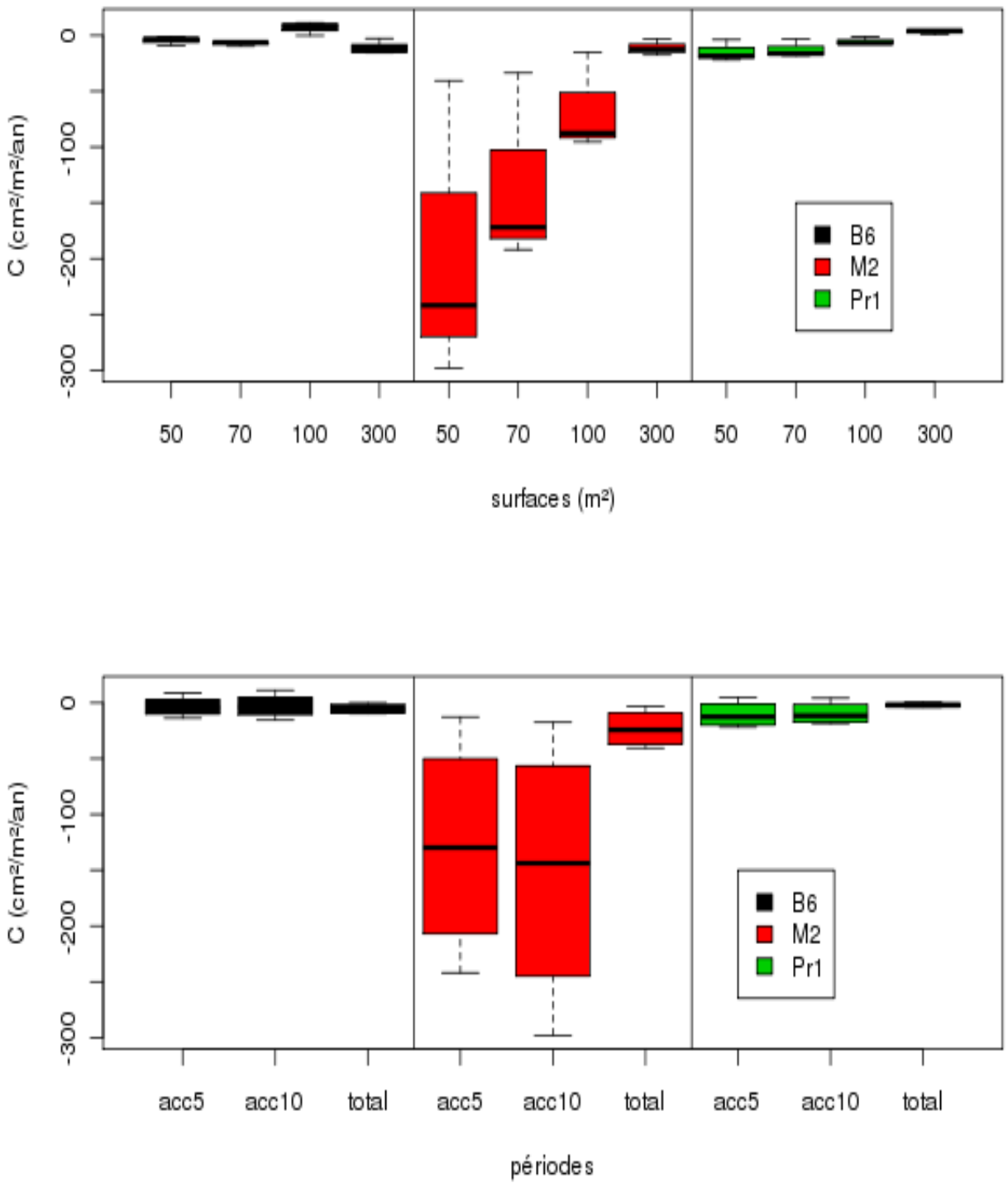


Figure 7 : Boxplots des valeurs du coefficient « C » des 3 parcelles, selon la surface de la zone de compétition (en haut) et selon la période de croissance (en bas).

3.1.3. CONTRIBUTION DES DIMENSIONS INITIALES DES ARBRES A LA COMPETITION LOCALE

Les résultats des corrélations entre les résidus de la relation entre croissance et Sd2 et les dbh initiaux sont présentés dans le tableau 7 :

Tableau 7 : Corrélations entre les résidus des relations Sd2-croissance (accroissements annuels calculés pendant les 5 et les 10 dernières années) et les dbh initiaux des arbres. « Rho » représente le coefficient de corrélation de Spearman, « p » la probabilité de risque. Les chiffres en gras indiquent les corrélations significatives.

Période	**Surface calcul Sd2**	**Parcelles**					
		B6		**M2**		**Pr1**	
		Rho	**p**	**Rho**	**p**	**Rho**	**p**
5 ans	50 m2	0,33	0,08	**0,41**	0,03	**0,76**	< 0.001
	70 m2	0,35	0,06	**0,43**	0,02	**0,72**	< 0.001
	100 m2	**0,46**	0,02	**0,45**	0,02	**0,82**	< 0.001
	300 m2	0,46	0,15	0,42	0,10	**0,89**	0,01
10 ans	50 m2	0,23	0,22	0,25	0,18	**0,75**	< 0.001
	70 m2	0,23	0,23	0,22	0,25	**0,74**	< 0.001
	100 m2	0,38	0,05	0,20	0,31	**0,85**	< 0.001
	300 m2	0,33	0,32	0,15	0,57	**0,89**	0,01

On voit que le dbh initial explique significativement une partie des variations de tous les résidus de corrélation dans la parcelle Pr1. Pour la parcelle M2, ce résultat est restreint à la croissance des 5 dernières années. En parcelle B6, la seule corrélation significative concerne la croissance des 5 dernières années avec la surface de voisinage de 70 m^2. Ces corrélations significatives correspondent à des relations linéaires également significatives (Tableau 8 et Figure 8). On remarque aussi (Tableau 8) que les valeurs des pentes des relations tendent à augmenter avec la surface prise en compte, ce qui pourrait indiquer dans ces cas une augmentation de l'effet de la

vigueur initiale de l'arbre (et donc une diminution de l'effet de compétition liée aux voisins) sur la croissance pour les plus grandes surfaces.

La pression de compétition sur l'accroissement annuel calculé pendant les 5 ou 10 dernières années peut donc être modulée par la vigueur de l'arbre-cible pour un Sd2 donné, particulièrement pour les parcelles Pr1 et M2 et les accroissements les plus récents (5ans). En revanche, ce résultat n'apparaît que très peu dans la parcelle B6.

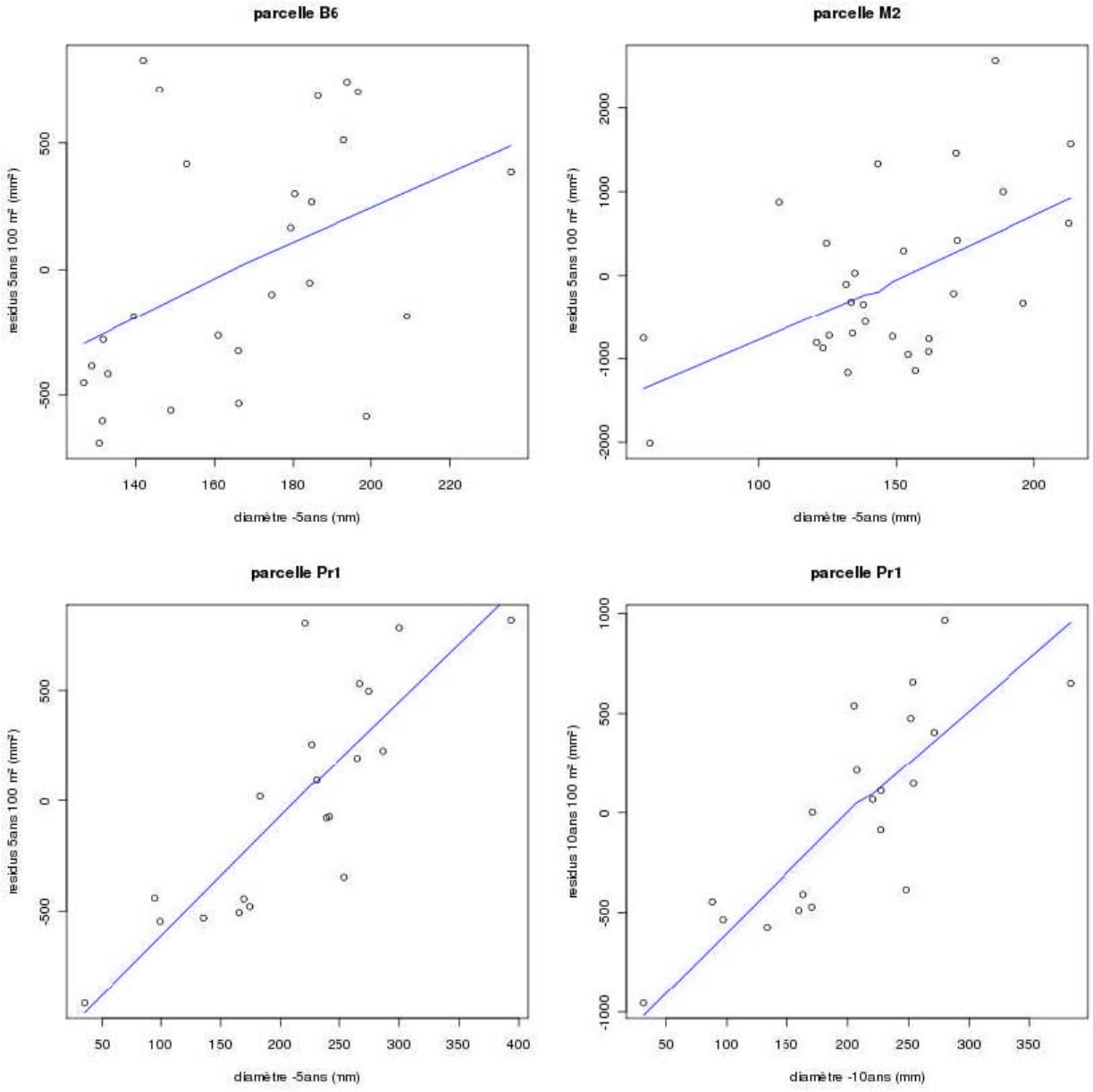


Figure 8 : Quelques corrélations significatives entre les dbh initiaux et les résidus des relations significatives Sd2-croissance pour les 3 parcelles. Les courbes bleues représentent les lissages des nuages de points.

Tableau 8 : Coefficients des régressions linéaires pour les corrélations significatives (cf tableau 4) entre les résidus des relations sd2-croissance et les dbh initiaux

Parcelle	Période	Surface (m^2)	Pente	R^2	p
B6	5 ans	100	7,2	0,18	0,02
M2	5 ans	50	11,7	0,25	<0,01
M2	5 ans	70	12,5	0,21	0,01
M2	5 ans	100	15,1	0,29	<0,01
Pr1	5 ans	50	5,0	0,62	<0,01
Pr1	5 ans	70	5,1	0,55	<0,01
Pr1	5 ans	100	5,2	0,69	<0,01
Pr1	5 ans	300	7,6	0,82	<0,01
Pr1	10 ans	50	5,1	0,51	<0,01
Pr1	10 ans	70	4,9	0,42	<0,01
Pr1	10 ans	100	5,3	0,67	<0,01
Pr1	10 ans	300	8,9	0,75	0,01

3.2. INFLUENCE DES INTERVENTIONS SYLVICOLES SUR LA CROISSANCE RADIALE DU FRENE

Dans cette partie, on a d'abord cherché à analyser la réaction de croissance en fonction de la modalité, du temps, de la parcelle et des interactions entre ces trois facteurs. La croissance a été étudiée en utilisant la surface de cerne. La comparaison entre les modalités a été faite entre la croissance des 3 arbres détourés et celle des 3 arbres désignés de la placette témoin (TD) et entre la croissance des arbres désignés de la modalité éclaircie forte (EF) et celle du même nombre d'arbres équivalents de la placette témoin (TEF). Dans un deuxième temps, on a cherché à expliquer la variabilité individuelle de la réponse des arbres soumis à la modalité éclaircie forte (EF). On s'est surtout intéressé à l'influence des arbres voisins sur la réaction aux interventions pour préciser l'effet de la compétition sur cette réponse. Pour cela, on a également utilisé l'indice Sd2 comme précédemment. La croissance suite aux interventions sylvicoles a été analysée en étudiant la croissance en surface de cerne de la 1ère, 2ème année suivante

l'intervention (et de la 3ème année pour la parcelle M2) et la croissance cumulée pendant les 2 années suivant l'intervention (et les 3 années pour M2). On a cherché aussi l'effet d'autres facteurs qui peuvent également influencer la croissance radiale comme les dimensions initiales (dbh initiaux et dimensions des houppiers) et la dynamique de croissance des arbres avant éclaircie.

3.2.1. RESULTATS MOYENS A L'ECHELLE DE LA PARCELLE

3.2.1.1. Comparaison globale des gains moyens de croissance dus aux deux modalités d'éclaircie

Pour comparer la croissance des arbres désignés selon la modalité d'intervention, on a utilisé la croissance moyenne annuelle en surface de cerne obtenue après les interventions. Le test de Kruskal-Wallis montre qu'il n'y a pas de différence significative entre la croissance des 3 arbres détourés (D) et celle des 3 arbres désignés dans la placette témoin (TD). Par contre, la différence est significative entre la croissance des arbres désignés de la modalité éclaircie forte (EF) et les arbres équivalents dans la placette témoin (TEF) (Tableau 9, Figure 9).

Tableau 9 : Test de Kruskal-Wallis de la croissance des arbres désignés selon la modalité d'intervention. La croissance utilisée est la croissance moyenne annuelle en surface de cerne obtenue après les interventions ($mm^2.an^{-1}$). χ^2 est la valeur du coefficient du test. DL est le nombre de degrés de liberté et p est la probabilité que l'hypothèse nulle soit vraie. La différence significative est en gras.

Facteur	χ^2	DL	p
Modalité D et TD	3,2768	1	0,07
Modalité EF et TEF	18,4335	1	**1,76e-05**

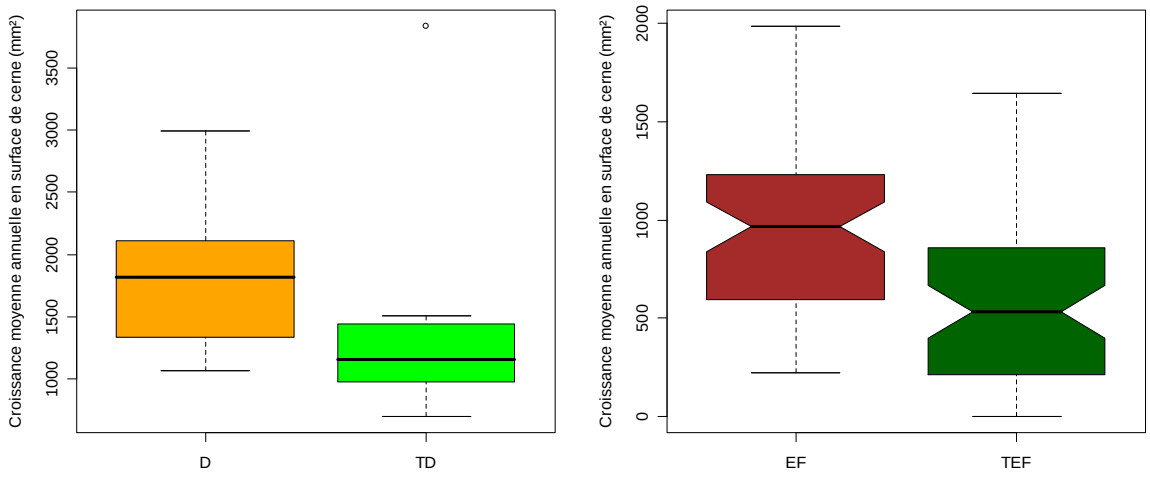


Figure 9 : Comparaison des gains de croissance pour les deux modalités d'intervention : détourage (D) et éclaircie forte (EF) par rapport à la placette témoin (T). Pour la comparaison avec D, on a utilisé les 3 arbres désignés de la placette T (TD, figure de gauche) ; pour la comparaison avec EF, on a utilisé un même nombre d'arbres équivalent de la placette T (TEF, figure de droite) pour l'ensemble des sites étudiés.

La comparaison de la croissance des arbres désignés dans chaque modalité avec la croissance des arbres équivalents de la placette témoin (T) (Tableau 10), montre que la croissance des 3 arbres détourés de la placette D a augmenté de 30% par rapport à la croissance des 3 arbres désignés dans la placette témoin. Les arbres désignés de la placette EF ont aussi une croissance plus importante de 65% par rapport à la croissance des arbres équivalents de la placette T. Cela suggère que la modalité éclaircie forte a entraîné une amélioration de la croissance des arbres plus importante que le détourage.

Tableau 10 : Comparaison globale pour les trois parcelles de la croissance moyenne annuelle en surface de cerne ($mm^2.an^{-1}$) des arbres désignés des placettes détourage (D) et éclaircie forte (EF) par rapport à la croissance des arbres équivalents de la placette témoin (T). TD représente les 3 arbres désignés dans la placette T (équivalents aux 3 arbres détourés). TEF représente les arbres de T équivalents des arbres désignés de la modalité EF.

D-TD	(D-TD)/TD	EF-TEF	(EF-TEF)/TEF
428	0,30	382	0,65

3.2.1.2. Évolution des effets moyens des éclaircies dans le temps

Le test de Wilcoxon de l'effet global des années sur la croissance en surface de cerne montre qu'il n'y a pas en moyenne de différence significative entre la croissance d'une année à l'autre suite à l'éclaircie, ce qui signifie qu'il n'y a pas de tendance moyenne générale d'évolution de la croissance au cours du temps, mais ceci n'exclut pas des tendances contradictoires entre parcelles. Cependant, en prenant la croissance de tous les arbres désignés de chaque modalité des 3 sites, on voit que la tendance des surfaces de cerne n'est pas nette pour les arbres de la modalité D (augmente en 2007 par rapport à 2006, puis la variabilité inter- individuelle de la croissance 2008 ne permet pas de distinguer la tendance de cette croissance par rapport à l'année précédente, Figure 10, gauche). Par contre, cette tendance est plus nette pour la croissance des arbres désignés de la modalité EF où la croissance en surface de cerne tend à augmenter en moyenne d'une année à l'autre (Figure 10, droite).

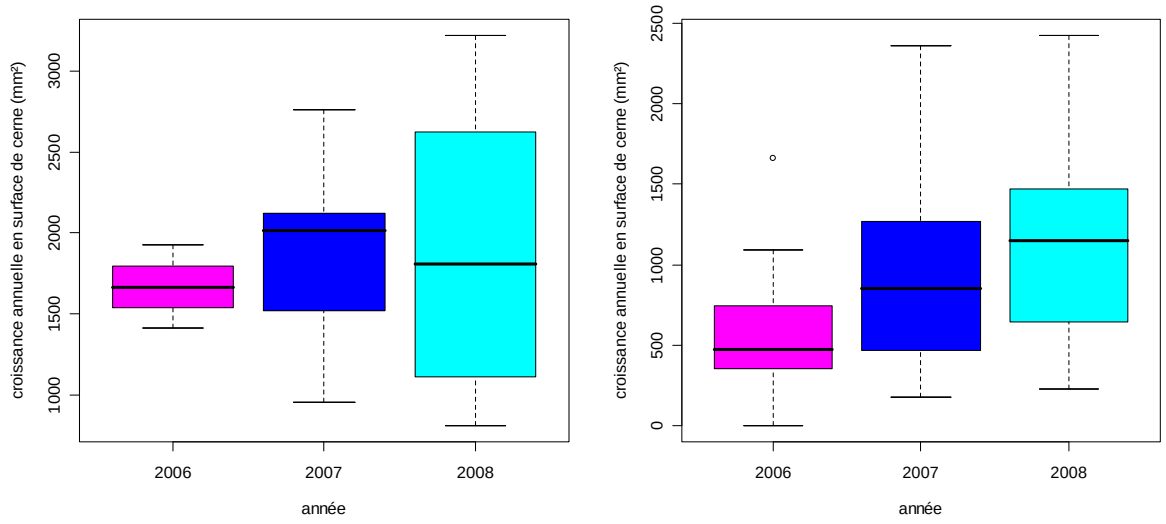


Figure 10 : Tendance moyenne de la croissance en surface de cerne des arbres détourés (D) (à gauche) et des arbres des placettes EF (à droite) au cours du temps suite à l'éclaircie.

3.2.1.3. Différences entre parcelles :

On compare ici l'effet des modalités sylvicoles suivant les parcelles. Le paramètre utilisé pour cette comparaison est la croissance annuelle moyenne en surface des cernes, calculée pendant les années suivant les interventions sylvicoles.

Le test de Kruskal-Wallis n'a pas donné de différence significative entre les croissances des 3 parcelles ni pour la modalité D, ni pour la modalité EF (Tableau 11).

Tableau 11 : Test de Kruskal-Wallis de la croissance des arbres désignés selon les parcelles pour les 2 modalités (EF et D). La croissance utilisée est la croissance moyenne annuelle en surface de cerne obtenue après les interventions ($mm^2.an^{-1}$). DL est le nombre de degrés de liberté, χ^2 est la valeur du coefficient du test et p est la probabilité que l'hypothèse nulle soit vraie.

Modalité	Facteur	DL	χ^2	p
D	parcelle	2	2,4	0,30
EF	parcelle	2	2,6	0,27

Cependant, à la différence de ce qu'a montré le test de Kruskal-Wallis, le boxplot des 3 arbres détourés (Figure 11 gauche) montre que les arbres de la parcelle Pr1 ont un accroissement annuel beaucoup moins important par rapport aux autres parcelles (B6 et M2) qui semblent avoir des accroissements proches. Pour les arbres désignés de la modalité EF, le boxplot de la croissance de ces arbres (Figure 11 droite) montre, comme le test de Kruskal-Wallis, qu'il n'y a pas de différence significative entre les croissances des arbres désignés soumis à la modalité éclaircie forte des 3 parcelles.

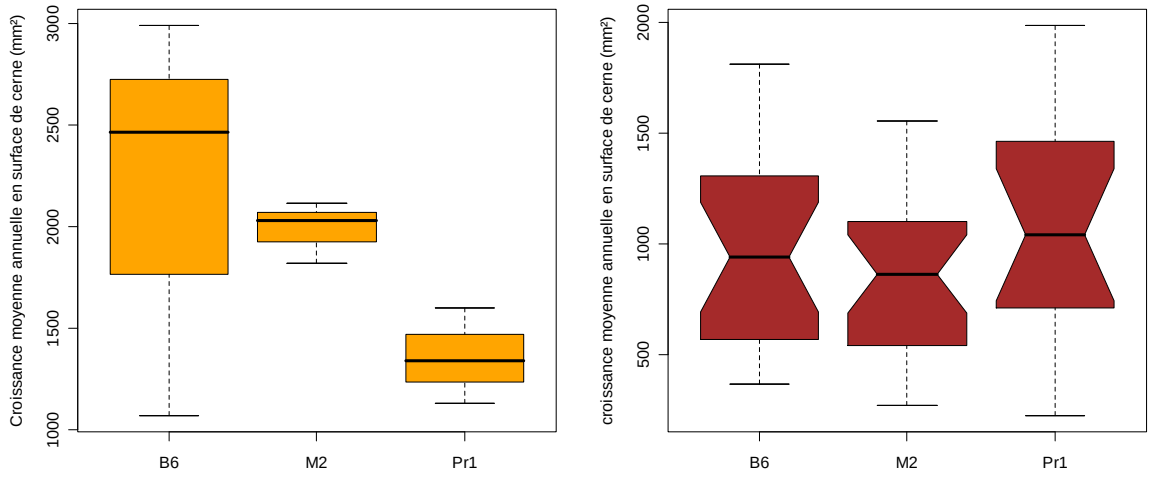


Figure 11 : Comparaison de la croissance annuelle en surface de cerne des arbres désignés dans les 3 parcelles. A gauche : les arbres détourés, à droite : les arbres désignés dans les placettes EF. La croissance calculée est la moyenne des croissances annuelles des années suivant le détourage.

La variabilité entre parcelles des réponses aux éclaircies observable sur la figure 11 pourrait être liée à la variabilité des surfaces terrières des arbres enlevés (G) dans chacune des parcelles. Pour mieux prendre en compte les caractéristiques de chaque peuplement dans chaque parcelle, on rapporte ce facteur à la surface terrière des placettes avant éclaircie en % (G %) pour tester

s'il est en relation avec la croissance moyenne annuelle en surface de cerne de chaque parcelle pour chaque modalité. La figure 12 montre que la relation entre la croissance annuelle après éclaircie et la surface terrière enlevée dans chaque placette est négative pour les 2 modalités (D et EF) (R^2 de Spearman = -0.94, p = 0.017), ce qui est surprenant et semble plutôt indiquer que ce facteur n'intervient pas directement dans la réaction moyenne des parcelles à l'éclaircie. On observe également la même tendance pour G % dans les deux modalités.

On observe aussi sur la même figure (Figure 12 gauche) une différence entre parcelles au niveau de la croissance des arbres détourés par rapport aux 3 arbres désignés dans les placettes témoin où les arbres détourés des parcelles B6 et M2 ont une croissance plus importante que les 3 arbres de la parcelle témoin, alors que la parcelle Pr1 montre un comportement inverse. Les arbres désignés de la placette témoin de cette parcelle ont une croissance plus importante que les arbres détourés. Les arbres désignés de la modalité EF ont toujours, dans les 3 parcelles, une croissance plus importante que celle des arbres équivalents des placettes T (Figure 12 droite).

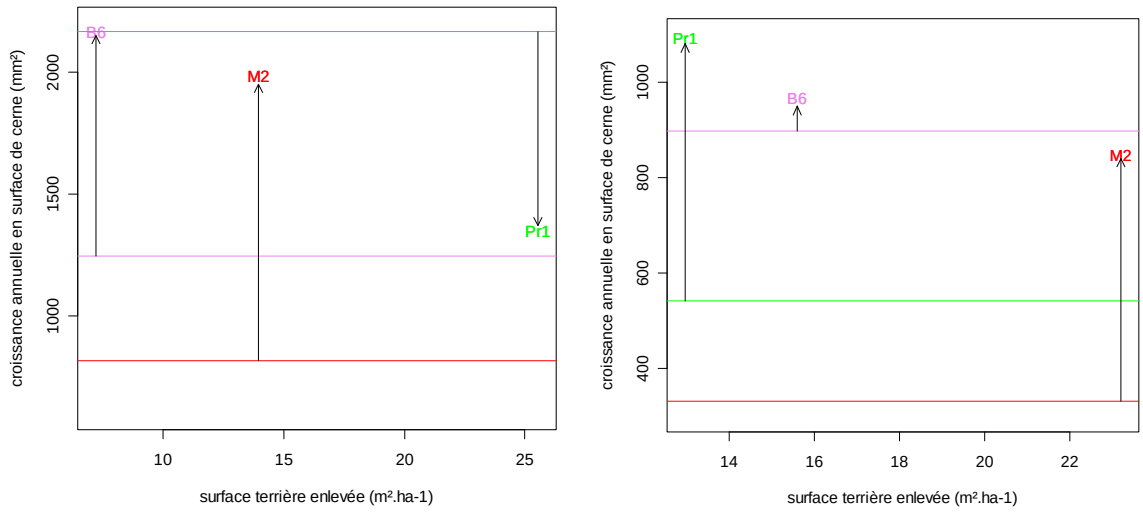


Figure 12 : Relation entre la croissance moyenne annuelle des parcelles et la surface terrière enlevée (G) dans la modalité D (à gauche) et dans la modalité EF (à droite). La croissance est exprimée en surface de cerne (mm^2) et la surface terrière enlevée en $m^2.ha^{-1}$. Les lignes horizontales représentent la croissance moyenne annuelle des 3 arbres désignés dans les placettes T (figure de gauche) et des arbres des placettes T équivalents aux arbres désignés de la modalité EF (figure de droite). Chaque couleur des lignes correspond à une parcelle.

Un autre facteur explicatif possible de la variabilité entre parcelles des réactions aux éclaircies, surtout pour les placettes D, est constitué par les conditions locales de milieu. Ainsi, en comparant la croissance moyenne en surface de cerne des arbres non détourés restant sur place après détourage (DT) avec celle des arbres de la placette témoin (T) (Tableau 12), on trouve que les arbres DT de la parcelle M2 ont une croissance beaucoup plus importante que ceux de la placette T (DT/T = 123%), ce qui pourrait s'expliquer par des micro-conditions stationnelles

plus favorables dans la placette D que dans la placette T de la parcelle M2. Cela permettrait d'interpréter la croissance relativement importante des arbres désignés de la placette D de cette parcelle par rapport à la croissance des arbres de la placette D de la parcelle Pr1 (résultat visible dans la figure 11). Inversement, dans la parcelle Pr1, les conditions de croissance dans la placette D semblent moins bonnes que dans la placette T (DT/T =50 %) et pourraient expliquer à la fois la faible croissance des arbres D (Figure 11) et leurs performances négatives vis-à-vis des arbres homologues T (Figure 12). Enfin, en parcelle B6 (croissance relativement bonne des arbres D, voir figure 11, et DT/T = 74 %), en suivant le même raisonnement, les conditions de croissance en placette D seraient plutôt défavorables à la croissance localement. Au total, les différences de réaction au détourage entre les 3 parcelles peuvent être en partie interprétées par des différences de conditions stationnelles locales, en particulier entre placettes D et T : l'effet détourage pourrait être considéré comme sous-estimé dans les parcelles Pr1 et B6, et surestimé dans la parcelle M2. Ainsi la différence entre M2 et Pr1 (Figure 11) serait diminuée, et celle entre B6 et M2 (Figure 11) serait augmentée.

Tableau 12 : comparaison de la croissance des arbres non détourés restant sur place après détourage (DT) avec la croissance des arbres de la placette témoin (T) des 3 parcelles. La croissance est estimée en mm^2, elle représente la croissance annuelle moyenne des arbres en surface de cerne.

Parcelle	DT	T	DT/T (%)
B6	414	559	74
M2	409	332	123
Pr1	400	800	50

3.2.1.4. Variabilité des effets des éclaircies

3.2.1.4.1. Interactions entre modalité, parcelle et année

L'importance des différences entre les modalités au niveau global en terme de gain de croissance dû à l'éclaircie (§ 3.2.1.1) est variable en fait d'une parcelle à l'autre comme montré dans la figure 12. La proximité entre les modalités se retrouve dans la parcelle B6, mais ce n'est pas le cas pour la parcelle M2 pour laquelle la différence est significative entre les 3 arbres détourés et les 3 désignés de la placette T, quelle que soit l'année de mesure de la croissance (sauf pour l'année 2008, Tableau 13). De même entre les arbres désignés de la modalité EF et les arbres équivalents de la placette T. Pour la parcelle Pr1, on a uniquement noté une différence significative entre la croissance des arbres désignés de la modalité EF et celle des arbres équivalents de la placette T (Tableau 13). Ces résultats sont illustrés par les figures 13, 14 et 15.

Tableau 13 : résultats du test de Kruskal-Wallis de comparaison entre la croissance des arbres détourés (D) et celle des arbres désignés de la placette témoin (TD) et entre la croissance des arbres désignés de la modalité éclaircie forte (EF) et celle des arbres équivalents de la placette témoin (TEF) dans chaque parcelle et pour chaque année de croissance suivant l'éclaircie. DL est le nombre de degrés de liberté. χ^2 est la valeur du coefficient du test et p est la probabilité que l'hypothèse nulle soit vrai.

parcelle	modalité	année	DL	χ^2	p
B6	D et TD	2007	1	2,3333	0,127
		2008	1	0,4286	0,513
		moy	1	0,4286	0,513
	EF et TEF	moy	1	0,1324	0,716
M2	D et TD	2006	1	3,8571	**0,050**
		2007	1	3,9706	**0,046**
		2008	1	3,1579	0,076
		moy	1	3,8571	**0,050**
	EF et TEF	moy	1	20,7936	**5,12E-06**
Pr1	D et TD	2007	1	0,0476	0,827
		2008	1	0,4286	0,513
		moy	1	0,4286	0,513
	EF et TEF	moy	1	6,8422	**0,009**

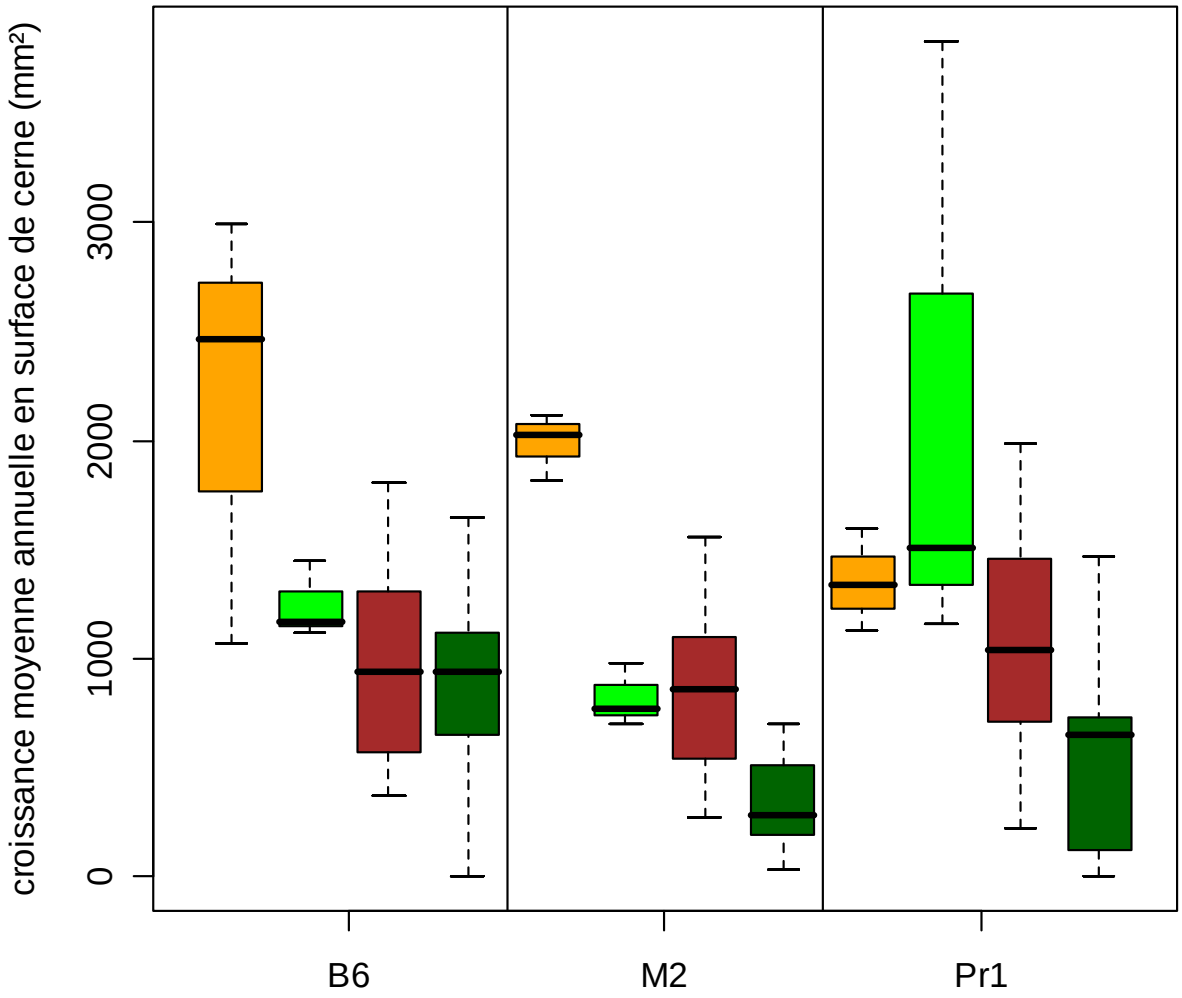


Figure 13 : Croissance moyenne annuelle en surface de cerne des arbres désignés dans les 3 parcelles étudiées. La croissance moyenne annuelle des arbres détourés est en orange, des arbres désignés de la placette témoin est en vert clair (TD), la croissance moyenne annuelle des arbres désignés dans la modalité éclaircie forte est en brun et celle des équivalents dans la placette témoin (TEF) est en vert foncé. La croissance est estimée en mm^2.

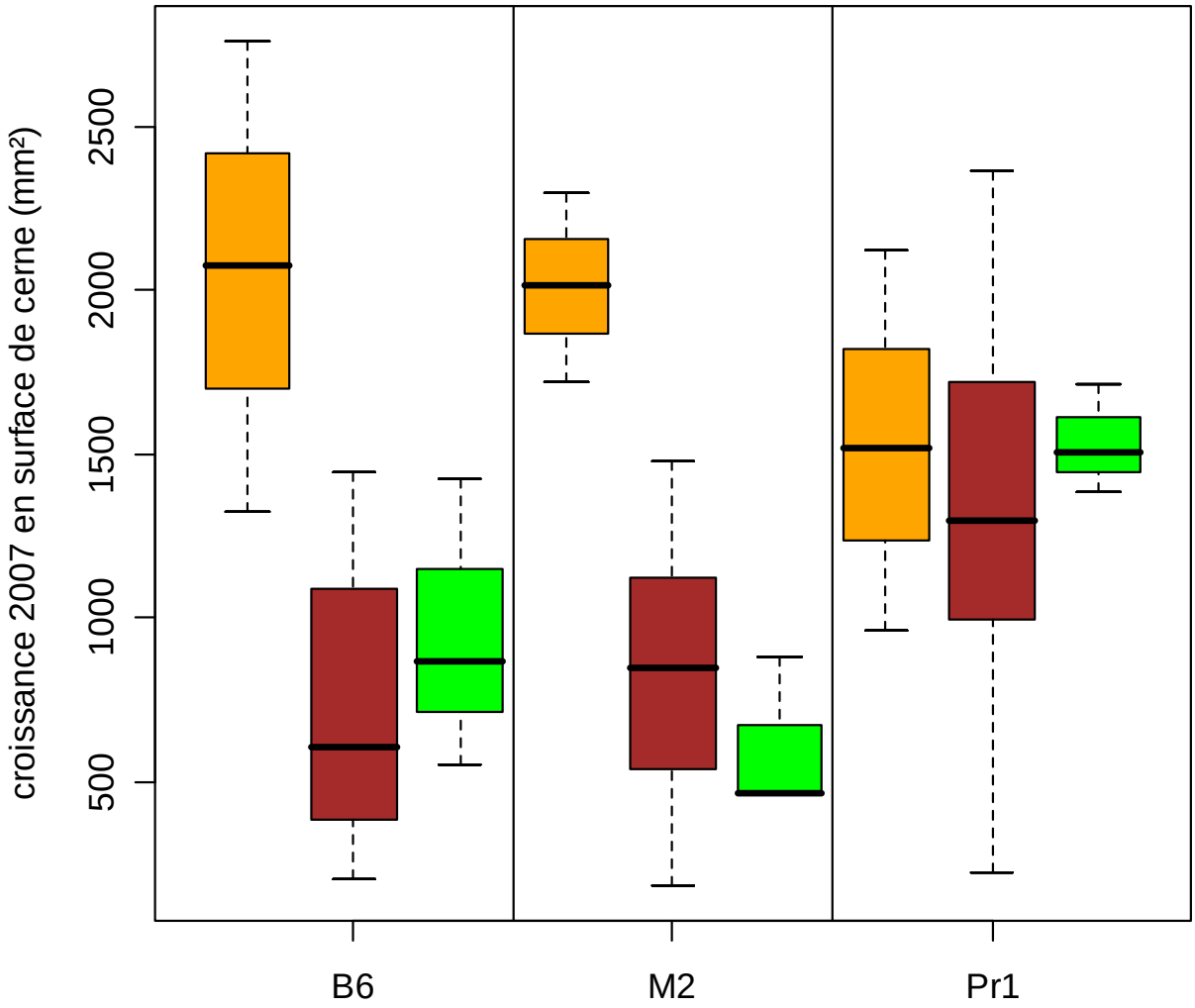


Figure 14 : Croissance en surface de cerne de l'année 2007 des arbres désignés dans les 3 parcelles étudiées. La croissance des arbres détourés est en orange, des arbres désignés de la placette témoin (TD) est en vert, la croissance des arbres désignés dans la modalité éclaircie forte est en brun. La croissance est estimée en mm^2.

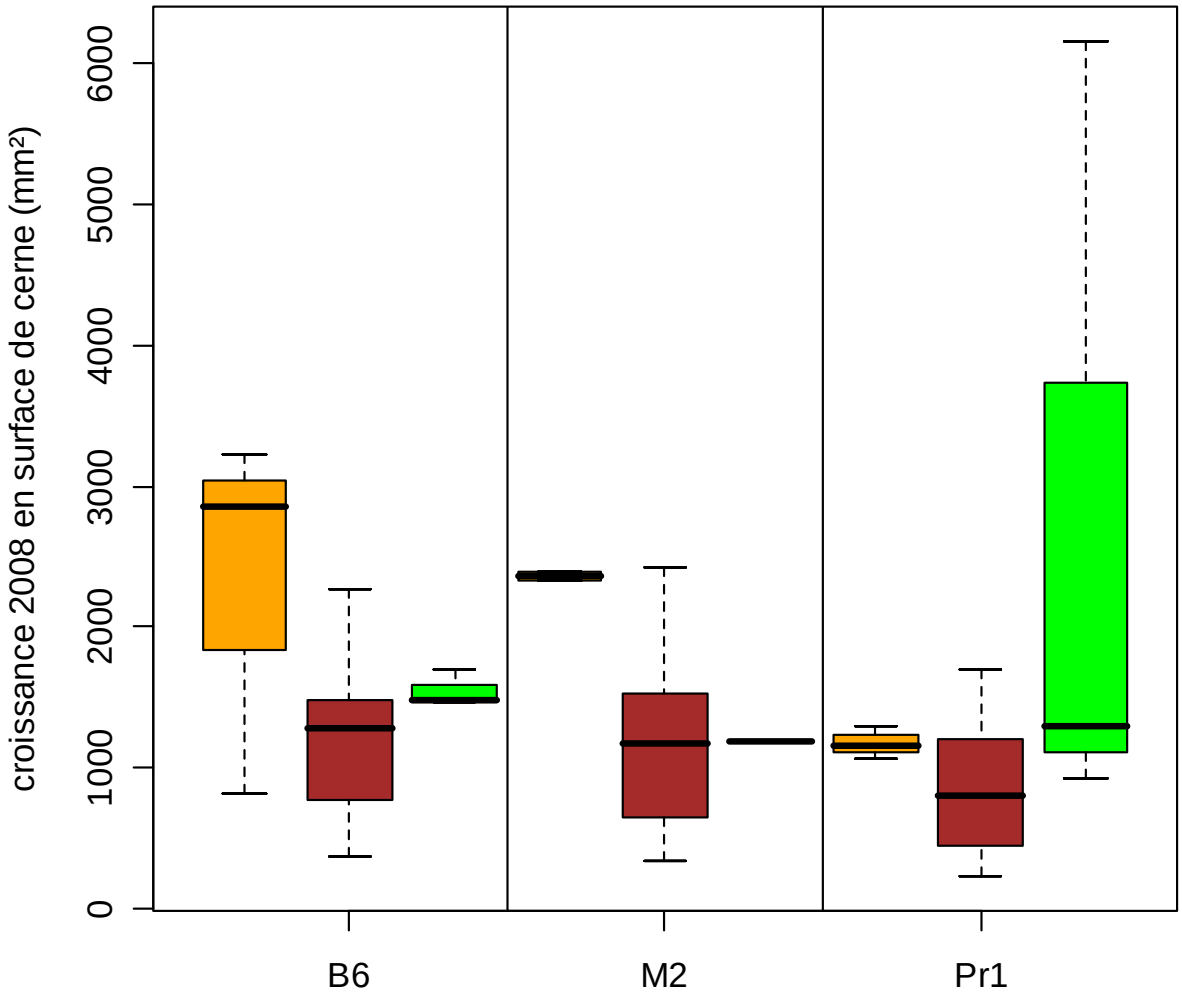


Figure 15 : Croissance en surface de cerne de l'année 2008 des arbres désignés dans les 3 parcelles étudiées. La croissance des arbres détourés est en orange, des arbres désignés de la placette témoin (TD) est en vert, la croissance des arbres désignés dans la modalité éclaircie forte est en brun. La croissance est estimée en mm^2.

- l'étude de la variabilité de croissance selon l'année dans chaque modalité au niveau parcelle (arbres) montre que l'absence de différence entre années d'une même modalité vue ci-dessus (§3.2.1.2.) au niveau global est confirmée pour la placette D dans toutes les parcelles à l'aide du test de Wilcoxon. Cependant, ce dernier test montre que la croissance des arbres de la modalité EF est significativement différente d'une année à l'autre et dans les 3 parcelles (Tableau 14).

Tableau 14 : Résultats du test de Wilcoxon sur la différence inter-annuelle de la croissance en surface de cerne dans chaque modalité et pour chaque parcelle. Les différences significatives entre croissances annuelles sont en caractères gras. ***V*** est la variable du test et p est la probabilité de risque.

Facteur	parcelle	modalité	V	p
années 2007-2008	B6	D	2	0,75
		EF	4	**7,46E-05**
	M2	D	0	0,50
		EF	18	**0,0002**
	Pr1	D	4,5	0,586
		EF	95,5	**0,006**
années 2006-2007	M2	D	0	0,149
		EF	21,5	**0,005**
années 2006-2008	M2	D	0	0,50
		EF	3	**3,90E-05**

L'analyse par le test de Kruskal-Wallis de l'effet parcelle sur la croissance dans chaque modalité, au niveau annuel, montre que dans la modalité D, la croissance des arbres désignés n'est pas significativement différente d'une parcelle à l'autre quelle que soit l'année de croissance suivant l'éclaircie. Pour les arbres de la modalité EF, l'effet parcelle est variable selon l'année de la mesure de croissance. La croissance des arbres de cette modalité est significativement différente d'une parcelle à l'autre pour l'année 2007, alors qu'elle ne l'est pas l'année 2008 (Tableau 15).

Cependant, la représentation en boxplot montre que les arbres détourés de la parcelle Pr1 ont une croissance plus importante que celle des arbres détourés des autres parcelles (accroissement 2008 et accroissement moyen, Figures 15 et 13). Elle montre aussi que les arbres désignés de la modalité EF de cette parcelle (Pr1) ont la tendance à avoir une croissance plus importante que celle des autres parcelles en 2007 (Figure 14). Puis en 2008 la croissance des arbres de la modalité EF de B6 et M2 tend à augmenter et à être proche de celle des arbres de Pr1 (Figure 15).

Tableau 15 : Résultats du test de Kruskal-Wallis sur la différence de la croissance en surface de cerne dans chaque modalité en fonction de la parcelle. Les différences significatives entre les parcelles sont en caractères gras. DL est le nombre de degrés de liberté, χ^2 est la valeur du coefficient du test et p est la probabilité que l'hypothèse nulle soit vraie.

Facteur	modalité	année	DL	χ^2	p
parcelle	D	2007	2	1,0667	0,587
		2008	2	1,8056	0,405
		Croiss.ann.moy.	2	2,4	0,301
	EF	2007	2	9,8065	**0,007**
		2008	2	3,2168	0,200
		Croiss.ann.moy.	2	2,6126	0,271

La comparaison générale entre les parcelles et les années au niveau de la croissance suite à l'éclaircie pour chaque modalité est présentée dans le tableau 16.

Tableau 16: Comparaison de la croissance en surface de cerne suite à l'éclaircie entre les parcelles et les années. D représente la modalité détourage et EF la modalité éclaircie forte. Les cases de même lettre ne sont pas différentes significativement. La croissance 2006 n'est disponible que pour les arbres de la parcelle M2. .

Modalité	année	B6	M2	Pr1
D	2006		a	
	2007	a	a	a
	2008	a	a	a
EF	2006		b	
	2007	c	d	e
	2008	f	f	f

3.2.1.4.2. Points commun entre parcelles et années

Le gain de croissance suite à l'éclaircie par rapport à la croissance des arbres de la placette témoin varie d'une parcelle à l'autre (Figures 12, 13, 14 et 15). Dans les placettes EF des 3 parcelles, la croissance suite à l'intervention est significativement différente d'une année à l'autre. Elle ne l'est pas pour les placettes D quelle que soit la parcelle. Pour toutes les années de croissance après intervention, il n'y a pas d'effet parcelle sur la croissance des arbres détourés mais sur la croissance des arbres désignés de la modalité EF et surtout en 2007 (Tableau 15).

3.2.1.4.3. Évolution de la croissance dans le temps

L'analyse de la tendance moyenne de la croissance des arbres désignés des 3 placettes de chaque parcelle (Figure 16) montre que la croissance annuelle des arbres désignés des parcelles B6 et M2 augmente d'une année à l'autre après éclaircie ; et que l'augmentation est plus rapide dans la placette EF par rapport à la placette D dans la parcelle B6. Par contre, pour les arbres de la parcelle Pr1, la croissance des arbres désignés des placettes D et EF tend à diminuer avec le temps.

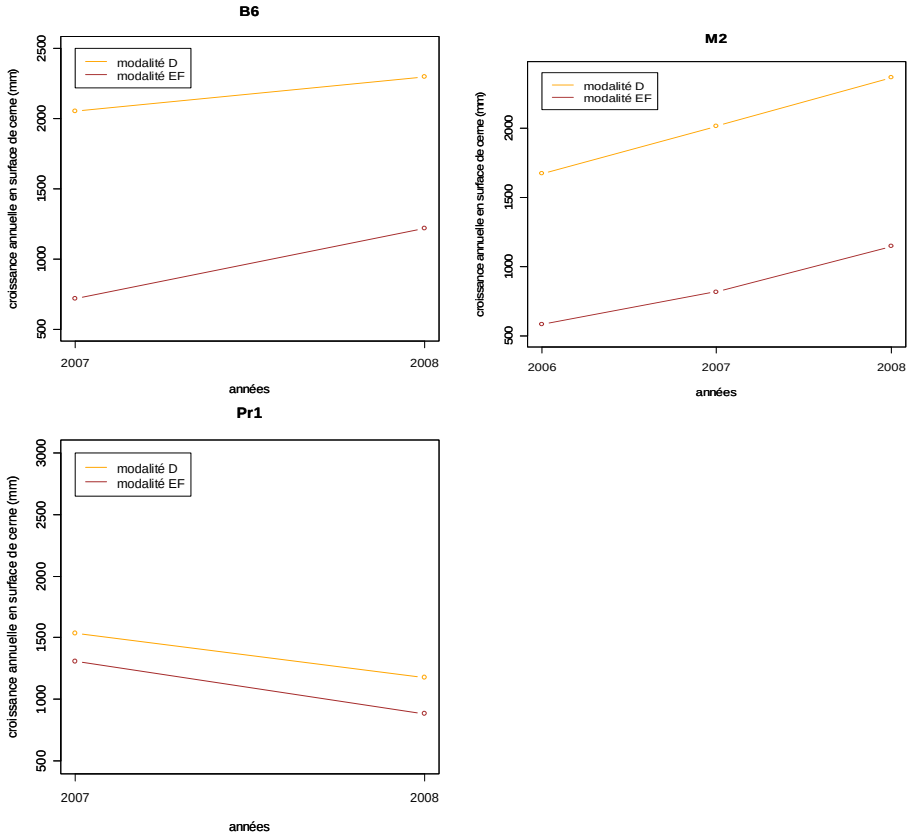


Figure 16 : Tendance de la croissance en surface de cerne (mm^2) des arbres désignés des modalités détourage (D) et éclaircie forte (EF) dans les 3 parcelles en fonction du temps pour les années suivant l'éclaircie.

3.2.2. VARIABILITE INTER-INDIVIDUELLE (A L'ECHELLE DE L'ARBRE) DE LA REACTION A L'ECLAIRCIE

3.2.2.1. Rôle du voisinage de l'arbre (modalité EF)

La relation entre la croissance et les Sd2 a été analysée uniquement pour les arbres désignés de la modalité EF car c'est la modalité qui comporte le plus grand nombre d'arbres désignés et qui est de ce fait la plus propice aux analyses. L'indice Sd2 a été calculé en utilisant plusieurs surfaces autour des arbres désignés (50, 70, 100 et 300 m^2), et en considérant trois catégories d'arbres voisins (existants avant éclaircie, enlevés par l'éclaircie, et restants après éclaircie). Les variables de croissance utilisées ont été les accroissements (annuels ou cumulés) en surface de cerne suite aux interventions sylvicoles. Les résultats sont présentés pour chaque parcelle dans les tableaux 17, 18 et 19.

Tableau 17 : Relations entre Sd2 et croissance en parcelle B6. 300, 100, 70 et 50 sont les surfaces (en m^2) autour des arbres désignés prises en compte lors du calcul de Sd2. Croiss1, 2, 3 sont les croissances annuelles en surface de cerne respectivement des 1ère, 2ème et 3ème années suivant l'intervention. « Rho » représente le coefficient de corrélation de Spearman, « p » est la probabilité du risque.

surface voisinage (m^2)	**base de calcul de Sd2**	**croiss1**		**croiss2**		**croiss. totale 2ans**	
		Rho	**p**	**Rho**	**p**	**Rho**	**p**
300	Peuplement avant intervention	0,14	0,752	0,02	0,977	0,14	0,752
	Peuplement après intervention	-0,38	0,360	0,10	0,840	0,07	0,882
	Arbres enlevés	0,40	0,327	-0,05	0,935	0,00	1,000
100	Peuplement avant intervention	-0,17	0,497	-0,16	0,523	-0,19	0,450
	Peuplement après intervention	0,00	0,987	-0,02	0,935	-0,04	0,871
	Arbres enlevés	-0,38	0,121	-0,23	0,354	-0,30	0,229
70	Peuplement avant intervention	-0,06	0,789	0,15	0,525	0,03	0,892
	Peuplement après intervention	0,25	0,279	0,12	0,618	0,15	0,514
	Arbres enlevés	-0,19	0,427	0,04	0,855	-0,10	0,682
50	Peuplement avant intervention	-0,28	0,215	0,05	0,821	-0,14	0,539
	Peuplement après intervention	0,12	0,592	0,10	0,681	0,07	0,752
	Arbres enlevés	-0,23	0,309	0,05	0,825	-0,09	0,697

Tableau 18 : Relations entre Sd2 et croissance dans la parcelle M2. 300, 100, 70 et 50 sont les surfaces (en m^2) autour des arbres désignés prises en compte lors du calcul de Sd2. Croiss1, 2, 3 sont les croissances en surface de cerne respectivement des 1ère, 2ème et 3ème année suivant l'intervention. « Rho » représente le coefficient de corrélation de Spearman, « p » est la probabilité du risque.

surface voisinage (m^2)	**base de calcul de Sd2**	**croiss1**		**croiss2**		**croiss3**		**Croiss.totale 3ans**	
		Rho	**p**	**Rho**	**p**	**Rho**	**p**	**Rho**	**p**
300	Peuplement avant intervention	-0,38	0,201	-0,51	0,078	-0,47	0,102	-0,47	0,106
	Peuplement après intervention	-0,10	0,754	0,03	0,922	-0,03	0,929	0,02	0,942
	Arbres enlevés	-0,27	0,373	-0,40	0,18	-0,36	0,223	-0,38	0,937
100	Peuplement avant intervention	-0,32	0,123	-0,21	0,313	-0,38	0,064	-0,35	0,091
	Peuplement après intervention	-0,35	0,087	-0,33	0,108	-0,52	**0,007**	-0,46	**0,020**
	Arbres enlevés	-0,04	0,847	0,03	0,874	-0,02	0,92	-0,02	0,937
70	Peuplement avant intervention	0,10	0,623	-0,14	0,511	-0,17	0,404	-0,10	0,044
	Peuplement après intervention	-0,32	0,123	-0,33	0,110	-0,41	**0,04**	-0,41	**0,044**
	Arbres enlevés	0,40	**0,048**	0,32	0,12	0,29	0,165	0,35	0,084
50	Peuplement avant intervention	0,01	0,948	-0,11	0,607	-0,14	0,491	-0,14	0,489
	Peuplement après intervention	-0,37	0,07	-0,42	**0,036**	-0,43	**0,031**	-0,48	**0,015**
	Arbres enlevés	0,31	0,126	0,31	0,134	0,24	0,253	0,28	0,174

Tableau 19 : Relations entre Sd2 et croissance dans la parcelle Pr1. 300, 100, 70 et 50 sont les surfaces (en m^2) autour des arbres désignés prises en compte lors du calcul de Sd2. Croiss1, 2, 3 sont les croissances en surface de cerne respectivement des 1ère, 2ème et 3ème année suivant l'intervention. « Rho » représente le coefficient de corrélation de Spearman, « p » est la probabilité du risque.

surface voisinage (m^2)	**base de calcul de Sd2**	**croiss1**		**croiss2**		**croiss.totale 2ans**	
		Rho	**p**	**Rho**	**p**	**Rho**	**p**
300	Peuplement avant intervention	0,11	0,840	0,54	0,236	0,43	0,354
	Peuplement après intervention	-0,14	0,783	0,21	0,662	0,11	0,840
	Arbres enlevés	0,11	0,840	0,54	0,236	0,43	0,354
100	Peuplement avant intervention	-0,35	0,220	0,06	0,826	-0,11	0,716
	Peuplement après intervention	-0,39	0,169	-0,08	0,797	-0,18	0,542
	Arbres enlevés	-0,29	0,306	0,08	0,791	-0,09	0,750
70	Peuplement avant intervention	-0,39	0,166	-0,05	0,880	-0,22	0,454
	Peuplement après intervention	-0,55	**0,042**	-0,12	0,685	-0,30	0,300
	Arbres enlevés	-0,27	0,354	-0,10	0,727	-0,20	0,492
50	Peuplement avant intervention	-0,54	**0,047**	-0,28	0,333	-0,40	0,160
	Peuplement après intervention	-0,25	0,390	0,13	0,649	-0,00	0,988
	Arbres enlevés	-0,55	**0,039**	-0,46	0,101	-0,52	0,062

Pour la parcelle M2, on constate que la croissance de la première année après intervention est expliquée par les valeurs de Sd2 enlevées calculées sur une surface de 70 m^2 autour des arbres désignés. La croissance des arbres désignés pendant la 2ème année après intervention dans cette parcelle est expliquée par les valeurs de Sd2 calculées sur une surface de 50 m^2 autour des arbres restants après intervention et par les valeurs de Sd2 enlevées pour la même surface. Ces deux facteurs expliquent aussi la croissance cumulée pendant les trois ans suivants l'intervention. Les valeurs de Sd2 calculées sur les arbres restants après intervention sur une

surface de 100, 70 et 50 m^2 expliquent la croissance de la 3ème année et de l'ensemble des 3 années des arbres de la parcelle M2.

Pour la parcelle Pr1, il semble que la croissance pendant la 1ère année après intervention ait été encore influencée par les valeurs de Sd2 calculées avant intervention pour une surface de 50 m^2 et aussi par Sd2 calculé après intervention pour une surface de 70 m^2. Les valeurs des Sd2 des arbres enlevés calculées sur une surface de 50 m^2 montrent curieusement une relation significative négative avec la croissance de la 1ère année après intervention, et non-significative avec la croissance cumulée des deux années après intervention. En revanche, pour la parcelle B6, le voisinage ne semble avoir aucune influence sur la croissance des arbres désignés quelle que soit la surface de voisinage utilisée.

3.2.2.2. Rôle des dimensions initiales des arbres

Les dimensions initiales étudiées sont les dbh des arbres désignés mesurés avant intervention, ainsi que les surfaces et les volumes des houppiers de ces arbres (l'étude des houppiers concerne les arbres de la parcelle M2 et 8 arbres de la parcelle Pr1 dont 3 appartiennent à la modalité EF). L'effet des dimensions initiales a été analysé sur les résidus de la relation croissance-voisinage. Comme la croissance des arbres de la parcelle B6 n'a montré aucune corrélation avec le voisinage, on a analysé l'effet des dimensions initiales directement sur la croissance et on a fait de même pour comparer cette parcelle avec les autres parcelles.

3.2.2.2.1. dbh initial

Tous les résidus de toutes les corrélations significatives entre la croissance et l'indice de voisinage Sd2 sont expliqués par les dbh initiaux des arbres désignés de la modalité éclaircie forte des parcelles M2 et Pr1 (Tableau 20)

Tableau 20 : Corrélations entre les résidus des corrélations significatives de la croissance des arbres désignés de la modalité éclaircie forte (EF) suite aux interventions sylvicoles avec l'indice de voisinage Sd2, et leurs dbh initiaux. Croissance 1ère an, 2ème an, 3ème an sont respectivement : la croissance des arbres pendant la 1ère année, la 2ème année et la 3ème année après intervention. Croissance totale à 2 ans et à 3ans représentent respectivement la croissance cumulée pendant les 2 et les 3 années suivant l'intervention. Le chiffre suivant Sd2 représente la surface autour des arbres désignés utilisée pour calculer Sd2. ap, av et enlevé représentent la base de calcul de Sd2 (calcul de Sd2 sur les arbres présents avant éclaircie « av », sur les arbres présents après éclaircie « ap » et sur les arbres enlevés lors de l'éclaircie « enlevé »). « Rho » est le coefficient de corrélation de Spearman, et « p » est la probabilité de risque.

Variables		**parcelle**			
		M2		**Pr1**	
Sd2	**croissance**	**Rho**	**p**	**Rho**	**p**
Sd2.70ap	Croissance 1ère an	x	x	-0,66	**0,010**
Sd2.50av		x	x	-0,72	**0,004**
Sd2.50enlevé		x	x	-0,76	**0,001**
Sd2.70enlevé		-0,47	**0,020**	x	x
Sd2.50ap	Croissance 2ème an	-0,41	**0,040**	x	x
Sd2.50ap	Croissance 3ème an	-0,61	**0,001**	x	x
Sd2.70ap		-0,54	**0,005**	x	x
Sd2.100ap		-0,44	**0,030**	x	x
50ap	Croissance totale à 3ans	0,53	**0,006**	x	x
70ap		-0,45	**0,020**	x	x
100ap		-0,41	**0,040**	x	x

En considérant la relation directe entre la croissance et le dbh des arbres désignés illustrée par la figure 17, on constate que la croissance de l'ensemble des arbres désignés après une année d'intervention pourrait être corrélée avec leurs dbh initiaux.

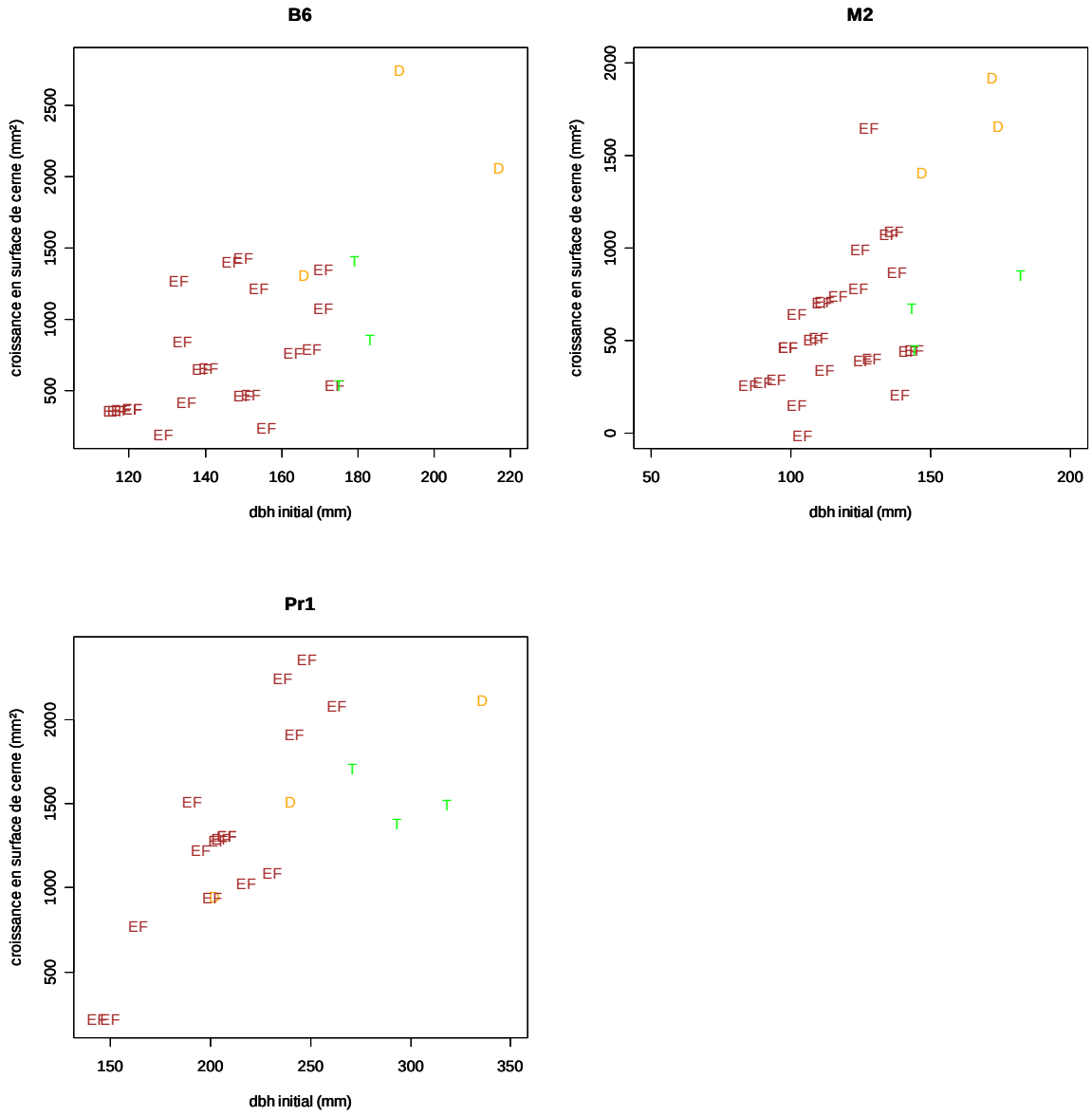


Figure 17 : Relation entre la croissance en surface de cerne de la 1ère année suivant l'éclaircie et les dbh initiaux des arbres désignés des 3 parcelles. Les lettres représentent les modalités d'intervention : D : les arbres détourés, EF : les arbres désignés soumis à l'éclaircie forte, T : les arbres désignés dans la placette témoin.

L'analyse des relations entre la croissance des arbres désignés des 3 placettes de chaque parcelle et leur dbh initial présentée dans le tableau 21 montre de plus que les dbh initiaux des arbres désignés des 3 parcelles expliquent en partie leur croissance en surface de cerne quelle que soit l'année de croissance.

Tableau 21 : Corrélations entre la croissance des arbres désignés suite aux interventions sylvicoles (en surface de cerne) et leur dbh initial dans les 3 parcelles étudiées et pour l'ensemble des modalités. Croissance 1ère an, 2ème an, 3ème an sont respectivement : la croissance des arbres de la 1ère année, de la 2ème et de la 3ème année après intervention. Croissance totale à 2 ans et à 3ans représentent respectivement la croissance cumulée pendant les 2 et les 3 ans suivant l'intervention. « Rho » est le coefficient de la corrélation de Spearman, et « p » est la probabilité de risque.

croissance	**corrélation**	**Parcelle**		
		B6	**M2**	**Pr1**
Croissance 1ère an	Rho	0,64	0,53	0,77
	p	**0,0003**	**0,0020**	**2,37E-05**
Croissance 2ème an	Rho	0,63	0,42	0,50
	p	**0,0003**	**0,0200**	**0,0200**
Croissance 3ème an	Rho	x	0,61	x
	p	x	**0,0004**	x
Croissance totale à 2ans	Rho	0,66	0,49	0,72
	p	**0,0001**	**0,0060**	**0,0002**
Croissance totale à 3ans	Rho	x	0,60	x
	p	x	**0,0004**	x

L'analyse de cette relation sur les arbres désignés de la placette EF seuls (Tableau 22) conduit au même résultat que précédemment (corrélation significative entre la croissance des arbres et leur dbh initial), ce qui confirme que la croissance après éclaircie est liée au dbh initial pour tous les arbres des 3 parcelles quelle que soit la parcelle.

Tableau 22 : Corrélations entre croissance des arbres désignés de la modalité éclaircie forte (EF) suite aux interventions sylvicoles et leur dbh initial. Croissance 1ère an, 2ème an, 3ème an sont respectivement : la croissance des arbres de la 1ère année, de la 2ème et de la 3ème année après intervention. Croissance totale à 2 ans et à 3ans représentent respectivement la croissance cumulée pendant les 2 et les 3 ans suivants l'intervention. « Rho » est le coefficient de corrélation de Spearman et « p » est la probabilité de risque.

croissance	**corrélation**	**parcelle**		
		B6	**M2**	**Pr1**
Croissance 1ère an	Rho	0,52	0,39	0,77
	p	**0,010**	**0,050**	**0,001**
Croissance 2ème an	Rho	0,53	0,41	0,52
	p	**0,01**	**0,04**	**0,04**
Croissance 3ème an	Rho	x	0,63	x
	p	x	**0,0008**	x
Croissance totale à 2ans	Rho	0,54	0,48	0,69
	p	**0,009**	**0,020**	**0,003**
Croissance totale à 3ans	Rho	x	0,56	x
	p	x	**0,003**	x

Chez les arbres de la parcelle B6, dans laquelle le voisinage semble peu influent, la croissance des arbres est donc surtout liée à leur vigueur initiale. Le dbh initial des arbres désignés des parcelles M2 et Pr1 explique, en plus du voisinage, une partie de leurs réactions aux interventions sylvicoles.

3.2.2.2.2. Surface de houppier

Comme les surfaces des houppiers des arbres ne sont disponibles que pour les arbres des parcelles M2 et Pr1, la relation entre la croissance après éclaircie et les surfaces des houppiers a été analysée dans ces deux seules parcelles, en utilisant également les résidus des corrélations significatives entre la croissance et l'indice de voisinage Sd2 comme variable dépendante.

Dans la parcelle M2, les surfaces des houppiers des arbres désignés de la modalité EF expliquent une partie des résidus de la corrélation significative Sd2-surface de cerne de la 1ère année

suivant l'éclaircie. En revanche, on ne trouve pas d'effet significatif des surfaces des houppiers sur la croissance des arbres de la parcelle Pr1 (Tableau 23).

Tableau 23 : Corrélations entre les résidus des corrélations significatives de la croissance des arbres désignés de la modalité éclaircie forte (EF) suite aux interventions sylvicoles avec l'indice de voisinage Sd2, et les surfaces de leurs houppiers. Croissance 1ère an, 2ème an, 3ème an sont respectivement : la croissance des arbres de la 1ère année, de la 2ème et de la 3ème année après intervention. Croissance totale à 2 ans et à 3ans représentent respectivement la croissance cumulée pendant les 2 et les 3 ans suivant l'intervention. Le chiffre suivant de Sd2 représente la surface autour des arbres désignés utilisée pour calculer Sd2. ap, av et enlevé représentent la base de calcul de Sd2 (calcul de Sd2 avant éclaircie « av », après éclaircie « ap » et pour les arbres enlevés lors d'éclaircie « enlevé »). « Rho » est le coefficient de corrélation de Spearman et « p » est la probabilité de risque.

Variables		**Parcelle**			
		M2		**Pr1**	
Sd2	**croissance**	**Rho**	**p**	**Rho**	**p**
Sd2.70ap	Croissance 1ère an	x	x	-0,10	0,33
Sd2.50av		x	x	-0,10	0,33
Sd2.50enlevé		x	x	-0,10	0,33
Sd2.70enlevé		-0,55	**0,01**	x	x
50ap	Croissance 2ème an	-0,14	0,51	x	x
Sd2.50ap	Croissance 3ème an	-0,31	0,13	x	x
Sd2.70ap		-0,26	0,20	x	x
Sd2.100ap		-0,18	0,38	x	x
50ap	Croissance totale à 3ans	-0,28	0,17	x	x
70ap		-0,28	0,17	x	x
100ap		-0,24	0,25	x	x

Les volumes des houppiers (qui intègrent donc l'effet de la hauteur verticale des houppiers) montrent la même tendance que celle observée pour les corrélations entre les surfaces des houppiers et la croissance des arbres après intervention (résultats non-présentés).

3.2.2.3. Rôle de la dynamique de croissance avant éclaircie (modalité EF)

On compare ici le classement des arbres selon leurs accroissements (en surface de cerne) suite aux interventions sylvicoles (accroissements pendant la 1ère, 2ème, 3ème année suivant l'éclaircie et accroissement moyen cumulé depuis l'éclaircie) avec le classement de ces arbres selon leurs accroissements moyens pendant les 10 ans précédant les interventions en utilisant le test de Wilcoxon. Le résultat de ce test (Tableau 24) montre que la croissance des arbres désignés de la modalité EF après éclaircie est distribuée de manière significativement différente de celle des 10 dernières années avant éclaircie dans les 3 parcelles, mais pour des périodes après éclaircie différentes. Ainsi, la dynamique de la croissance passée pourrait expliquer la croissance de la 1ère année suivant l'éclaircie des arbres de la parcelles B6 où le classement des accroissements des arbres n'est pas significativement différent de celui existant avant éclaircie. La dynamique de croissance avant éclaircie n'a donc pas été modifiée significativement pendant la 1ère année après éclaircie dans cette parcelle, ce qui pourrait indiquer que l'éclaircie n'a modifié la croissance relative des arbres qu'à partir de la 2ème année après éclaircie dans cette parcelle, alors que son effet était plus net depuis la 1ère année dans les autres parcelles.

Le test de Wilcoxon montre aussi que la différence significative entre le classement des arbres selon leurs accroissements avant et après éclaircie a une tendance négative dans les parcelles B6 et Pr1, alors que dans la parcelle M2, elle est positive. Le classement de la croissance d'un grand nombre d'arbres de cette parcelle a donc été amélioré par l'éclaircie ; ce classement s'est en revanche dégradé après éclaircie pour un grand nombre d'arbres des 2 autres parcelles (Tableau 25). L'éclaircie aurait donc plutôt un effet perturbateur (tardif en B6 et précoce en Pr1) de la « hiérarchie sociale » des arbres dans les parcelles B6 et Pr1, avec davantage de rétrogradations que de progressions après éclaircie. En revanche, dans la parcelle M2, l'éclaircie montre dès la première année davantage de progressions que de rétrogradations.

Tableau 24 : Résultat du test Wilcoxon pour la relation entre le classement des accroissements des arbres désignés avant intervention (accroissement annuel en surface de cerne calculé pendant les 10 dernières années) et après intervention (accroissement en surface de cerne de la 1ère, 2ème, et 3ème année suivant l'éclaircie et l'accroissement moyen annuel pendant les années suivant l'éclaircie) dans les 3 parcelles. V est la somme des rangs signés positivement ; et p est la probabilité de risque. Les différences significatives sont en caractères gras.

Croissance	**B6**		**M2**		**Pr1**	
	V	**p**	**V**	**p**	**V**	**p**
Croissance 1ère an	114,5	0,737	172	**0,001**	0	**0,0001**
Croissance 2ème an	4	**1,34E-05**	134	0,12	65	0,80
Croissance 3ème an	x	x	76	0,47	x	x
croiss.ann.après	25	**0,002**	128	0,20	17	**0,013**

Tableau 25: Résultat du test Wilcoxon pour le sens des différences significatives entre le classement des accroissements des arbres désignés avant (accroissement annuel en surface de cerne calculé pendant les 10 dernières années) et après éclaircie (accroissement en surface de cerne de la 1ère et 2ème année suivant l'éclaircie et l'accroissement moyen annuel pendant les années suivant l'éclaircie) dans les 3 parcelles. V est le paramètre du test ; et p est la probabilité de risque. Les différences significatives sont en caractères gras.

Croissance	**Signe de la différence**	**B6**		**M2**		**Pr1**	
		V	**p**	**V**	**p**	**V**	**p**
Croissance 1ère année	différence>0	x	x	172	**0,0005**	0	1
	différence<0	x	x	172	0,9996	0	**3,05E-05**
Croissance 2ème année	différence>0	4	1	x	x	x	x
	différence<0	4	**6,68E-06**	x	x	x	x
croiss.ann.après	différence>0	25	0,9993	x	x	17	0,9949
	différence<0	25	**0,000845**	x	x	17	**0,006**

3.2.3. RECAPITULATION

On observe donc que les parcelles B6 et M2 se ressemblent au niveau de leur réaction aux deux modalités d'intervention sylvicole et que l'éclaircie forte a un effet plus fort sur la croissance des arbres désignés de ces parcelles par rapport à la croissance des arbres équivalents des placettes témoin. On retiendra également que le détourage entraîne une croissance moins importante des 3 arbres désignés par rapport à leurs homologues dans les placettes témoin que les arbres désignés de la modalité éclaircie forte. Cet effet est déjà net dès la 1ère année suivant l'intervention, et il augmente d'une année à l'autre. Cependant la modalité détourage a bien amélioré la croissance. En revanche, les arbres de la parcelle Pr1 semblent bien réagir pendant la 1ère année à l'éclaircie forte, mais cette réaction est restreinte à cette année-là. De toute façon, on voit que l'effet de l'intervention est peu visible sur les arbres de cette parcelle.

La variabilité interindividuelle des réactions à l'éclaircie est expliquée en partie par le voisinage (indice Sd2) sur des surfaces comprises entre 50 et 100 m^2 autour des arbres cibles dans la parcelle M2, ainsi que par les dimensions initiales de ces arbres (dbh et houppier). Par contre, il semble que la réaction des arbres de la parcelle B6 ne soit pas liée au voisinage, mais seulement au dbh initial des arbres et à la dynamique de croissance passée de ce peuplement, ce qui pourrait indiquer une implication importante des conditions stationnelles de cette parcelle dans les réponses de croissance. La croissance des arbres de la parcelle Pr1 semble être en relation avec les voisinages de surfaces comprises entre 50 et 70 m^2 pendant la 1ère année après intervention, mais pas l'année suivante. Elle est plutôt liée positivement au dbh initial des

arbres. La réaction aux interventions sylvicoles des arbres de ces parcelles est donc modulée par l'ensemble des facteurs étudiés.

L'ensemble des résultats significatifs sont présentés dans l'annexe 5.

4. DISCUSSION

On synthétise ici les résultats obtenus concernant les effets de la compétition intraspécifique sur la croissance en diamètre exprimée en surface de cerne d'accroissement annuel du bois.

On analyse tout d'abord l'état de la compétition et ses facteurs locaux à l'échelle de l'arbre, puis ses modifications à cette même échelle provoquées par les interventions sylvicoles expérimentées.

On s'intéresse ensuite aux résultats moyens émergeant à l'échelle de la parcelle, en relation à la fois avec les caractéristiques des parcelles et avec celles des modalités d'éclaircie.

On examine également la dynamique dans le temps de la réponse aux éclaircies selon les différents facteurs en jeu.

Enfin, après une tentative de synthèse des relations entre croissance, densité, âge et fertilité, on propose un point de vue critique sur nos résultats, leur portée et les perspectives qu'ils pourraient ouvrir.

4.1. EFFET DE LA COMPETITION INTER-INDIVIDUELLE AU NIVEAU DE L'ARBRE DANS LES ACCRUS DE FRENE

Le fait que la densité des placettes n'ait pas expliqué la croissance moyenne des arbres (Tableau 2), alors que cette croissance a été expliquée par l'indice de voisinage (Tableaux 4, 18 et 19), indique une hétérogénéité au niveau de la répartition spatiale des arbres dans ces placettes et donc de la compétition au niveau individuel.

On pense que l'indice de compétition qu'on a utilisé (Sd2) est un bon critère de la compétition inter individuelle car il a permis d'expliquer une bonne partie de la croissance des arbres de différentes tailles (dbh initial). Par exemple, dans la parcelle M2, les arbres désignés sont dans les classes 2 et 3 de dbh (voir annexe 1), alors qu'ils sont dans les classes 3, 4, 5 et 6 dans la parcelle Pr1. Pourtant, l'indice Sd2 a expliqué la croissance des arbres des deux parcelles. Il est donc possible de dire que l'effet de la compétition intraspécifique du frêne est bien représenté par le diamètre des arbres voisins situés à une distance maximum comprise entre 4 et 9,8 m des arbres cibles. Ce résultat est différent de ce qui a été trouvé pour le pin ponderosa (*Pinus ponderosa*) dont la croissance est corrélée à un indice de compétition différent selon la taille des arbres : la croissance des arbres ayant un dbh<10 cm est corrélée à la somme des hauteurs des arbres voisins situés à moins de 10,6 m, alors que la croissance des arbres les plus gros est

corrélée à la somme des surfaces terrières des arbres voisins situés à moins de 6,1 m (Woodall *et al.*, 2003). Mais il est en accord avec ce dernier en ce qui concerne la distance de compétition. En fait, contrairement à notre hypothèse de départ qui considérait qu'étant donné les dimensions importantes des arbres âgés (parcelle Pr1), l'effet de la compétition autour de ces arbres s'étend sur une distance plus importante que celle des arbres jeunes, on a trouvé que la distance de compétition des arbres âgés (4,7 m, Tableaux 4 et 19) est moins importante que celle des arbres jeunes (9,8 à 4 m, Tableaux 4 et 18). On peut expliquer ce résultat par une sensibilité relativement faible à la compétition des arbres âgés par rapport aux arbres jeunes (Bouchon *et al.*, 1989). Seuls les arbres très proches des arbres cibles âgés ont donc un effet de compétition sur ces arbres.

4.1.1. DANS LES PEUPLEMENTS EN PLACE

Les arbres semblent être sous l'effet d'un voisinage jusqu'à une surface de 300 m^2 autour d'eux. Cet effet est en fait différent d'un peuplement à l'autre (d'un site à l'autre) :

Pour les arbres de la parcelle B6, on ne voit cet effet que sur l'accroissement calculé pendant les 5 dernières années pour une surface de 300 m^2 autour de ces arbres ($p = 0,03$, Tableau 4). Il semble que le statut des arbres de la parcelle B6 vis à vis de la compétition avant dix ans soit différent de son niveau actuel car les Sd2 actuels n'expliquent pas l'accroissement annuel calculé pendant les 10 dernières années ($p = 0.1$). La distance de compétition influant sur la croissance des arbres de cette parcelle (9,8 m = 300 m^2) pourrait être due à l'existence d'arbres ayant des dimensions importantes à cette distance-là et qui peuvent ainsi être en concurrence avec les arbres étudiés.

Pour les arbres de la parcelle Pr1, l'effet de la compétition se limite au dbh qui semble influencé par la somme des diamètres des arbres situés sur une surface de 70 m^2. La faible distance de compétition (4.7 m = 70 m^2) pourrait être due à l'âge de cette parcelle comme on l'a évoqué ci-dessus. L'âge de ce peuplement pourrait aussi expliquer l'absence de l'effet de compétition sur l'accroissement annuel relativement récent (les 5 et 10 dernières années représentent une période courte au regard de l'âge de ce peuplement).

Dans la parcelle M2, on trouve un effet fréquent de la compétition sur la croissance des arbres pour toutes les surfaces étudiées (sauf 100 m^2) autour des arbres et pour les trois périodes d'accroissement étudiés (dbh et accroissement annuel calculé pendant les 5 et les 10 dernières années) (Tableau 4). On peut attribuer l'absence de l'effet de compétition sur une surface de 100 m^2 autour des arbres étudiés dans cette parcelle à une absence d'arbres concurrents ayant des dimensions importantes dans la partie de la surface de voisinage comprise entre 70 et 300 m^2.

Sur l'ensemble des corrélations étudiées entre Sd2 et la croissance (sd2 calculé sur plusieurs surfaces autour des arbres et la croissance estimée à plusieurs échelles de temps (acc.5, acc.10 et dbh)), elles sont le plus souvent significatives sur la parcelle M2 ; et le sont rarement sur les deux autres parcelles. Cela pourrait indiquer une sensibilité plus importante à la compétition des arbres de la parcelle M2 que celle des autres parcelles.

La comparaison entre les parcelles au niveau de leurs sensibilités à la compétition en utilisant l'indice C confirme le résultat précédent. Elle montre que les arbres de la parcelle M2 sont plus

sensibles à la compétition calculée sur une surface comprise entre 50 et 100 m^2 que les arbres des autres parcelles (Figure 7 en haut). Les arbres de la parcelle B6 montrent une sensibilité proche de celle des arbres de la parcelle Pr1 (Figure 7). Cependant, on remarque une différence significative globale entre les valeurs de C des parcelles, quelle que soit la surface de compétition (Tableau 6). Cette différence est surtout due à la sensibilité élevée de la parcelle M2 par rapport aux autres parcelles. L'âge jeune de cette parcelle (M2) et sa fertilité importante (voir chapitre croissance-nutrition minérale, Tableau 2 du §3.1.) pourraient expliquer cette sensibilité. Enfin, la figure 7 (en haut) montre également une tendance, visible pour les parcelles M2 et Pr1, à un niveau de compétition décroissant depuis la surface 50 m^2 jusqu'à la surface 300 m^2, qui pourrait être interprété comme l'existence d'une plus grande compétition avec les arbres les plus proches. On remarque aussi (Figure 7, en bas), sur ces deux parcelles, la tendance à une rupture du niveau de compétition (expliqué par le voisinage actuel) entre la période récente (0 à -10 ans) et la période plus ancienne (avant 10 ans), qui tend à montrer que le lien entre accroissement et voisinage actuel est limité dans le temps.

Facteurs explicatifs de la variabilité de la réponse à la compétition :

La réponse à la compétition semble modulée par la vigueur des arbres (dbh initial) des parcelles M2 et Pr1 surtout sur les accroissements des 5 dernières années (Tableau 7). Plus la taille initiale de l'arbre est importante, plus les résidus sont positifs (Figure 8). Cela signifie un effet de compétition plus faible sur les arbres de grandes dimensions. Plus l'arbre est gros, plus sa sensibilité à la compétition est faible (Woodall *et al.*, 2003 ; Boncina *et al.*, 2007). L'effet de la vigueur des arbres se voit peu sur les accroissements des arbres de la parcelle B6 (Tableau 7). Il ne peut donc pas expliquer les résidus de la corrélation significative entre Sd2 et acc.5 pour cette parcelle. On pense que la fertilité relativement faible de cette parcelle (voir chapitre croissance-nutrition minérale, Tableau 2 du §3.1.) ne permet ni à la compétition, ni à la vigueur de l'arbre d'influencer sa croissance (sauf l'accroissement acc.5 qui est en relation avec Sd2 calculé sur une surface de 300 m^2). Ce facteur pourrait en effet masquer les effets des deux facteurs (compétition et vigueur) sur la croissance des arbres de cette parcelle. La variabilité inter-individuelle de la croissance pourrait donc être due à d'autres facteurs comme une variabilité de la fertilité au niveau local liée à la micro topographie. On notera enfin la forme linéaire des contributions des diamètres initiaux à l'explication des résidus de croissance (Tableau 8), qui traduit la proportionnalité de cette contribution : la « résistance » d'un arbre à la compétition de ses voisins est en moyenne proportionnelle à son diamètre.

4.1.2. DANS LES PEUPLEMENTS ECLAIRCIS

Le changement de voisinage suite à l'éclaircie explique une partie importante de la croissance des arbres après éclaircie dans les parcelles M2 et Pr1, même si cette partie est moins importante que ce qui est expliqué par le dbh initial (en comparant les coefficients de corrélation de Spearman) (Tableaux 18, 19, 20, 21 et 22) :

Dans la parcelle M2, la croissance de la 1ère année après éclaircie des arbres restés en place est influencée par les diamètres des arbres enlevés dans la surface de 70m² autour des arbres désignés (plus la somme des carrés des diamètres des arbres enlevés est élevée, plus la croissance des arbres désignés est importante). Pendant la 2ème année suivant l'éclaircie, c'est la somme des diamètres des arbres restants autour des arbres désignés sur une surface de 50 m² qui influence négativement la croissance des arbres désignés (Tableau 18). Plus les diamètres des arbres restants sont importants, moins la croissance est importante (Nolet *et al.*, 2001). Cette différence entre les surfaces de compétition pendant la 1ère et la 2ème année pourrait être due à une coupe des gros arbres situés dans la zone comprise entre 50 m² et 70 m² de surface, et qui étaient en concurrence avec les arbres désignés. Dès que ces arbres ont été supprimés, il ne reste que les arbres les plus proches (dans la surface de 50 m²) pour influencer la croissance. Une année plus tard, grâce à l'éclaircie, les arbres plus éloignés (jusqu'à 100 m² autour des arbres désignés) auraient des dimensions plus importantes qu'avant. Avec ces nouvelles dimensions, ces arbres seraient maintenant en concurrence avec les arbres désignés : on trouverait pour cette raison une corrélation entre la croissance et les sd2 calculés après éclaircie sur des surfaces jusqu'à 100 m².

Pour l'effet de l'indice de voisinage sur la croissance des arbres de la parcelle Pr1, il ne concerne que la croissance de la 1ère année suivant l'éclaircie (Tableau 19). Cette croissance est influencée négativement par les diamètres des arbres voisins existant avant l'éclaircie sur une surface de 50 m² et aussi par les arbres restant après éclaircie et situés sur une surface de 70 m².

L'absence de la corrélation significative entre Sd2 et la croissance après éclaircie des arbres de la parcelle B6 (Tableau 17) pourrait être due (comme dans le cas avant éclaircie) à la fertilité relativement faible de cette parcelle par rapport aux autres parcelles. Cette fertilité faible n'a pas permis à la compétition d'avoir un effet sur la croissance des arbres même dans le cas d'une amélioration des conditions de compétition permise par l'éclaircie.

Facteurs explicatifs de la réponse à la compétition :

La croissance des arbres suite au changement des conditions de compétition induit par l'éclaircie semble être modulée plutôt par leurs dimensions initiales que par le voisinage, et surtout par le dbh initial, alors que l'effet de la dimension initiale des houppiers se limite à la 1ère année suivant l'éclaircie. Ce résultat est proche de ce qui a été trouvé sur l'accroissement en surface terrière des hêtres désignés après éclaircie dans le sud-est de la Slovénie où la classe de dbh et la suppression des houppiers sont les facteurs les plus importants qui influencent la croissance en surface terrière des arbres désignés par rapport à d'autres facteurs comme la taille du houppier et le statut social de l'arbre (Boncina *et al.*, 2007).

Plusieurs études confirment l'effet des dimensions initiales, surtout le dbh, sur la réponse des arbres à l'éclaircie chez plusieurs espèces, comme le chêne et le hêtre (Cañellas *et al.*, 2004; Boncina *et al.*, 2007). Le dbh module la croissance des arbres même dans le cas de l'absence de l'effet de compétition comme la parcelle B6 (Tableau 21 et 22). L'absence de l'effet de la surface et du volume initial des houppiers (sauf pour la 1ère année) (Tableau 23) semble étonnante car le diamètre du houppier est corrélé avec le dbh (Hemery *et al.*, 2005) (diamètre houppier = 25.451*dbh + 0.075, R^2 = 0.56, p = 1.37e-06 *** ; résultats non présentés). Cela pourrait être dû

au développement des houppiers des arbres qui étaient dominés avant éclaircie. L'éclaircie a donc permis aux houppiers de ces arbres dominés de bien se développer et d'avoir une croissance équivalente ou supérieure à celle des arbres dominants avant éclaircie. Les houppiers se sont donc beaucoup développés pendant la 1ère année et donc la croissance de la 2ème année a été beaucoup plus importante, car elle n'est plus dépendante de la dimension du houppier avant éclaircie mais de sa dimension après éclaircie. Le frêne pourrait donc avoir un comportement proche de celui du hêtre qui montre pendant la 1ère année une croissance importante de son houppier puis, quand le houppier occupe l'espace disponible, une augmentation de croissance de la tige en diamètre a lieu (Bouchon *et al.*, 1989).

4.1.3. COMPARAISON DES RESULTATS AVANT ET APRES ECLAIRCIE

On sait que les interventions sylvicoles ne modifient pas seulement le régime de compétition (Cescatti & Piutti, 1998) mais il semble qu'elles modifient aussi les modalités de compétition. Elles peuvent changer la distance de compétition (ex. : la surface de compétition avant éclaircie dans la parcelle M2 était 300, 70 et 50 m^2, alors qu'elle devient 100, 70 et 50 m^2 après éclaircie) et faire apparaître ou disparaître l'effet de compétition (ex. l'effet de la compétition sur 300 m^2 avant éclaircie autour des arbres de B6 n'apparaît plus après éclaircie). Ce changement d'effet dépendrait de la dimension et de la localisation des arbres coupés lors de l'éclaircie.

Cependant, dans les 2 cas (avant et après éclaircie), la parcelle M2 semble la plus sensible à la compétition alors que la parcelle B6 ne montre pas une réaction significative à ce facteur (sauf pour acc.5 et Sd2 calculé sur une surface de 300 m^2 avant éclaircie). La réaction de la parcelle Pr1 est toujours relativement faible (un seul effet de Sd2 calculé sur une surface de 70 m^2 sur le dbh avant éclaircie et un effet limité à la 1ère année après éclaircie). La surface de compétition, même si elle change après éclaircie, reste dans la même gamme (ce changement n'est pas très important) (300, 70 et 50 avant éclaircie devient 100, 70 et 50 après éclaircie dans M2 ; 70 avant éclaircie dans Pr1 devient 70 et 50 après éclaircie) sauf pour la parcelle B6 dans laquelle l'effet de la compétition ne se voit plus après éclaircie. Les facteurs influençant la réaction à la compétition semblent donc être les mêmes avec ou sans éclaircie.

4.2. REACTION AUX INTERVENTIONS SYLVICOLES

4.2.1. EFFETS DES DEUX MODALITES D'ECLAIRCIE

En général, le frêne a montré une sensibilité aux interventions sylvicoles par une réponse rapide et importante à l'éclaircie quelle que soit la modalité d'éclaircie. Cette réponse s'est manifestée par une augmentation de la largeur et donc de la surface annuelle des cernes. Cette sensibilité a été aussi notée sur les peuplements de frêne en Belgique (Thill, 1975).

Le gain de croissance suite aux interventions effectuées est différent d'une modalité à l'autre et pour la même modalité d'une année à l'autre et d'un site à l'autre (Figures 13, 14 et 15, Tableau 16). La différence du gain de croissance selon l'année et le site se voit plutôt sur les arbres soumis à la modalité éclaircie forte : plus la parcelle est jeune et plus les conditions stationnelles sont favorables, plus l'effet positif de l'éclaircie est net.

Si on considère que le détourage est une éclaircie de plus forte intensité autour des arbres d'avenir par rapport à la modalité « éclaircie forte », le gain de croissance en dbh et donc en surface de cerne des arbres détourés devrait être plus important que dans l'autre modalité (Bouchon *et al.*, 1989 ; Parker *et al.*, 2001 ; Cañellas *et al.*, 2004 ; Boncina *et al.*, 2007). Cependant, l'avantage du détourage par rapport à l'effet de la modalité éclaircie forte *au niveau global* n'est pas évident (Tableau 10). Cela pourrait être interprété de deux manières : tout d'abord, le choix des arbres TEF est basé sur leur seul dbh, alors que les arbres EF ont été sélectionnés également sur des critères de forme et de vigueur. Les arbres TEF pourraient être moins vigoureux que leurs homologues EF entraînant un effet de l'éclaircie EF artificiellement trop élevé. Ensuite, le faible nombre d'arbres détourés (3 par parcelle) ne permet pas de réaliser correctement les tests statistiques et donc de montrer un effet significatif de cette modalité d'éclaircie dans le cadre de notre échantillon, comme on le voit sur les tableaux 9 et 11.

L'effet de l'intervention est différent selon la modalité :

Comme il était attendu, le gain de croissance des arbres détourés au niveau parcelle est en général plus important que celui des arbres soumis à l'éclaircie forte (Figures 13, 14 et 15) car les houppiers des arbres détourés ont assez d'espace libre pour se développer et donc pour améliorer la croissance radiale (Kerr, 1995 ; Claessens, 2004). En fait, l'éclaircie forte ne garantit pas cette liberté pour tous les houppiers, qui peuvent même ne pas s'interpénétrer dans des situations de très forte concurrence (Claessens, 2004). Cependant cette dernière modalité (EF) a apporté une croissance importante des arbres avec des valeurs de croissance annuelle proches de celles trouvées par le CEMAGREF en Seine-et-Marne sur des taillis de frêne balivés et âgés de 24 à 28 ans (4.3 mm sur les arbres de M2 contre 5 mm sur les arbres du CEMAGREF) (Bessières, 1992).

4.2.2. VARIABILITE DE LA REACTION AUX ECLAIRCIES SELON L'AGE, LA DENSITE ET LA FERTILITE

Effet de l'âge de la parcelle sur la réponse aux interventions en terme de croissance : l'effet parcelle se manifeste surtout par un effet de leur âge sur la réponse des arbres aux deux modalités d'éclaircie. Les parcelles B6 et M2 se ressemblent au niveau de leur réaction aux deux modalités d'intervention sylvicole (Figures 13, 14 et 15), alors que la parcelle Pr1 a un comportement différent pour les deux modalités. Les arbres désignés dans la modalité EF de cette parcelle ont un accroissement en surface de cerne, pendant la 1ère année suivant l'éclaircie, plus important que celui des arbres désignés de la même modalité dans les autres parcelles

(Figure 14 ; Tableau 15); puis, la deuxième année, la croissance de ces arbres diminue pour rejoindre la croissance des arbres des 2 autres parcelles. Puisque cette parcelle est plus âgée que les autres, il est possible que les arbres ne réagissent que dans le cas d'un changement brutal des conditions de lumière. Cela va dans le même sens que le résultat de l'étude du CEMAGREF en Seine-et-Marne, qui trouve que seule une coupe très brutale dynamise la croissance même pour les arbres jeunes (Bessières, 1992). En fait, l'éclaircie forte entraînerait bien un tel changement et donc une réaction forte, mais cette réaction ne dure pas longtemps ; elle s'est limitée à la 1ère année suivant l'éclaircie compte-tenu de l'âge avancé de ces arbres. Une autre explication possible est que les arbres désignés de la modalité EF peuvent être des arbres dominés : l'éclaircie a permis à ces arbres de se dégager et de réagir directement suite à l'ouverture du peuplement, mais comme les arbres sont âgés, leur réaction n'a duré qu'une seule année.

L'âge avancé des arbres de cette parcelle pourrait expliquer aussi l'accroissement en surface de cerne moins important des arbres détourés dans cette parcelle par rapport à celui des arbres des autres parcelles (Figures 13, 14 et 15) (Bouchon *et al.*, 1989). La particularité de cette parcelle âgée s'exprime aussi par la tendance générale de la croissance des arbres désignés au cours du temps après intervention qui diminue en 2008 par rapport à 2007, alors qu'elle a une tendance inversée dans les autres parcelles (Figure 16). Ce phénomène ne peut pas être dû à une particularité au niveau climatique de l'année 2008 car cette parcelle (Pr1) et la parcelle M2 appartiennent à la même vallée, et le climat est donc sensiblement le même dans ces 2 parcelles.

L'effet parcelle ne se manifeste pas seulement par un effet de l'âge mais aussi par un effet des **conditions stationnelles** et parfois un effet de différence de densité locale (**micro-conditions).**

La parcelle Pr1 montre un effet faible de la modalité détourage lorsqu'on compare la croissance des arbres détourés avec celle des arbres désignés de la placette témoin (Figures 12 et 13) même si la croissance des arbres détourés reste importante. On pense que la densité relativement faible de la placette témoin de cette parcelle pourrait expliquer la croissance importante de ses arbres désignés (TD) par rapport aux arbres détourés (1575 arbres.ha^{-1} dans T contre 2100 dans D). La comparaison de la croissance des arbres non détourés (DT) de la parcelle D avec tous les arbres de la placette témoin (T) confirme cette explication, car ces derniers montrent une croissance plus importante que celle des arbres DT (Tableau 12). Pour cette raison, l'effet du détourage n'est pas significatif par rapport à T dans cette parcelle (le test de Kruskal-Wallis a donné une différence non significative entre D et T ; Tableau 13). Cela a donné aussi une fausse idée du gain en croissance des arbres EF par rapport aux arbres D : ((D-T)/T <(EF-TEF)/TEF), cf Tableau 10.

Effet fertilité :

Même si la parcelle B6 semble être proche de la parcelle M2 au niveau de la réaction aux interventions sylvicoles (Figures 13, 14 et 15), l'effet de l'éclaircie forte est douteux dans cette parcelle qui a une fertilité faible, car on n'a pas trouvé de corrélations significatives entre Sd2 et les accroissements (Tableau 17), ni de différence significative entre les accroissements des arbres désignés de la modalité EF et les arbres TEF (Tableau 13).

4.2.3. COMPARAISON PAR PARCELLE DES EFFETS DES DEUX MODALITES D'ECLAIRCIE

Dans la parcelle B6, l'effet du détourage est important même si la différence n'est pas significative entre la croissance des arbres détourés (D) et celle des arbres désignés de la placette témoin (T) selon le test de Kruskal-Wallis (Tableau 13). Cette absence de différence pourrait être due à la variabilité importante des accroissements des arbres détourés de cette parcelle, ou aux conditions plus favorables dans la placette T (Tableau 12). Comme la placette T est un peu moins dense que la placette D, cela pourrait expliquer la croissance plus importante des arbres T par rapport aux arbres DT.

Cependant, l'accroissement en surface de cerne des arbres détourés comme le montrent les boxplot (Figures 13, 14 et 15) est plus important que celle des arbres de T et de la modalité éclaircie forte (EF) et proche de celle des arbres D de la parcelle M2.

La fertilité faible semble être le facteur responsable de la non-réponse à l'éclaircie forte. La croissance des arbres désignés est plutôt liée au dbh initial de ces arbres (Tableaux 22), même pour les arbres détourés (Tableau 21).

La réaction de la croissance aux deux modalités d'éclaircie est relativement comparable dans la parcelle B6 par rapport à celle de la parcelle M2, ce qui pourrait indiquer à la fois un niveau de compétition initiale limitant et une fertilité pas trop mauvaise. Mais ces résultats s'inversent à l'échelle de l'arbre puisque on n'observe pas d'effet de voisinage ni avant ni après éclaircie.

Pour la parcelle M2 (qui est la parcelle la plus jeune et la plus fertile), on trouve que l'effet des deux modalités d'éclaircie est net : La croissance des arbres détourés est plus importante que celles de la placette T et la croissance des arbres de la modalité EF est plus importante de celle des arbres TEF (Figure 13).

Pour la parcelle Pr1, sa faible densité et son âge avancé pourraient expliquer la non évidence de l'effet du détourage. L'âge élevé peut aussi expliquer l'effet important et limité à la 1ère année de la modalité EF et la tendance décroissante de la croissance en fonction du temps comparativement aux autres parcelles.

En général, on trouve donc que plus l'intensité d'éclaircie est importante, plus l'accroissement en surface de cerne est important. Quelle que soit la modalité d'éclaircie, on trouve aussi que plus les arbres sont jeunes et plus les conditions stationnelles sont favorables, plus leurs réactions à l'éclaircie par la croissance radiale est importante, nette et durable pendant la période étudiée. En France, il a été trouvé que les frênes des taillis ne réagissent plus aux interventions au delà de 35 ans (Bessières, 1992). La réaction importante des arbres jeunes à l'éclaircie a été aussi mise en évidence sur le hêtre : plus les arbres sont jeunes, plus leurs accroissements en surface terrière est importante (Bouchon *et al.*, 1989). L'amélioration de la croissance en diamètre après éclaircie, surtout dans les peuplements jeunes de frêne, a été également montrée en Lituanie

(Juodvalkis *et al.*, 2005) où il a été observé aussi que la réaction à l'éclaircie est plus importante quand les sites sont favorables.

4.2.4. CHANGEMENT DU NIVEAU DE COMPETITION SOUS L'EFFET DE L'ECLAIRCIE FORTE

L'éclaircie forte améliore la croissance par un changement total de la dynamique de croissance par rapport au passé (Tableau 24), mais la variabilité interindividuelle de la réaction des arbres à l'éclaircie semble modulée plutôt par leurs dimensions initiales (surtout le dbh initial) que par le voisinage (comme montré dans §1.2 de cette discussion).

Pour le changement de la dynamique de croissance, la parcelle B6 semble être sous l'influence de cette dynamique pendant la 1ère année suivant l'éclaircie car le classement de ses arbres selon leur accroissement annuel pendant la 1ère année suivant l'éclaircie ne diffère pas significativement de l'accroissement avant éclaircie. L'effet de l'éclaircie n'a donc commencé dans cette parcelle qu'à partir de la 2ème année (Tableau 24). Cela pourrait être expliqué par la fertilité faible de cette parcelle. Comme la production élevée en volume suite à l'éclaircie des peuplements de pin sylvestre (*Pinus sylvestris)* et d'épicéa par rapport aux autres espèces en Lituanie a été expliquée par les conditions stationnelles favorables à ces espèces dans les sites étudiés (Juodvalkis *et al.*, 2005), l'effet de la fertilité faible dans notre site pourrait retarder l'effet de l'éclaircie car on sait que dans les sites favorables du frêne, le frêne arrive à 40-60 cm de dbh vers l'âge de 50 ans, alors qu'il n'atteint pas ces dimensions avant 80 ans dans les sites pauvres (Kerr, 1995). Cet effet tardif peut aussi être expliqué par une compétition au niveau des racines pendant la 1ère année suivant l'éclaircie car les racines des arbres coupés restent en place et, comme les ressources dans le sol de cette parcelle sont limitées, les racines des arbres coupés seraient encore en concurrence avec les racines des arbres restants (désignés). Une année plus tard, les racines des arbres coupés commencent à pourrir et les racines des arbres désignés commencent à disposer de davantage d'espace de sol. C'est à ce moment-là que l'effet de l'éclaircie apparaîtrait sur la croissance de la tige. Cela correspond aux résultats observés sur la compétition entre les semis de frêne et les herbacées, qui montrent que l'effet de la compétition sur la croissance du frêne ne se manifeste que dans le cas de l'absence de compétition au niveau des racines (Bloor *et al.*, 2008). Cependant, on ne peut pas dire que l'accroissement de la 2ème année soit dû à l'éclaircie, car on n'a pas trouvé de corrélations significatives entre Sd2 et les accroissements de cette année-là, mais on peut dire que l'effet de l'éclaircie commence à apparaître.

4.2.5. ÉVOLUTION DE LA CROISSANCE APRES ECLAIRCIE

La croissance importante en surface des cernes se voit dès la 1ère année suivant l'intervention et il augmente d'une année à l'autre pendant la période étudiée après éclaircie (2 ou 3 ans) pour les peuplements ayant des âges dans la gamme 27-38 ans quelle que soit la modalité d'éclaircie. Pour un peuplement d'un âge moyen de 66 ans, la croissance diminue après la 1ère année suivant

l'intervention. La diminution de la croissance en largeur de cerne et donc en surface de cerne a été constatée aussi sur des frênes ayant des âges proches (70 à 80 ans) (Thill, 1986 ; Joyce, 1998). En ce qui concerne la réaction dès la 1ère année après éclaircie, il est en accord avec ce qui a été trouvé en Lituanie où la croissance en diamètre du frêne a augmenté dès la 1ère année suivant l'éclaircie, mais elle a atteint son maximum pendant la 2ème année pour diminuer ensuite et arriver à une croissance équivalente à la croissance des arbres témoins pendant 7 à 8 ans (Juodvalkis *et al.*, 2005). Pour la croissance maximum après deux ans, ce n'est pas le cas ni pour les arbres de la parcelle M2 où la croissance des arbres continue à augmenter pendant la 3ème année, ni pour les arbres de la parcelle Pr1 où la croissance diminue la 2ème année, alors que sur les arbres de la parcelle B6, on ne peut pas en juger car on n'a que deux ans de croissance. Cependant, la différence interannuelle de la croissance suite à l'éclaircie est significative pour les arbres de la modalité EF, alors qu'elle ne l'est pas pour les arbres détourés. Cela pourrait indiquer un changement progressif de la croissance des arbres suite au détourage, alors qu'il est plus rapide pour les arbres de la modalité EF.

4.3. VERS UN MODELE DE CROISSANCE DE REPONSE A LA COMPETITION

Pour estimer l'effet des différentes modalités d'éclaircie, il est préférable d'utiliser un modèle de croissance spécifique (Nolet *et al.*, 2001 ; Cescatti & Piutti, 1997). Ce modèle pourrait aider à déterminer les conditions nécessaires pour atteindre l'accroissement optimal. Un modèle général pourrait être utilisé pour estimer l'accroissement avec ou sans interventions sylvicoles. Il peut être construit au niveau individuel dans notre zone d'étude (dans la gamme de fertilité des sites étudiés) (Dhôte, 1995). Ce modèle devrait permettre d'estimer l'accroissement (pour une période d'au moins 3 ans) en surface de cerne en utilisant le dbh initial de l'arbre, l'indice de voisinage, l'âge de l'arbre (Wimberly & Bruce Bare, 1996) et un indice de fertilité comme variables explicatives :

$\Delta SC = a + b.dbh + c.Sd2 + d.âge + e.Ii$

Où a, b, c, d, e sont les paramètres du modèle.

L'utilisation de l'indice de voisinage semble indispensable car les accroissements des arbres n'ont pas montré de corrélations significatives avec la densité moyenne de la parcelle (Tableau 2). Cela aura l'avantage d'être applicable à des sylvicultures induisant des hétérogénéités spatiales fortes, comme le détourage des arbres (Dhôte, 1995; Pouderoux *et al.*, 2001) et notre modalité d'éclaircie forte. Comme la fertilité semble être un facteur limitant de la croissance dans nos sites, il faut donc prendre ce facteur en compte dans le modèle (Richardson *et al.*, 1999).

Ce modèle devrait permettre d'estimer l'accroissement suite à l'éclaircie dans nos sites d'études pour aider les gestionnaires de ces accrus à faire le bon choix. Mais ce modèle ne pourra pas être

appliqué dans d'autres zones d'accrus de frêne au cas où d'autres facteurs pourraient influencer leur réaction à la compétition.

4.4. CONCLUSION

L'effet de la compétition intra-spécifique sur la croissance en surface de cerne du frêne est important mais ce n'est pas le seul facteur qui influence cette croissance, même dans le cas de changement important de la compétition par l'éclaircie. La croissance est donc modulée d'abord par les dimensions initiales des arbres, puis vient l'effet de la compétition qui diffère en fonction de l'âge du peuplement et les conditions stationnelles.

Plus les peuplements sont âgés, moins l'effet de la compétition est important et donc moins la réaction à l'éclaircie est importante. On ne peut pas déterminer l'âge exact auquel nos accrus de frêne arrêtent de réagir à l'éclaircie, mais on peut indiquer que la réaction n'est pas importante à l'âge de 68 ans. De toute façon, à un âge proche de cet âge-là (70 à 80 ans), il a été trouvé que la qualité technologique du bois de frêne commence à régresser, car la largeur des cernes diminue, et le « cœur noir » pourrait se généraliser sur beaucoup d'arbres (Thill, 1986 ; Joyce, 1998). On peut donc dire que l'éclaircie à cet âge-là n'est pas conseillée.

Les conditions stationnelles limitantes de la croissance comme la fertilité pourraient masquer, voire annuler l'effet de la compétition comme dans la parcelle B6. Par contre, plus ces conditions sont favorables, plus la réaction à l'éclaircie est importante (parcelle M2).

Cet effet de la compétition aurait lieu sur une surface pouvant aller jusqu'à 300 m^2 autour des arbres.

Nos frênes ne peuvent pas être considérés par les marchands de bois et les utilisateurs industriels comme de « bons frênes » au sens de Thill (1975), car leur accroissement annuel sur le rayon est inférieur à 3 mm. Mais après éclaircie et pendant la période étudiée (2 ou 3 ans), les frênes de B6 et M2 sont à la limite de ce qui est acceptable pour la majorité des usages industriels, c'est-à-dire des accroissements de 2 mm par an sur le rayon, limite au dessous de laquelle les frênes ne conviennent plus (Misson, 1967). La valorisation économique de ces accrus après éclaircie par la production de bois d'œuvre semble donc envisageable.

4.5. LIMITES DE L'ETUDE

- L'imprécision de la méthode de mesure de la hauteur et de la surface de projection des houppiers n'a pas permis de suivre la réaction du frêne aux interventions pour ces grandeurs importantes.

- Pour éviter de dégrader la qualité du bois des arbres désignés, on n'a pas prélevé de carottes à 1,30 m de hauteur sur ces arbres. L'absence de carottes sur ces arbres à cette

hauteur-là n'a donc pas permis de comparer la croissance avant et après éclaircie. En effet, on a considéré que la transposition à 1,30 m de la croissance basale, dont on dispose, était trop imprécise pour être utilisée dans cet objectif.

- La durée de la thèse ne permet pas de suivre la réaction à l'éclaircie sur une longue durée.

- Pour tester l'effet des modalités d'éclaircie sur une gamme plus large de conditions stationnelles et d'âge, on avait envisagé de faire également les expérimentations sylvicoles sur deux autres parcelles (A3 et A4), mais la propriétaire de ces parcelles ne nous n'a pas autorisé à faire ce travail. Pour cette raison, nous avons dû nous limiter aux trois parcelles étudiées.

4.6. RECOMMANDATIONS ET PROPOSITIONS

- On ne connaît pas la suite de la croissance lorsque l'effet de l'éclaircie dure longtemps. Sur un peuplement de pin maritime de 20-35 ans, l'effet de l'éclaircie n'a duré que 4-5 ans (Timbal, 2002) et sur le frêne en Lituanie, il a diminué après la 2ème année (Juodvalkis *et al.*, 2005). Il serait donc souhaitable de suivre la croissance de nos frênes pendant les années prochaines pour connaître la durabilité de l'effet d'éclaircie et donc la fréquence d'éclaircie à appliquer dans ces peuplements. Cela permettra aussi de déterminer précisément l'âge auquel le frêne ne réagit plus à l'éclaircie dans ces sites, ce qui correspond à l'âge d'exploitation.

- Le houppier du frêne est très sensible à la concurrence pour la lumière ; il a besoin d'un grand espace libre pour bien se développer (Claessens, 2004). C'est le développement du houppier qui permet une augmentation de la croissance en diamètre (Claessens, 2004). Comme l'éclaircie a un effet direct sur la surface du houppier du frêne (elle a amélioré cette croissance de plus de 100 % en Lituanie ; Juodvalkis *et al.*, 2005), il sera intéressant de suivre la croissance des houppiers suite à l'éclaircie. Pour cela, il faudrait chercher une méthode simple et précise permettant de réaliser correctement cette mesure.

- Suivre la réaction de la croissance en hauteur est également important pour bien comprendre la réaction du frêne à l'éclaircie et pour savoir comment atteindre les hauteurs souhaitables pour la production de bois d'oeuvre.

- En relation avec les objectifs économiques, l'effet de la compétition sur les propriétés du bois de frêne n'est pas très étudié. Une légère augmentation de la densité du bois de frêne (donc des propriétés mécaniques) avec la largeur du cerne a été montrée (Nepveu, 1992). L'augmentation de l'intensité de l'éclaircie n'a pas influencé la longueur des fibres du bois ni l'épaisseur des parois ligneuses de *Fraxinus mandshurica* en Chine, alors qu'elle avait un effet significatif sur la largeur des cernes, le pourcentage de bois d'été, la densité et la dureté du cerne de cette espèce (MingHui, 2004). Ces résultats mériteraient d'être vérifiés sur le bois du frêne commun par une étude appropriée qui permettrait d'élargir notre compréhension des effets de la compétition.

Bibliographie

Alteyrac, J., 2005. Influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre sur les propriétés physico-mécaniques du bois d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.). Thèse de Doctorat en Sciences du bois. Université Laval. 136 p.

Aussenac, G., 2000. Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. Annales des Sciences Forestières 57, 287-301.

Benbrahim, M., Gavaland, A., Gauvin, J., 2000. Growth and yield of mixed polyclonal stands of populus in short-rotation coppice. Scandinavian Journal of Forest Research 15, 605-610.

Bessières, F., 1992. La conduite des peuplements de Frêne (*Fraxinus excelsior* L.) et de Merisier (*Prunus avium* L.). Revue Forestière Française 54, 115-120.

Bloor, J.M.G., Leadley, P.W., Barthes, L., 2008. Responses of *Fraxinus excelsior* seedlings to grass-induced avove- and below-ground competition. Plant ecology 194, 293-304.

Boncina, A., Kadunc, A., Robic, D., 2007. Effects of selective thinning on growth and development of beech (*Fagus sylvatica* L.) forest stands in south-eastern Slovenia. Annals of Forest Science 64, 47-57.

Bouchon, J., Dhôte, J.F., Lanier, L., 1989. Réaction individuelle de hêtres (*Fagus silvatica* L.) d'âges divers à diverses intensités d'éclaircie. Annales des sciences forestières 46, 251-259.

Bulfin , M., Radford , F., 1998. Effect of early formative shaping on newly planted broadleaves. Irish Forestry 55, 35-61.

Cañellas, I., Del Rio, M., Roig, S., Montero, G., 2004. Growth response to thinning in *Quercus pyrenaica* Willd. coppice stands in Spanish central mountain. Annals of Forest Science 61, 243-250.

Casper, B.B., Jackson, R.B., 1997. Plant competition underground. Annual Revue of Ecology and Systematics 28, 545-570.

Cescatti, A., Piutti, E., 1998. Silvicultural alternatives, competition regime and sensitivity to climate in a European beech forest. Forest Ecology and Management 102, 213-223.

Claessens, H., 1997. Itinéraires sylvicoles pour la production de frêne de qualité. Cahiers Forestiers de Gembloux 20, 21p.

Claessens, H., 2004. Réflexion sur le détourage des feuillus à croissance rapide. Forêt Wallonne 71, 3-11.

Curt, T., Prévosto, B., Bergonzini, J. C.2004. Boisements naturels des terres agricoles en déprise. Collection ECOFOR "écosystèmes forestiers" n°2. 119 p.

Cutter, B.E., Lowell, K.E., Dwyer, J.P., 1991. Thinning effects on diameter growth in black and scarlet oak as shown by tree ring analyses. Forest Ecology and Management 43, 1-13.

Dhôte, J.F., 1995. Définition de scénarios d'éclaircie pour le hêtre et le chêne. Revue Forestiere Francaise 47, 106-110.

Faure, J.J., Jacamon,M., Lanier, L., Venet,J., 1975. Le frêne (*Fraxinus excelsior* L.) en France: Production et culture. Revues Forestière Française 2, 101-113.

Hamilton, G.J., 1981. The effects of high intensity thinning on yield. Forestry 54, 1-15.

Hemery, G.E., Savill, P.S., Pryor, S.N., 2005. Applications of the crown diameter - stem diametre relationship for different species of broadleaved trees. Forest Ecology and Management 215, 285-294.

Joyce, P.M., 1998. Silvicultural guidelines for ash, sycamore, wild cherry, beech and oak in Ireland. In:Growing Broadleaves. 29-49.

Juodvalkis, A., Kairiukstis,L., Vasiliauskas,R., 2005. Effects of thinning on growth of six tree species in north-temperate forests of Lithuania. European Journal Forest Research 124, 187-192.

Kerr, G., 1995. Silviculture of ash in southern England. Forestry 68, 63-70.

Kerr,G., 2003. Effects of spacing on the early growth of planted *Fraxinus excelsior* L. Revue Canadienne de Recherche Forestière 33, 1196-1207.

Kerr, G., 2004. The growth and form of sh (*Fraxinus excelsior*) in mixture with cherry (Prunus avium), oak (*Quercus petraea* and *Quercus robur*), and beech (*Fagus sylvatica*). Canadian Journal of Forest Research 34, 2340-2350.

MingHui, G., 2004. Effect of thinning intensity on wood quality of *Fraxinus mandshurica*. Journal of Northeast Forestry University.

Misson. 1967. Considérations sur le frêne commun (Fraxinus excelsior Lin.). Bulletin de la Société Royale Forestière de Belgique 74, 117-124.

Nepveu, G., 1992. L'Utilisation des bois de Frêne et de Merisier : aptitudes technologiques, facteurs de variabilité. Revue Forestière Française 44, 142-149.

Nolet, PH., Doyon, F., Beaudet, M., 2001. Effets de l'éclaircie commerciale sur les peuplements de chêne rouge et de pin blanc. Report. 23 p.

Pardé, J. and Bouchon, J.1988. Dendrométrie. Nancy. 328 p.

Parker, W.C., Dey,D.C., Newmaster, S.G., Elliott, K.A., Boysen,E., 2001. Managing succession in conifer plantations: converting young red pine (*Pinus resinosa* AIT.) plantations to native forest types by thinning and underplanting. Forestry Chronicle 77, 721-734.

Pichard, G., 2002. Les éclaircies de plantations de feuillus. Forêts de France 450, 40-41.

Pouderoux, S., Deleuze, C., Dhôte, J.F., 2001. Analyse du rendement des houppiers dans un essai d'éclaircie de hêtre grâce à un modèle à base écophysiologique. Annales des Sciences Forestières 58, 261-275.

Poulain, G., 2000. Planter du frêne sur d'anciennes terres agricoles. Forêt Entreprise 133, 34-37.

R Development Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. 2008. Ref Type: Computer Program

Richardson, B., Kimberley, M.O., Ray,J.W., Coker, G.W., 1999. Indices of interspecific plant competition for *Pinus radiata* in the central north island of New Zealand. Canadian Journal of Forest Research 29, 898-905.

Schreuder, H.T., Williams, M.S., 1995. Assessing measures of tree competition using fixed-area, variable-radius, and horizontal-line plot sampling. Canadian Journal of Forest Research 25, 1578-1582.

Thill, A., 1975. Le frêne et sa culture. Bulletin de la Société Royale Forestière de Belgique 412-415.

Thill, A., 1986. La sylviculture du frêne en Belgique. Bulletin de la Société Royale Forestière de Belgique.

Timbal, J., 2002. Analyse rétrospective de la croissance radiale et mise en relation avec le bilan hydrique dans un dispositif d'intensité d'éclaircie de pin maritime dans les Landes de Gascogne. Annals of Forest Science 59, 205-217.

Wattel, B., 1998. Les feuillus précieux en forêt paysanne: évaluation de la ressource et de la croissance. Mémoire de fin d'étude. Ecole Nationale d'Ingénieurs des Traveaux Agricoles (ENITA) de Bordeaux. 70 p.

Willm, J., Burnel, L., 2006. Localisation spatiale fine de ligneux en milieu forestier. Comment procéder de manière précise et dans les délais acceptables ? Le cahier des techniques de l'Inra N° spécial, 97-102.

Wimberly, M.C., Bruce Bare, B., 1996. Distance-dependent and distance-independent models of Douglas-fir and western hemlock basal area growth following silvicultural treatment. Forest Ecology and Management 89, 1-11.

Woodall, C.W., Fiedler, C.E., Milner, K.S., 2003. Intertree competition in uneven-aged ponderosa pine stands. Canadian Journal of Forest Research 33, 1719-1726.

Zeide, B., 2001. Thinning and growth: A full turnaround. Journal of Forestry 99, 20-25.

DISCUSSION ET CONCLUSION GENERALES

Ce travail de thèse a été réalisé dans l'objectif d'acquérir des connaissances sur la répartition et la croissance de peuplements peu étudiés, ceux formés par les accrus de frêne dans le département des Hautes-Pyrénées où ce phénomène est particulièrement important. L'objectif final de ce travail était d'estimer la potentialité de ces accrus dans une perspective de valorisation sylvicole (dans la mesure où leur croissance le permet) de manière à mobiliser ces peuplements pour lesquels les propriétaires, pris au dépourvu, s'interrogent. Cette thèse contribue ainsi à définir une gestion durable de ces peuplements.

On trouve dans la littérature quelques études qui ont commencé depuis les années 50 et qui s'intéressent à ce phénomène en Angleterre (Kassas, 1951), mais ces questions n'ont été posées sérieusement en France qu'à la fin des années 90.

Suite à nos visites de terrain pendant le travail de cette thèse, on a vu que le frêne commun colonise de nombreuses parcelles et constitue de véritables peuplements monospécifiques et denses sur notre zone d'étude. Ces peuplements peuvent avoir une valeur économique importante, ce qui pose la question de leur durabilité et donc la nécessité d'évaluer leurs potentialités de croissance. Pour cela, on a étudié la croissance de ces accrus en fonction des conditions stationnelles (climat et nutrition minérale) et de la compétition. Ce dernier facteur a été modifié expérimentalement par la réalisation de modalités d'interventions sylvicoles différentes.

Dans cette discussion générale, j'aborde les réponses apportées par la thèse aux questions posées au départ. Je discute ensuite principalement les interactions entre les différentes catégories de résultats.

Je présente les limites et les perspectives au niveau méthodologique.

Je propose enfin quelques pistes pour gérer les accrus de frêne de notre zone d'étude.

1. REPONSES APPORTEES AUX QUESTIONS DE DEPART

Il est nécessaire à ce niveau de vérifier dans quelle mesure la présente étude a pu répondre aux principales questions posées au départ et qui étaient :

QI- Quelle est l'importance actuelle des accrus de frêne dans les Hautes-Pyrénées , et peut-on en expliquer et en prédire la répartition spatiale ?

QI.1 - Peut-on estimer l'ampleur du phénomène des accrus de frêne par les outils de télédétection?

La réponse est qu'avec les outils qu'on a utilisés (photos aériennes et images satellites), la détection des accrus de frêne n'est actuellement pas possible techniquement.

QI.2- L'apparition des accrus de frêne dans les Pyrénées centrales est-elle descriptible et prédictible ?

La réponse est « oui », mais avec une performance limitée, en particulier pour la prédiction de la présence de frêne. Des précisions sur le contexte historique et paysager local pourraient améliorer la prédiction. Ces connaissances permettraient en effet de prédire l'évolution des pratiques agricoles à l'échelle du paysage et donc d'estimer la stabilité des conditions actuelles à partir desquelles on prédira la possibilité de trouver des accrus de frêne dans la zone concernée.

La cartographie de la prédiction des accrus de frêne à partir des données topographiques est donc possible en considérant que l'utilisation de sol est stable.

L'importance des facteurs topographique dans la répartition du frêne n'est pas étonnante car on sait par exemple que le frêne se trouve principalement dans une certaine gamme d'altitude (de 600 à 1650m) en France (Marigo *et al.*, 2000). Le rôle de l'utilisation du sol et surtout celui de l'abandon des pratiques agricole de pâturage, déjà établi par Julien (2006), est confirmé également sur notre terrain d'étude.

QII- Comment se sont développés les accrus de frêne et quels sont les principaux facteurs limitants de leur croissance ?

La particularité de ce travail est d'avoir pris en compte à la fois une variabilité au niveau des conditions stationnelles (surtout édaphiques) et au niveau de compétition (densité et âge des peuplements), ce qui rend la détermination de l'effet individuel de chaque facteur plus difficile à extraire. Nous détaillons ci-dessous les réponses apportées.

1. **Estimation des potentialités en termes de fertilité**

La nutrition minérale n'est pas un facteur déterminant de la croissance des accrus de frêne dans notre zone d'étude. Le modèle qu'on a ajusté pour l'évolution de la hauteur dominante en fonction de l'âge montre une différence de fertilité des parcelles étudiées, mais cette différence n'a pas été expliquée par la nutrition minérale. D'autres facteurs pourraient expliquer cette différence de fertilité comme l'alimentation en eau, l'acidité du sol, le taux de saturation. Ces deux derniers facteurs peuvent être limitants de la croissance car comme on l'a vu dans le chapitre croissance-nutrition minérale (§ 3.2.5), ces facteurs présentent des coefficients des corrélations plus importants avec l'indice de fertilité (SI) que les autres facteurs (Tableau 5); d'autre part, les sites ayant les valeurs de SI les plus faibles (B6 et A4) ont les pH et les taux de base de saturation les plus bas. Même si le sol n'a expliqué ni la croissance, ni la nutrition minérale foliaire, les sols des parcelles B6 et A4 ne sont pas riches en éléments minéraux et leurs caractéristiques physico-chimiques sont les plus mauvaises par rapport aux autres parcelles. La croissance relativement faible dans ces deux parcelles est visible au niveau des indices SI, mais aussi au niveau des biomasses foliaires et ligneuses (chapitre croissance- nutrition minérale, Tableau 1). L'absence de relation entre le sol et la croissance peut être due, comme on l'a déjà évoqué, au faible effectif des parcelles et/ou à la faible variabilité des paramètres édaphiques. L'augmentation du nombre des parcelles et des échantillons de feuilles à analyser permettrait de vérifier la relation entre les concentrations en éléments minéraux dans les feuilles sénescentes et ceux des feuilles matures et donc la possibilité d'utiliser les feuilles sénescentes comme représentatives de la nutrition minérale du frêne au lieu d'utiliser les feuilles matures dont la récolte est difficile. Cela permettrait ensuite de vérifier nos résultats qui concernent la relation croissance- nutrition minérale et croissance- caractéristiques du sol.

Au niveau plus global, l'augmentation du nombre de parcelles améliorerait la représentativité des résultats et donc la fiabilité de leur transposition à l'ensemble des accrus de frêne des Pyrénées centrales.

2. **Estimation des potentialités vis-à-vis du climat**

Même avec les quelques différences entre les climats des deux vallées, les réactions de leurs arbres ne sont pas significativement différentes.

Notre hypothèse sur un effet possible de l'âge sur la sensibilité du frêne au climat ne semble pas validée selon nos résultats, qui montrent une sensibilité comparable entres les arbres jeunes et les arbres âgés.

Les résultats obtenus dans le chapitre « croissance- climat » suggèrent que la température est le facteur climatique déterminant de la croissance radiale des accrus de frêne dans notre zone d'étude. Ce résultat confirme notre hypothèse de départ qui considère que dans cette zone montagnarde où les précipitations sont disponibles toute l'année, ce facteur n'aurait pas d'effet important sur la croissance. Les trois parcelles étudiées pour la relation croissance- climat ne subissent pas de déficit hydrique. Cela n'est pas seulement une conséquence des précipitations disponibles, mais aussi des conditions stationnelles favorables au niveau de l'alimentation en eau comme l'existence d'une source ou une profondeur importante du sol.... La relation entre la croissance et le déficit hydrique n'a donc pas été étudiée à cause de l'absence de déficit hydrique dans les parcelles étudiées.

La variabilité inter-individuelle de la croissance en surface de cerne en fonction de l'âge de « démarrage » des arbres confirme les résultats trouvés sur les arbres d'analyse de tige pour la croissance en hauteur du chapitre « croissance- nutrition minérale », qui suggèrent eux aussi une variabilité inter-individuelle de cette croissance.

On a attribué l'âge précoce de la croissance maximale en surface de cerne des arbres de la parcelle M2 (17 ans) à la densité élevée de cette parcelle et donc à un effet de la compétition. Cela confirme l'importance de ce dernier facteur dans la croissance des arbres de cette parcelle et donc sa réponse importante à l'éclaircie (résultats trouvés dans le chapitre « croissance-compétition »).

On a vu également que les facteurs limitants de la croissance du frêne diffèrent selon le climat des zones étudiées. La réponse du frêne dans les Pyrénées n'est donc pas la même que celle décrite en Angleterre (Wardle, 1961) ou en Iran (Jalilvand, 2008). On pense qu'une partie de cette différence de réponse du frêne au climat d'une zone à l'autre peut aussi être due à une différence des conditions stationnelles des zones étudiées, comme le sol ou la topographie.

3. Estimation des potentialités en termes de compétition

Notre travail sur la relation croissance- compétition a montré que la compétition « intra » a un effet important sur la croissance radiale surtout dans le cas des peuplements jeunes comme celui de la parcelle M2. L'âge et les conditions stationnelles comme la fertilité et la micro-topographie influencent la réponse des arbres à la compétition. L'amélioration des conditions de compétition par l'éclaircie se reflète par une croissance importante des peuplements jeunes aussi. De plus, le dbh initial des arbres module leur réaction aux interventions sylvicole.

Nous pensons que l'association d'un âge jeune et d'une bonne fertilité (parcelle M2) favorise l'importance de la réaction à l'éclaircie (Casper & Jackson, 1997).

On a vu que la parcelle B6 présente une situation compliquée. Les arbres de cette parcelle montrent un changement significatif de la dynamique de la croissance passée pendant la 2ème année après intervention (chapitre croissance- compétition, Tableau 24). En outre, les arbres désignés dans cette parcelle montrent des accroissements et donc des réactions proches de ceux de la parcelle M2 qui présentent, eux, une sensibilité importante à la compétition et donc à l'éclaircie. L'éclaircie a donc probablement influencé la croissance des arbres de cette parcelle. En revanche, la croissance des arbres de cette parcelle ne montre aucune relation avec la compétition ni avant, ni après l'éclaircie. On pense que la distribution spatiale de la fertilité dans cette parcelle n'est pas homogène. Des conditions micro-topographiques pourraient y entraîner une répartition hétérogène de l'eau et des éléments minéraux disponibles pour les arbres. Cela pourrait masquer l'effet de la compétition sur la croissance des arbres avant l'éclaircie et améliorer seulement la croissance de certains arbres peu nombreux (ceux qui ont des micro-conditions favorables) après l'éclaircie. Cette hypothèse est confirmée par le faible nombre d' arbres ayant une amélioration de leur classement de croissance pendant la 2ème années suivant l'éclaircie par rapport à leur classement en terme de croissance passée (chapitre croissance-compétition, Tableau 25). Ce nombre faible n'a pas permis d'avoir une corrélation significative

entre la croissance de l'ensemble des arbres et l'indice de compétition Sd2. L'effet tardif de l'éclaircie sur la croissance de ces quelques arbres peut être expliqué par la compétition racinaire (voir discussion du chapitre croissance- compétition). Il ne faut pas oublier le rôle des dimensions initiales des arbres aussi dans la croissance comme facteur explicatif important.

L'âge avancé des arbres de la parcelle Pr1 semble être, comme on l'a déjà évoqué, un facteur limitant de la réaction des arbres à la compétition. Une caractéristique importante de ce peuplement âgé est que la compétition au niveau global (estimée par la densité du peuplement) semble être un facteur plus déterminant de la croissance des arbres que la compétition locale interindividuelle. Cette hypothèse tente à se confirmer par plusieurs phénomènes. Tout d'abord, par la proximité entre la croissance des arbres de la placette témoin (où la densité est relativement faible), et la croissance des arbres détourés (chapitre croissance- compétition, Tableau 13). Ensuite, par la proximité entre la croissance des arbres désignés de la modalité éclaircie forte et la croissance des arbres détourés (chapitre croissance- compétition, Figures 13 et 14). Enfin, par une croissance des arbres désignés EF plus importante que celle des arbres équivalents de la placette témoin (TEF) (chapitre croissance- compétition, Figures 13, Tableau 13), et plus importante que celle des arbres EF des autres parcelles pendant la 1ère année suivant l'éclaircie (chapitre croissance- compétition, Figure 14 et Tableau 15).

On ne peut pas donc estimer correctement la potentialité et donc la durabilité de ces peuplements en fonction d'un seul facteur limitant, il faut pour cela intégrer les différents facteurs précédents.

4. Interaction entre les différents facteurs influençant la croissance

Interaction climat-compétition :

Sur un site donné, climat et compétition sont les facteurs qui influencent le plus la variation interannuelle de la croissance des arbres. Leurs effets individuels ou combinés sur l'accroissement annuel radial peuvent dépasser en poids l'influence de l'âge selon Le Goff et Ottorini (1993).

Climat et compétition sont en fait les facteurs fondamentaux de la croissance des arbres car ils influencent la quantité et la disponibilité des ressources, comme l'eau et les éléments minéraux. L'effet du climat sur la croissance d'un arbre peut être modifié par son statut compétitif. Les arbres libres de compétition réagissent différemment et ils montrent une sensibilité au climat plus importante que les arbres dominés. Pour cette raison, l'étude de l'effet du climat sur la croissance se fait à l'aide d'arbres dominants ou d'arbres isolés (Piuttie & Cescatti, 1997) pour éviter que la croissance ne soit trop soumise à la compétition. Mais comme les arbres des forêts sont généralement dans des peuplements denses, il faut prendre en compte la compétition intraspécifique quand on étudie leur réaction au climat car cette compétition peut affecter la disponibilité des ressources et donc la sensibilité aux variations climatiques (Piuttie & Cescatti, 1997).

Très nombreuses sont en fait les études portant sur les relations entre la croissance radiale et les fluctuations climatiques inter annuelles sur des espèces feuillues et résineuses dans des pays et des climats très variés, mais peu d'études existent sur l'interaction entre le climat et la compétition ou l'éclaircie, et l'effet de cette interaction sur la croissance en diamètre.

Le facteur climatique limitant de la croissance est en fait différent selon le degré de compétition. Quand la compétition est importante, le hêtre par exemple est plus sensible au bilan hydrique, alors que quand cette compétition est faible, le hêtre est sensible à la température (Piuttie & Cescatti, 1997). Dans la parcelle M2 où la densité et donc la compétition est importante, les facteurs climatiques limitants de la croissance pourraient ainsi être différents de ceux trouvés dans les autres parcelles, même avec une série plus longue de croissance.

En plus, l'effet du même facteur climatique sur la croissance varie selon l'intensité de la compétition. La relation entre la croissance du hêtre et la température change de positive à négative avec l'augmentation de la compétition. Le déficit hydrique a un effet négatif plus important dans le cas de forte compétition que dans le cas de compétition faible (Piuttie & Cescatti, 1997). La relation croissance- climat peut être donc différente, après éclaircie, de celle trouvée avant éclaircie. Cela peut être une piste de recherche à tester ultérieurement.

Comme la compétition influence la sensibilité des arbres au climat et que l'éclaircie modifie le niveau de compétition, l'éclaircie peut ainsi influencer en définitive la sensibilité des arbres au climat. L'éclaircie forte permet par exemple une meilleure croissance radiale du pin maritime et une meilleure résistance des arbres au stress hydrique. Par contre, pendant les années de forte sécheresse, ces éclaircies fortes n'ont pas empêché la réduction importante de la croissance radiale (Timbal, 2002).

A partir de ces résultats, si on considère que les arbres de la parcelle M2 subissent un stress hydrique pendant l'été, ce stress n'a pas empêché ces arbres d'avoir une bonne croissance après éclaircie. Dans ce cas, on pourrait considérer que l'éclaircie a un effet positif sur la résistance des arbres au stress hydrique.

Le climat et la compétition ne sont pas les seuls facteurs en cause dans la croissance radiale (la largeur de cernes). Il y a aussi d'autres facteurs du milieu, comme la nutrition ainsi que le facteur génétique, qui interviennent dans cette croissance (Martin, 1974).

Interaction fertilité- compétition :

On sait que la hauteur à un âge donné est utilisée comme indice de fertilité car elle est très peu modifiée par le type de gestion sylvicole. La fertilité influence donc surtout la croissance en hauteur, mais elle peut aussi influencer la croissance en surface terrière (Stegemoeller & Chappell, 1991). Comme la compétition est un facteur important de la croissance radiale, une

interaction entre ce facteur et la fertilité est donc envisageable surtout que ces deux facteurs offrent des bénéfices similaires pour le peuplement au niveau de la nutrition minérale (augmentation de la nutrition). Ainsi, une interaction positive et significative entre la fertilisation en azote et l'éclaircie a été notée sur des peuplements de sapin de douglas (*Pseudotsuga menziesii*) près de Washington et en Oregon (USA). Les effets combinés de ces deux facteurs provoquent une plus forte augmentation en volume et en surface terrière que celle provoquée par un seul de ces facteurs (Stegemoeller & Chappell, 1991). Dans le même contexte, la fertilité peut être un facteur limitant du développement des peuplements. Ce facteur a contribué, dans les sites de moindre qualité, à augmenter les différences dues à la gestion sylvicole entre des peuplements de chêne vert du nord-est de l'Espagne. Dans les sites les moins fertiles, le nombre d'arbres ayant des petits diamètres est plus important que dans les autres sites (Gracia & Retana, 1996).

L'éclaircie, en réduisant la densité du couvert, permet une meilleur pénétration de la pluie et du rayonnement solaire, ce qui aide à accélérer la décomposition de la matière organique (Jonard *et al.*, 2004) et à améliorer la capacité photosynthétique (López-Serrano *et al.*, 2005). Cela pourrait être se manifester par amélioration de la nutrition minérale des arbres après éclaircie. Cette amélioration au niveau de nutrition minérale se manifeste par des concentrations foliaires plus élevées en éléments minéraux, surtout en azote, car la capacité photosynthétique est en corrélation avec la teneur en N. Dans le sud-est de l'Espagne, les concentrations en N, P et K étaient plus importantes dans les aiguilles des pins d'Alep soumis à l'éclaircie que dans celles des pins soumis à d'autres traitements sylvicoles (élagage, nettoyage et combinaison entre les 3 traitements) au moins pendant la 1ère année suivant l'éclaircie. Les mêmes résultats ont été trouvés sur le pin blanc d'Amérique (Pinus strobus*) où la nutrition minérale et la croissance ont été améliorées après l'application d'une combinaison de traitements sylvicoles dont l'éclaircie* (Burgess & Wetzel, 2000). Par contre, l'étude de l'impact de l'éclaircie sur la teneur en éléments minéraux des aiguilles d'épicéas en Ardennes a montré que le phosphore est en relation positive avec la densité du peuplement : l'éclaircie fait donc diminuer la teneur en P dans les aiguilles de cette espèce (Jonard *et al.*, 2004). La relation entre l'éclaircie et les teneurs foliaire en éléments minéraux est donc différente d'une espèce à l'autre.

Si on considère que le frêne a le même comportement précédent en ce qui concerne la relation éclaircie-nutrition minérale, l'éclaircie pourrait expliquer une partie des concentrations foliaires importantes en azote des arbres des parcelles étudiées au niveau global (voir chapitre croissance-nutrition minérale, § 3.2.2) et en particulier dans les parcelles M2 et Pr1 (voir chapitre croissance-nutrition minérale, Tableau 3 du §3.1). Cette concentration relativement faible dans les feuilles des arbres de la parcelle B6, malgré l'éclaircie, pourrait indiquer une fertilité très faible dans cette parcelle avant éclaircie. Cependant, la concentration de N étant aussi importante dans d'autres parcelles non soumises à l'éclaircie (A3 par exemple), cela signifie que la gamme des concentrations élevées de N n'est pas due à l'éclaircie. Elle peut être expliquée par deux facteurs possibles : le choix des folioles seules pour faire l'analyse et la date de la récolte des feuilles qui peut être trop précoce. Le développement biologique des arbres de notre zone montagneuse peut en effet être plus tardif par rapport à celui des arbres situés à des altitudes plus basses. Comme la concentration foliaire de N tend à diminuer en fonction du temps, la récolte des feuilles relativement jeunes (par rapport aux autres études) entraînerait une concentration plus importante en N. Les valeurs critiques de la concentration en N dans nos

folioles de frêne peuvent donc être plus élevées que celles rapportées par Bonneau (1995) (28 vs 25 $g.kg^{-1}$). La concentration importante de N foliaire des arbres des parcelles M2 et Pr1 par rapport aux autres parcelles ne serait donc pas un effet de l'éclaircie, surtout pour la parcelle Pr1, car cette parcelle a présenté la même tendance lors d'une analyse foliaire faite avant éclaircie (résultats non présentés dans cette thèse).

Cela suggère que dans notre zone d'étude et pendant la période étudiée, l'effet de l'éclaircie ne se voit pas directement sur les concentrations foliaires des éléments minéraux.

Cependant, la réponse des peuplements à l'interaction de ces deux facteurs (fertilité et éclaircie) est différente selon l'âge des peuplements. La durée de la réponse positive des peuplements de sapin de douglas les plus jeunes au traitement combiné de fertilisation et éclaircie est plus importante que celle des peuplements plus âgés (Stegemoeller & Chappell, 1991). L'explication qu'on a présentée dans le chapitre croissance- compétition de la réaction importante des arbres de la parcelle M2 à l'éclaircie, qui se base sur l'âge jeune et la fertilité importante de cette parcelle est donc justifiée. L'effet de la faible fertilité sur la réaction à la compétition et donc à l'éclaircie des arbres de la parcelle B6, serait liée à plusieurs autres facteurs modulant cette réaction, comme on l'a évoqué précédemment.

Il y a donc un effet indirect de la fertilité sur la croissance radiale ; et un effet indirect aussi de la compétition sur la croissance en hauteur par son effet sur la nutrition des arbres. Cette croissance en hauteur est soumise aussi indirectement au climat, car ce dernier influence la fertilité (eau et nutrition minérale).

La croissance potentielle, en incluant la croissance en diamètre et en hauteur, dépend donc de l'âge, du climat, de la compétition et de la fertilité (Dhôte, 1995). Pour cette raison, il faut prendre en compte tous ces facteurs lors de la construction du modèle de croissance.

Interaction facteurs existence- facteurs croissance :

Les facteurs topographiques déterminant l'existence des accrus de frêne, sont aussi des facteurs possibles limitant la croissance de ces accrus. Ces facteurs expliquent l'existence des accrus de frêne car ils sont en relation avec les pratiques agricoles qui représentent la cause principale du phénomène des accrus. L'effet des facteurs topographique sur l'existence des accrus est lié aussi à leur relation avec l'écologie et la physiologie du frêne. La pente et l'exposition influencent en fait les ressources disponibles pour le frêne comme l'eau, la nutrition minérale et même la lumière. En conséquence, ces facteurs vont influencer la croissance du frêne. La croissance en circonférence de frêne en Angleterre était la meilleure dans le fond des vallées (Merton, 1970). Scurfield affirme lui aussi ce résultat car il a trouvé que les croissances (en hauteur et diamètre) sont moins importantes aux expositions ouest qu'aux expositions est à cause d'un vent fort, d'une grande exposition au soleil et des conditions générales xériques (Scurfield, 1959). La

pente pourrait donc être l'un des facteurs explicatifs de la faible fertilité (alimentation en eau et en éléments minéraux) et donc de la faible croissance des arbres des parcelles A4 et B6 (chapitre croissance- nutrition minérale) qui sont les parcelles les plus pentues (53% pour A4 et 50% pour B6).

Par contre, des facteurs limitants possibles de la croissance du frêne comme l'acidité du sol peuvent être au delà de certains seuils, des facteurs limitant de son existence (par exemple pH<4,2 selon Wardle, 1961). Cela correspond à notre hypothèse sur l'effet possible du pH sur la croissance des arbres des parcelles A4 et B6, ce facteur étant connu pour déterminer la présence du frêne.

Cependant la gamme des conditions topographiques dans lesquelles les accrus peuvent se trouver, reste plus vaste que celle des conditions optimales pour la croissance. Les zones prédites par le modèle de l'expansion des accrus de frêne ne sont donc pas en général des zones d'une bonne croissance de ces accrus au niveau topographique.

5. Vers un modèle général ?

La démarche de modélisation de la croissance des accrus de frêne que nous avons entreprise a eu pour but essentiel la compréhension des processus de croissance pour aider à la gestion de ces peuplements. Il s'agissait davantage d'ouvrir des pistes de recherche que de fournir un modèle de gestion prédictif opérationnel. Nous avons toutefois tenté de réduire autant que possible la variabilité inexpliquée de la croissance, tant en hauteur qu'en diamètre, à l'aide des données dont nous disposions.

On a d'abord construit un modèle de croissance en hauteur en fonction de l'âge selon le niveau de fertilité. Ce modèle, basé sur une hypothèse de proportionnalité des allongements annuels entre classes de fertilité différentes, est utile pour définir la fertilité relative des parcelles étudiées, et il permet de prédire la croissance en hauteur dans les conditions actuelles de milieu. Le niveau de fertilité, défini comme la hauteur dominante à un âge donné, n'a toutefois pas pu être relié à des paramètres précis de nutrition minérale ou hydrique.

Pour la croissance en diamètre, on a étudié différents facteurs de manière individuelle et indépendante les uns des autres, mais en faisant apparaître de possibles interactions entre eux (cf ci-dessus). Les relations obtenues sont de deux sortes. Dans le domaine de la compétition, il s'agit de modèle continus sublinéaires (croissance en fonction de l'indice de voisinage Sd2 et croissance en fonction du diamètre initial), alors que l'effet du climat se manifeste sous la forme de seuils de valeurs auxquels la croissance en diamètre est sensible dans certains contextes climatiques et/ou stationnels. Ces deux catégories de modèles sont très différentes et difficilement intégrables pour construire un modèle général de croissance avec les données dont on dispose.

2. LIMITES DE L'ETUDE

Cette thèse avait plusieurs objectifs : construire des cartes de la répartition actuelle et future des accrus de frêne ; et dans les zones où on les trouve : estimer leur croissance potentielle en étudiant les facteurs pouvant influencer leur croissance afin de fournir un outil qui pourrait servir les acteurs locaux à gérer ces peuplements. Ces différents objectifs impliquent des travaux dans des domaines très variés, des travaux lourds et longs qui ne peuvent être faits que pendant des périodes déterminées par la physiologie des arbres. Ces contraintes n'ont pas permis d'approfondir le travail au même niveau dans ces différents domaines dans la limite de la durée de la thèse. De plus, on avait décidé de se baser sur les résultats de la cartographie des accrus de frêne pour identifier les facteurs possibles de l'existence des accrus et de les considérer comme facteurs explicatifs possibles de la croissance pour ensuite approfondir l'étude de la relation croissance - facteurs explicatifs possible. Cela devait être fait par un croisement entre la carte éventuelle des zones des accrus détectés et les cartes des facteurs physiques et historiques de ces zones. Mais comme la réalisation des cartes de la répartition des accrus de frêne n'a pas pu aboutir avec les outils de télédétection, nous nous sommes orientés davantage sur la croissance et ses facteurs explicatifs.

Le travail sur des terrains privés parfois difficiles d'accès a limité le nombre des peuplements étudiés et des échantillons pris. Cela a certainement limité, comme on l'a vu, l'obtention de corrélations nettes entre les différentes variables étudiées.

Cependant, ce travail contient un premier essai de cartographie des accrus de frêne par la télédétection et un premier modèle de description de l'expansion de ces accrus. Il constitue aussi une première étape pour comprendre la croissance des accrus de frêne et évaluer leurs potentialités, ce qui aiderait les propriétaires à avoir une vision du futur possible de leurs accrus.

Concernant les facteurs climatiques, les données climatiques sont issues des stations météo les plus proches des parcelles étudiées. La correction des valeurs des précipitations selon l'altitude n'étant pas possible, les valeurs utilisées ont pu induire une sur ou sous estimation de l'alimentation en eau et donc altérer la valeur explicative de ce facteur. Un autre biais peut être constitué pas la non-prise en compte des facteurs topographiques lors du calcul du bilan hydrique.

3. PERSPECTIVES

Modèle de la présence des accrus de frêne :

Il reste à faire des enquêtes auprès des acteurs locaux dans les zones où on veut appliquer le modèle de l'expansion des accrus de frêne, pour estimer les variables qui concernent la gestion des prairies. Cela permettrait d'avoir une prédiction plus précise.

D'autre part, il y aurait lieu d'ajouter au modèle des variables concernant les conditions stationnelles (sol, climat) afin de tester leur valeur explicative et d'améliorer la précision du modèle.

- La prédiction de l'établissement et de la durabilité des semis des ligneux dans les prairies abandonnées est en fait très difficile car ils sont influencés par plusieurs facteurs. Des expérimentations seraient donc indispensables pour pouvoir les prédire (Prach *et al.*, 1996).

Modèle de la croissance en hauteur :

- Le modèle ajusté de la croissance en hauteur permet une estimation de la potentialité relative d'un peuplement, mais la potentialité réelle reste différente de ce que le modèle estime, surtout qu'il ne prend en compte que l'âge comme facteur explicatif et que la plupart des accrus existants sont relativement jeunes. Il reste à déterminer précisément les facteurs influant la fertilité et donc la croissance en hauteur, ce qui rendra l'estimation de la potentialité de la croissance en hauteur plus précise.

Relation croissance- nutrition minérale :

- Vue l'interaction entre les différents éléments minéraux, il serait intéressant de faire des expérimentations de fertilisation pour identifier l'effet de chaque élément minéral sur la croissance des accrus de frêne dans cette zone d'étude afin de les intégrer dans le modèle de croissance.

Relation croissance- climat :

Plusieurs prolongements sont envisageables :

- Etudier l'effet du climat sur la croissance des autres peuplements de frêne existants dans des conditions topographiques différentes serait utile pour décider de la possibilité de généraliser les résultats qui concernent les facteurs limitants de la croissance du frêne dans les Pyrénées soumis au climat océanique montagnard. L'étude de l'effet de la pente est par exemple envisageable dans la mesure de son influence sur la disponibilité de l'eau du sol.

- L'importante autocorrélation d'ordre 1 trouvée entre les accroissements annuels sur les arbres étudiés de nos parcelles (surtout B6 et Pr1), nous amène à penser à l'importance des facteurs climatiques de l'année précédente sur la croissance. Ces facteurs pourraient être pris en compte dans une future étude sur des séries annuelles plus longues

- Comme le bilan hydrique résulte des précipitations et des caractéristiques du sol, les précipitations importantes dans les Pyrénées ne garantissent pas forcément un bilan hydrique positif partout. Des peuplements de frêne dans d'autres parcelles que celles étudiées dans le chapitre croissance-climat, peuvent donc avoir un déficit hydrique comme on l'a envisagé dans la parcelle A4 (chapitre croissance-nutrition minérale). Ce bilan hydrique est donc à étudier dans les autres parcelles (B10, A3 et A4), ainsi que dans des parcelles supplémentaires. L'évaluation de ce bilan hydrique peut être améliorée. Il faudra probablement mieux

instrumenter les parcelles étudiées pour pouvoir mesurer précipitations et températures. La pente est un facteur qui doit être pris en compte lors du calcul du bilan hydrique. Il est possible d'envisager l'utilisation d'indicateurs de stress hydrique comme le « delta C13 » (Schweingruber, 1996).

Relation croissance- compétition :

L'estimation de l'effet de la modalité d'éclaircie par la comparaison de la croissance des arbres soumis à la modalité avec des arbres d'une placette témoin n'est pas suffisante. Les conditions locales de la placette témoin influencent la croissance de ses arbres. Lorsque ces conditions diffèrent de celles de la placette éclaircie, nous avons vu qu'un biais d'estimation de l'effet de l'éclaircie survient alors. La difficulté de disposer d'une homogénéité suffisante dans ces peuplements suggère de prendre en compte les différences de croissance initiales entre placettes dans l'évaluation des éclaircies.

Interactions entre facteurs influant la croissance :

On a vu que la croissance est le résultat des actions de différents facteurs en interaction entre eux. La prise en compte de ces interactions au niveau méthodologique pourrait être réalisée en étudiant l'évolution de la croissance en fonction du temps pour chaque intensité d'éclaircie, témoin compris : d'une part, les influences respectives de la compétition et du climat seraient ainsi associées dans le même modèle, à condition de poursuivre les mesures de croissance suffisamment longtemps après éclaircie; d'autre part, la comparaison avec les courbes des placettes témoin mettrait en évidence la perte de croissance liée à l'absence d'éclaircie (Timbal, 2002). Les arbres soumis à la compétition pourraient être classés selon leur statut de compétition (selon l'indice de compétition). Pour chaque classe de compétition, les corrélations entre les indices de croissance et les données climatiques seraient calculées (Piutti & Cescatti, 1997).

L'analyse de l'interaction entre le climat et la compétition pourrait aider à prendre en compte la réaction des arbres à un changement climatique lors de l'aménagement du peuplement. Comme l'éclaircie modifie l'intensité de la compétition, il est donc possible de modifier la réponse des arbres au climat par la sylviculture (Piutti & Cescatti, 1997). Par exemple, l'effet négatif de l'augmentation de la température pourrait être réduit par une diminution du niveau de compétition par l'éclaircie.

D'une manière très générale, pour tous les aspects de cette thèse, l'augmentation de l'effectif des échantillons (parcelles et arbres) sera indispensable pour vérifier nos résultats et leur généralisation.

4. PROPOSITIONS DE GESTION DES ACCRUS DE FRENE DANS LES PYRENEES CENTRALES

Ce travail aide à avoir une idée du devenir de notre zone d'étude. Mais cette perspective pourrait sans doute être généralisée (après validation) à l'ensemble des Pyrénées centrales, aussi bien au niveau des zones occupées par des accrus frêne que des zones potentielles.
Le choix de la gestion des accrus existants ou du contrôle des accrus potentiels, concerne les différents acteurs locaux (Curt *et al.*, 2004), mais il faut les aider à définir des politiques locales contribuant à une gestion durable des territoires. Pour cela, il faut leur donner les informations utiles pour la valorisation de cette ressource quant elle existe (Brun, 1994).

La difficulté de gérer les accrus est en fait due à l'absence de leur valorisation actuelle (qui permettrait de connaître leur potentialité), à l'absence de motivation des propriétaires, au morcellement de la propriété, et à l'absence de politique nationale adaptable à la multiplicité des enjeux (Curt *et al.*, 2004). En donnant une idée de la potentialité de ces accrus et compte-tenu de la motivation qu'on a constatée chez quelques propriétaires, notre étude permettrait donc de dépasser quelques-unes de ces difficultés pour guider la gestion des accrus dans notre zone d'étude.

Pour aider les gestionnaires, ma thèse apporte quelques éléments de réponse sur le risque d'avoir des accrus de frêne dans l'avenir et comment les contrôler. Une évaluation de la potentialité des accrus et les possibilités d'en tirer profit sont aussi proposées.

1- Le risque potentiel d'avoir des accrus de frêne :

La première étape pour évaluer le risque potentiel d'avoir des accrus de frêne dans un territoire est d'observer l'existence de frêne dans ce territoire. Si son existence est fréquente dans ce territoire (quelle que soit la forme : arbres isolés ou en groupes, haies ou peuplements), il est possible dans ce cas d'avoir une extension des accrus de frêne existants et d'évaluer ce risque. On a montré qu'on peut évaluer le risque d'avoir des accrus en appliquant le modèle que nous avons mis au point. Cette évaluation se traduira par une cartographie des zones prédites comme zones à risque. Sur la base de cette cartographie, une bonne connaissance du territoire surtout au niveau des pratiques agricoles permettra d'avoir une prédiction plus précise.

Dans la commune de Villelongue, Julien (2006) a fait une simulation des scénarios de pluies de graines autour des vieux frênes potentiellement semenciers à partir d'une cartographie de ces vieux frênes. Un croisement entre ces scénarios et notre carte de la prédiction du modèle pourrait indiquer plus précisément les zones réelles qui peuvent avoir des accrus de frêne.

Pour éviter ce phénomène dans les zones à risque, il pourra être fait un abattage ou un émondage des semenciers potentiels comme les frênes à fleurs femelle et hermaphrodite situés dans les zones prédites comme zone à risque (Julien, 2006). Une autre possibilité d'empêcher ces accrus d'apparaître est de lancer un pâturage intensif dans ces zones.

2- La valorisation des accrus existants :

La valorisation des accrus de frêne existants dans les zones étudiées sera faite à partir de l'évaluation de leur potentialité de croissance. Cette potentialité a été étudiée en fonction des conditions stationnelles et des interventions sylvicole. Cette étape est essentielle avant toute gestion de ces peuplements (Curt *et al.*, 2004).

Dans nos sites, on a classifié les peuplements des parcelles étudiées en classes de fertilité. On a vu que les arbres des parcelles ayant des sols de qualité relativement faible (pH, BS, nutrition minérale) comme la parcelle A4, ont une croissance relativement faible en hauteur et ils appartiennent donc aux classes de fertilité faible. Dans ces parcelles où on ne peut pas espérer d'avoir une potentialité importante de croissance, le bois de ces arbres ne pourra servir que comme bois de chauffage sans oublier les intérêts environnementaux (comme la protection contre l'érosion) et peut-être écologiques (diversité biologique) de ces peuplements. Ces parcelles mériteraient peut-être d'autres valorisations comme la valorisation écologique, cynégétique, touristique …

Dans les parcelles fertiles où la croissance en hauteur est importante comme M2, on peut penser à un objectif économique du bois (bois d'œuvre).

Pour la valorisation sylvicole de ces peuplements, nous avons montré que plus le peuplement est jeune et la parcelle fertile, plus il est sensible à la compétition. Il faut donc intervenir dans ces peuplements prometteurs pour améliorer leur croissance, en limitant l'effet négatif de la compétition sur la croissance en diamètre à l'aide d'éclaircies. On a vu que plus l'intensité de l'éclaircie est importante, plus la croissance radiale (en surface de cerne) est importante. Cela implique un détourage des arbres. Le détourage doit être appliqué en faveur des arbres ayant des dimensions importantes, même si, comme nous l'avons montré, la sensibilité de ces arbres à la compétition est moins importante que pour les petits arbres. L'abattage des arbres voisins pourra être fait, comme dans nos essais, sur une surface de $100m^2$ autour de ces arbres d'avenir, surface qui correspond également à la surface d'influence de la compétition interindividuelle.

Pour les peuplements âgés comme Pr1 (68 ans), leur sensibilité est faible à l'éclaircie. Elle est limitée aux arbres proches (sur une surface de $70m^2$) de l'arbre cible. On ne conseille pas de faire d'éclaircie dans ces peuplements qui ne réagissent que dans le cas d'une ouverture brutale du peuplement, mais pas de manière durable. La croissance des arbres de ces peuplements âgés serait plutôt liée à la densité globale qu'à la densité locale autour de chaque arbre.

En ce qui concerne la parcelle B6, on a vu que la croissance de ses arbres était proche de celle des arbres de M2 malgré sa fertilité faible.

Dans cette parcelle (B6), l'effet des micro conditions (répartition hétérogène de la fertilité) qu'on a envisagé comme facteur possible explicatif de la faible réaction des arbres à la compétition et donc à l'éclaircie n'est pas facile à cerner. On peut toutefois penser que les arbres les plus dominants, dans la mesure où ils intègrent à la fois une bonne vigueur potentielle et des conditions locales favorables, pourraient répondre efficacement à une éclaircie malgré l'existence d'une fertilité moyenne peu élevée.

Pour la parcelle B10, son âge jeune, sa fertilité importante et la croissance importante de ses arbres, nous encouragent a priori à proposer le même type d'intervention que pour la parcelle M2. Toutefois, la faible densité de ce peuplement (1050 arbre/ha) laisse des doutes sur le bénéfice à attendre d'une éclaircie, tant en termes de croissance qu'en termes de coûts-bénéfices. D'autres expérimentations d'éclaircie dans des accrus à faible densité serait nécessaire pour conclure ici. Il n'en reste pas moins que le bois d'oeuvre produit par cette parcelle peut être valorisé même sans éclaircie, quitte à effectuer une taille de formation pour améliorer sa croissance en hauteur et la forme de ses tiges (Bulfin & Radford , 1998; Claessens, 1997).

Compte-tenu de la fertilité importante de la parcelle A3 et de la croissance importante de ses arbres, l'exploitation de son bois comme bois d'œuvre serait envisageable. Comme la parcelle B10, la densité faible de cette parcelle (1450 arbre/ha) pose la question de l'utilité d'y faire une éclaircie. De plus, l'âge de cette parcelle (45 ans) pose la question de savoir si les arbres peuvent encore réagir à l'éclaircie à ce stade. On ne peut donc pas décider s'il faut éclaircir ce peuplement, mais on peut décider selon nos résultats que ce peuplement peut servir pour bois d'œuvre. Comme dans la parcelle B10, l'élagage serait à prévoir.

Le frêne étant, du fait de la qualité de son bois, une espèce forestière « précieuse », il est justifié d'en tenter une valorisation économique (Nepveu, 1992; Soulères, 1997). Sa réponse positive à l'éclaircie, comme nous l'avons constaté, encourage donc à sa valorisation lorsque les conditions stationnelles le permettent. Mais même en cas de qualité médiocre, les qualités physiques de son bois permettent son utilisation en charpente ou menuiserie (Gauberville, 1997).

De toute façon, la gestion de ces accrus ne peut pas se faire sans la motivation des propriétaires. Cette gestion nécessite ensuite une concertation des acteurs entre eux d'une part, et entre ces acteurs et les institutions forestières (comme le CRPF) et agricoles (comme la Chambre d'Agriculture) d'autre part (Brun, 1994), afin de préciser les objectifs prioritaires et de mettre en place des outils pour un consensus entre tous les utilisateurs de cet espace (Curt *et al.*, 2004). Il faut que ces parties réfléchissent ensemble à un schéma d'aménagement intégrant leurs préoccupations pour parvenir à des actions coordonnées entre eux.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail de thèse, basé sur l'étude de la répartition des accrus de frêne et leur croissance dans quelques vallées des Hautes Pyrénées, nous avons contribué :

- fournir des références sur la croissance des accrus de frêne dans les Pyrénées centrales et les facteurs influant sur cette croissance,
- amener des éléments de réponse aux questions posées par les acteurs locaux pour mieux comprendre la présence et le développement actuels et futurs des accrus de frêne dans les Pyrénées centrales.

La répartition des accrus de frêne dans les Pyrénées centrales du département des Hautes Pyrénées est liée à la topographie et à l'utilisation du sol. Le risque d'avoir des accrus de frêne est plus important dans les prairies peu pâturés ou abandonnées. La pratique du pâturage n'affecte pas seulement l'installation du frêne mais aussi la dynamique de sa croissance.

La croissance des accrus de frêne est différente d'un peuplement à l'autre en fonction des facteurs stationnels abiotiques et biotiques. Cette croissance, modulée par ces différents facteurs, peut être améliorée par des interventions sylvicoles en faveur des arbres dominants. Dans les conditions stationnelles favorables à la croissance des accrus de frêne, cette intervention sera importante si les peuplements sont encore jeunes. Cela peut aider les propriétaires à trouver de nouveaux revenus, ce qui leur donnerait plus de motivation pour gérer ces accrus et leur territoire. Mais même dans les accrus de croissance faible, les propriétaires et les autres acteurs locaux peuvent profiter de cette ressource.

Ce travail de thèse peut servir de référence aux gestionnaires pour les aider à définir des politiques locales pour une gestion durable de leur territoire. Il propose:

- un outil pour une prédiction des zones risquant davantage d'être colonisées par des accrus de frêne ;
- un outil pour classer les accrus de frêne selon leur croissance en hauteur et donc selon la fertilité de leur site, ce qui aide à déterminer leur potentialité ;
- une valorisation sylvicole des accrus étudiés qui pourrait être appliquée sur d'autres accrus ayant les mêmes conditions et les mêmes caractéristiques ;
- un outil pour développer un modèle général de la croissance des accrus de frêne dans les Hautes-Pyrénées. Ce modèle peut assumer un rôle dans la politique forestière par sa prédiction de la croissance des arbres et leur réponse au climat sous différents type de gestion forestière.

Quoiqu'il en soit, cette étude contribue à améliorer le regard porté sur ces accrus, et peut suggérer l'utilité de les gérer comme des peuplements forestiers à part entière, sachant surtout qu'ils peuvent diversifier les revenus des propriétaires à l'aide des outils offerts dans ce travail.

Bibliographie

Bonneau, M, 1995. Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. ENGREF, Nancy. 367 p.

Brun, J.J., 1994. Boisement spontanés feuillus en montagne: dynamique et gestion. Conference Cemagref , 49-55.

Bulfin ,M., Radford ,F., 1998. Effect of early formative shaping on newly planted broadleaves. Irish Forestry 55, 35-61.

Burgess, D., Wetzel,S., 2000. Nutrient availability and regeneration response after partial cutting and site preparation in eastern white pine. Forest Ecology and Management 138, 249-261.

Casper, B.B., Jackson,R.B., 1997. Plant competition underground. Annual Revue of Ecology and Systematics 28, 545-570.

Claessens, H., 1997. Itinéraires sylvicoles pour la production de frêne de qualité. Cahiers Forestiers de Gembloux 20, 21 p.

Curt, T., Prévosto, B., Bergonzini, J. C, 2004. Boisements naturels des terres agricoles en déprise. Collection ECOFOR "écosystèmes forestiers" n°2. 119 p.

Dhôte, J.F., 1995. Définition de scénarios d'éclaircie pour le hêtre et le chêne. Revue Forestiere Francaise 47, 106-110.

Gauberville,C., 1997. Les accrus: des boisements mélangés spontanés, à faible coût. Forêt Entreprise 118, 34-36.

Gracia, M., Retana,J., 1996. Effect of site quality and thinning management on the structure of holm oak forests in northeast Spain. Annales des Sciences Forestières 53, 571-584.

Jalilvand, H., 2008. Tree-ring growth response of common ash (Fraxinus excelsior L.) to climatic variables using multiple regressions. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources 11, 597-610.

Jonard, M., Ponette,Q., Giot,P., 2004. Impact de l'intensité d'éclaircie sur l'humus et sur les teneurs foliaires en pessière. Forêt Wallonne 73, 35-39.

Julien, M.P., 2006. Processus de colonisation des prairies permanentes par le frêne (*Fraxinus excelsior* L.) et conséquences sur la biodiversité: le cas de la zone périphérique du Parc National des Pyrénées. Thèse de Doctorat en Ecologie. Université Paul Sabatier -Toulouse III. 254 p.

Kassas, M., 1951. Studies in the ecology of Chippenham Fen Recent History of the Fen, from evidence of historical records, vegetational analysis and tree-ring analysis. Journal of Ecology 39, 1-32.

Le Goff, N., Ottorini, J.M., 1993. Thinning and climate effects on growth of beech (*Fagus sylvatica* L.) in experimental stands. Forest Ecology and Management 62, 1-14.

López-Serrano, F.R., De las Heras, J., González-Ochoa, A.I., García-Morote, F.A., 2005. Effects of silvicultural treatments and seasonal patterns on foliar nutrients in young post-fire *Pinus halepensis* forest stands. Forest Ecology and Management 210, 321-336.

Marigo, G., Peltier, J.-P., J.,G., Pautou, G., 2000. Success in the demographic expansion of *Fraxinus excelsior* L. Trees 15, 1-13.

Martin, P., 1974. Analyse des cernes. Dendrochronologie et dendroclimatologie. 78 p.

Merton, L.F.H., 1970. The history and status of the woodlands of the Derbyshire limestone. Journal of Ecology 58, 723-744.

Nepveu,G., 1992. L'Utilisation des bois de Frêne et de Merisier : aptitudes technologiques, facteurs de variabilité. Revue Forestière Française 44, 142-149.

Piuttie, E., Cescatti, A., 1997. A quantitative analysis of the interactions between climatic response and intraspecific competition in European beech. Canadian Journal of Forest Research 27, 277-284.

Prach,K., Leps,J., Michalek,J., 1996. Etablishment of *Picea abies* seedlings in a central European mountain grassland: an experimental study. Journal of Vegetation Science 7, 681-684.

Schweingruber, F. H.1996. Tree Rings and Environment Dendroecology.609 p.

Scurfield, G., 1959. The ashwoods of the Derbyshire carboniferous limestone: Monk's Dale. Journal of Ecology 47, 357-369.

Soulères, G., 1997. Les feuillus précieux: le prix des bois sur pied et leu évolution. Forêt de France 403, 4-9.

Stegemoeller, K.A., Chappell,H.N., 1991. Effects of fertilization and thinning on 8-year growth responses of second-growth Douglas-fir stands. Canadian Journal of Forest Research 21, 516-521.

Timbal, J., 2002. Analyse retrospective de la croissance radiale et mise en relation avec le bilan hydrique dans un dispositif d'intensité d'éclaircie de pin maritime dans les Landes de Gascogne. Annals of Forest Science 59, 205-217.

Wardle , P., 1961. *Fraxinus excelsior*. Journal of Ecology 49, 739-751.

ANNEXES

Annexe 1 : Classes des DBH des arbres des parcelles étudiées.

DBH (mm)	Classe
> 50	1
51 à 100	2
101 à 150	3
151 à 200	4
201 à 250	5
251 à 300	6
301 à 350	7
350 à 400	8

Annexe 2 : Données climatiques mensuelles enregistrées dans les stations retenues pour les 2 vallées étudiées (Adour et Gave de Pau).

Précipitations mensuelles enregistrées dans la station Campan-Artigues (Vallée de l'Adour)

année	janv	fév	mars	avr	mai	juin	juil	aout	sept	oct	nov	déc
1952			52	42	20	75	96	34	57	273	159	277
1954	280	213	90	64	48	30	65	89	101	112	69	166
1955	220	108	43	29	70	119	133	60	119	103	29	204
1956	234	77	34	157	216	68	66	123	82	66	122	31
1957	51	87	46	149	151	241	57	91	104	27	102	52
1958	172	65	239	118	119	87	103	125	102	64	125	163
1959	95	10	155	161	80	110	73	124	131	130	99	212
1960	95	47	101	84	75	110	111	53	90	209	118	240
1961	187	86	6	183	153	84	97	77	102	73	89	58
1962	111	164	112	124	192	34	46	36	90	72	136	171
1963	63	66	150	90	92	105	110	195	131	39	124	95
1964	24	71	136	106	94	92	87	88	103	194	72	145
1965	194	38	92	138	75	60	52	55	158	92	175	299
1966	69	157	53	103	158	85	110	43	28	203	242	192
1967	47	7	41	53	73	79	52	69	113	89	215	133
1968	160	52	54	61	147	89	64	107	136	35	107	128
1969	69	51	135	128	92	54	128	109	117	18	55	356
1970	87	103	126	95	86	116	43	66	16	108	63	24
1971	140	233	140	137	140	130	95	139	119	49	203	28
1972	213	119	53	163	99	122	55	112	86	51	61	80
1973	59	212	57	67	74	119	119	85	75	41	127	96
1974	33	130	176	105	84	83	58	158	158	237	161	36
1975	117	20		92	175	87	16	94	86	77	206	17
1976	30	112	83	149	99	60	105	101	104	188	118	151
1977	44	76	67	128	276	126	252	145	15	86	101	48
1978	236	125	176	148	184	161	63	28	45	77	26	104
1979	241	166	98	196	181	49	29	110	113	167	86	129
1980	102	44	162	85	171	101	47	94	41	283	130	233
1981	215	86	91	93	92	61	78	54	85	135	33	351
1982	117	117	162	27	68	58	121	114	76	203	210	250
1983	10	82	115	75	77	59	18	147	25	74	63	86
1984	193	135	80	35	167	104	19	130	211	106	206	109
1985	81	80	135	68	133	56	63	51	4	47	161	88
1986	300	42	59	119	61	40	44	47	109	61	141	159
1987	76	111	102	76	76	78	133	95	60	143	85	35
1988	231	120	175	92	82	150	35	96	100	62	22	70
1989	28	82	71	195	66	50	60	45	64	48	94	70
1990	53	141	36	143	158	197	71	61	39	115	66	158
1991	40	49	152	101	150	72	104	71	83	78	165	36
1992	31	26	102	114	84	215	75	109	119	379	159	115
1993	12	41	50	138	151	110	44	78	230	148	53	198
1994	108	185	18	208	85	68	37	17	123	88	99	164
1995					117			59	122	35	72	160
1996	147	179	61	95	93	96	133	102	60	96	304	91
1997	114	57	9	65	82	117	120	102	39	59	154	167

1998	99	15	130	143	109	58	55	68	152	123	152	85
1999	121	59	60	109	138	69	86	35	91	50	126	153
2000	4	143	66	127	111	176	74	67	42	106	143	61
2001	184	35	101	154	72	74	189	47	27	46	121	35
2002	51	135	51	91	201	121	107	148	33	132	249	240
2003	184	112	126	92	160	60	43	55	207	108	114	124
2004	228	56	100	130	125	46	62	76	57	101	106	144
2005	132	74	52	142	144	57	36	75	99	87	78	97
2006	94	23	125	85	79	125	77	59	156	74	159	56

Températures minimales moyennes mensuelles enregistrées dans la station Campan-Artigues (Vallée de l'Adour)

année	janv	fév	mars	avr	mai	juin	juil	aout	sept	oct	nov	déc
1959	-2,2	-1,2	1,2	2,0	6,0	8,8	11,9	10,8	9,8	5,8	0,0	-1,1
1960	-2,5	-0,1	1,9	1,6	6,7	9,8	8,6	9,0	6,7	3,1	1,1	-3,6
1961	-4,3	1,9	2,0	3,9	5,3	7,8	10,0	9,3	11,1	5,4	0,4	0,7
1962	-1,5	-4,6	-3,5	1,0	4,2	7,9	9,3	9,9	9,6	6,5	-1,4	-3,4
1963	-3,8	-5,8	-0,3	0,8	2,7	7,5	10,5	8,0	7,0	6,5	2,6	-2,8
1964	-2,8	-1,6	-1,3	1,9	7,5	8,3	11,8	10,2	11,2	3,0	2,0	-3,5
1965	-3,2	-6,4	0,1	1,2	5,3	7,8	8,7	9,2	6,7	7,4	0,7	-0,5
1966	1,1	2,6	-2,4	2,4	4,2	7,9	8,6	9,5	10,7	6,2	-0,2	-0,3
1967	-2,1	-0,5	0,6	0,6	3,9	6,8	11,5	9,6	7,4	7,9	2,3	-3,5
1968	-2,6	-1,6	-0,9	2,6	3,7	7,2	9,2	8,3	7,3	7,5	2,9	-1,2
1969	-1,1	-5,2	-0,3	1,7	5,4	5,4	10,2	9,3	7,0	6,3	0,0	-4,0
1970	-0,6	-2,9	-4,6	-0,6	4,3	8,8	9,2	10,2	10,2	3,8	3,7	-3,6
1971	-2,2	-2,6	-5,8	3,4	5,1	6,5	11,3	10,5	6,7	5,5	-2,9	0,1
1972	-3,3	-1,5	0,3	-0,4	3,0	5,8	9,0	8,1	5,5	4,7	2,0	-0,6
1973	-2,5	-4,8	-3,1	-0,2	5,9	7,8	9,2	11,9	8,1	3,8	0,4	-2,7
1974	-1,0	-3,2	-1,5	0,5	3,5	7,0	8,9	9,8	5,4	-1,0	-0,3	-0,7
1975	-0,9	-0,4	-2,4	-0,3	3,5	6,4	8,9	10,0	7,0	4,0	-0,3	-3,0
1976	-3,6	-2,6	-1,5	-0,1	2,9	9,0	10,3	8,8	5,9	3,2	-1,8	-2,2
1977	-3,2	0,0	0,6	0,2	1,8	5,1	7,4	7,1	6,2	5,7	-0,5	-0,1
1978	-4,0	-1,3	-1,1	-1,8	2,4	6,3	7,6	8,9	8,3	3,3	0,2	-1,0
1979	-1,3	-1,9	-0,9	-0,9	3,0	6,9	9,6	7,5	6,8	4,8	-1,0	-1,4
1980	-4,1	-0,5	-1,2	0,3	2,9	5,8	8,0	11,0	9,6	3,4	0,0	-4,4
1981	-3,3	-5,4	1,5	1,8	3,8	7,1	8,1	10,5	7,2	4,7	2,6	-2,4
1982	-0,9	-1,9	-3,0	-0,3	3,3	6,9	9,6	7,4	6,7	2,3	0,3	-3,1
1983	-2,6	-4,8	1,4	2,2	3,1	8,4	11,8	9,4	7,6	5,1	3,0	-1,5
1984	-3,6	-4,4	-3,9	2,4	0,6	7,5	11,4	10,1	6,6	5,8	4,5	-1,7
1985	-8,8	-0,7	-4,5	1,4	2,7	6,8	10,5	8,3	9,3	5,5	-2,3	0,4
1986	-2,6	-3,9	-1,2	-1,8	5,9	8,8	10,1	10,2	9,4	6,4	-0,8	-3,1
1987	-6,0	-4,6	-2,7	0,9	0,6	4,1	7,3	8,4	10,4	7,4	2,1	3,1
1988	2,0	-0,8	-0,2	3,5	6,5	8,3	10,0	11,4	8,6	7,1	3,2	-1,0
1989	0,6	0,5	2,5	0,7	8,1	8,8	11,3	11,0	8,2	6,9	4,4	2,5
1990	-1,0	3,3	1,4	0,0	6,9	7,7	10,5		10,0	6,4	1,4	-3,3
1991	-1,5	-2,0	2,3	0,9	3,5	7,2	11,0	12,9	10,4	3,4	1,2	0,6
1992	-2,5	-0,5	0,6	2,2	7,4	6,0	10,3	11,0	7,8	3,1	4,1	0,2
1993	0,3	-2,1	0,3	1,9	5,5	9,2	9,2	10,6	6,5	2,8	1,3	0,8
1994	-3,3	0,4	2,3	0,5	5,8	8,7	12,8	12,1	7,0	5,6	5,4	1,2
1995	-1,9	1,8	0,1	3,0	6,6	7,6	11,5	11,2	6,8	8,5	3,3	-0,1
1996	0,4	-3,7	0,1	3,0	5,1	8,7	10,4	8,7	6,5	4,8	0,9	-0,1
1997	-1,1	1,6	2,0	3,3	6,5	7,9	8,7	12,1	9,6	9,1	4,9	0,4
1998	1,2	-0,1	0,5	0,3	5,7	8,4	9,6	10,0	8,3	4,7	0,0	-0,4

1999	-0,8	-2,7	0,4	2,2	7,3	8,0	10,8	10,4	9,7	5,6	-1,7	-2,2
2000	-3,7	0,6	-3,0	2,2	3,7	8,6	8,0	9,9	8,4	4,7	1,5	0,8
2001	-0,9	-1,7	3,2	0,7	5,6	9,3	9,7	11,6	5,9	7,6	-2,4	-4,0
2002	-0,7	-0,9	0,9	1,8	4,1	9,9	9,6	9,3	7,3	7,3	2,1	1,6
2003	-2,5	-1,8	3,0	3,7	5,6	13,8	12,4	15,7	10,1	5,3	4,2	1,0
2004	-0,4	-1,0	0,9	2,0	5,5	10,4	10,6	12,0	10,0	6,5	0,0	-1,5
2005	-3,4	-6,2	-0,2	2,1	6,5	11,3	11,1	9,9	8,5	7,9	0,2	-5,3
2006	-2,9	-4,0	1,0	2,7	6,7	10,3	13,3	8,7	11,5	9,8	4,5	-0,8

Températures maximales moyennes mensuelles enregistrées dans la station Campan-Artigues (Vallée de l'Adour)

année	janv	fév	mars	avr	mai	juin	juil	aout	sept	oct	nov	déc
1959	5,1	6,7	9,7	11,0	13,1	16,7	21,2	19,0	17,1	13,0	6,8	5,0
1960	4,5	9,0	10,1	10,1	16,4	17,1	16,1	18,9	16,0	11,5	8,9	2,1
1961	3,1	10,0	11,8	12,5	13,8	15,6	18,4	18,4	20,4	13,1	6,6	7,5
1962	5,7	4,0	5,1	9,5	12,1	17,4	19,4	21,2	19,7	14,7	4,1	3,2
1963	2,4	2,1	8,3	9,8	12,3	15,9	18,8	16,4	15,3	14,9	10,2	2,7
1964	3,6	6,5	7,1	9,7	16,8	17,3	21,1	19,5	20,6	11,0	7,5	3,4
1965	3,8	1,6	8,4	7,3	13,6	17,6	17,2	17,8	14,6	14,4	8,9	7,2
1966	8,0	10,4	6,1	11,7	12,7	16,4	16,3	17,2	19,7	12,0	5,3	5,4
1967	6,1	8,5	9,1	8,2	12,8	14,7	20,1	18,0	16,7	15,3	9,1	4,3
1968	5,5	6,0	6,7	11,0	11,2	16,1	19,7	17,2	15,9	17,9	10,9	5,0
1969	7,0	4,1	6,9	9,1	14,0	14,3	20,0	17,8	14,7	14,7	7,8	3,1
1970	7,6	4,9	4,4	8,2	13,4	17,5	18,4	18,6	19,7	12,8	11,9	3,5
1971	6,6	5,7	3,9	11,6	12,5	14,4	19,5	19,0	15,4	14,4	6,1	6,9
1972	3,6	7,3	8,1	7,8	11,0	13,3	17,8	15,7	13,7	13,3	10,0	6,3
1973	4,7	3,2	5,7	8,3	15,2	15,9	17,1	20,3	17,7	12,2	9,5	4,2
1974	8,5	4,1	7,1	7,5	12,8	15,8	17,7	19,1	14,2	6,7	8,4	7,1
1975	8,2	8,6	4,9	9,1	11,7	16,0	20,0	19,1	16,7	12,8	7,0	3,7
1976	4,8	6,6	8,0	8,6	12,2	19,0	19,1	19,4	15,7	12,0	6,8	6,6
1977	5,1	8,7	10,2	9,0	8,8	13,4	14,5	15,2	14,8	13,7	6,1	7,5
1978	3,2	5,1	6,9	6,0	9,9	13,2	16,9	18,1	16,6	11,6	7,0	7,3
1979	4,1	4,7	5,6	4,6	11,0	13,0	16,7	14,6	13,8	11,0	5,6	4,9
1980	2,3	6,1	5,8	6,2	8,7	12,8	16,0	19,4	17,6	11,6	6,6	2,1
1981	3,5	2,4	9,0	8,7	11,0	15,2	15,6	17,2	14,7	11,4	9,7	4,5
1982	5,0	4,2	3,8	7,5	10,8	14,4	17,5	14,2	14,5	8,9	6,0	3,1
1983	4,0	1,7	8,3	9,9	9,8	15,6	20,7	15,9	17,0	12,7	9,2	5,1
1984	2,8	1,0	3,6	9,7	6,6	14,6	20,1	16,3	13,8	13,8	10,5	4,8
1985	-0,5	8,2	3,5	9,2	9,1	13,2	18,2	16,5	18,1	13,4	4,3	6,0
1986	2,4	3,0	5,8	4,1	14,7	16,3	18,4	18,3	17,1	13,0	6,4	2,4
1987	0,1	0,9	4,2	8,5	6,7	11,3	13,4	16,7	18,5	14,2	8,1	8,9
1988	7,7	6,1	7,2	10,2	12,6	15,1	18,1	18,5	16,1	16,1	8,7	2,8
1989	5,1	7,1	9,9	6,7	14,6	15,6	20,0	19,4	14,8	14,1	10,3	9,0
1990	4,5	11,2	8,7	6,9	13,4	14,4	19,0		17,0	13,4	6,9	1,9
1991	3,3	4,9	9,5	8,9	9,8	13,9	18,9	21,5	17,8	10,2	7,4	6,1
1992	3,4	6,5	7,9	10,2	15,5	12,6	18,1	20,1	15,5	7,7	10,4	5,6
1993	6,4	3,9	8,4	8,8	13,9	16,4	16,4	18,8	13,8	9,9	6,8	4,8
1994	2,7	5,8	10,9	5,7	13,5	16,9	21,8	21,3	14,4	11,9	10,8	5,8
1995	5,8	8,4	8,4	10,7	13,7	14,2	19,8	18,4	12,9	15,5	9,4	5,0
1996	6,4	2,8	6,8	9,9	12,5	15,9	18,0	14,8	13,5	11,4	6,1	4,4
1997	3,4	9,0	11,3	11,7	14,3	14,2	15,7	20,1	17,0	16,3	11,4	5,5
1998	6,9	9,9	10,5	8,3	12,6	15,4	17,1	20,0	15,6	11,5	5,5	5,0
1999	4,6	4,3	7,6	10,3	14,7	15,1	18,5	18,0	17,5	12,8	4,4	4,3

2000	2,4	7,9	5,9	9,3	10,8	17,4	17,3	19,4	17,4	12,4	8,9	8,6
2001	5,6	4,8	12,2	9,2	13,6	17,9	17,3	19,5	14,5	16,3	3,2	1,5
2002	5,3	5,9	9,5	9,9	12,4	18,0	17,4	17,2	15,0	15,2	9,7	7,4
2003	4,2	5,4	12,4	12,6	14,2	23,6	21,2	25,6	16,9	12,0	10,7	6,8
2004	6,1	6,0	8,8	8,8	14,4	18,7	18,8	20,1	18,2	15,6	5,7	3,9
2005	3,1	1,2	8,9	11,4	15,2	20,0	19,7	18,5	15,6	16,4	6,5	3,1
2006	2,8	4,2	8,8	11,0	15,5	20,6	23,2	17,6	20,1	18,9	12,2	6,0

Précipitations mensuelles enregistrées dans la station Argelès-Gazost pour la période 1950-1981 et dans la station Ayros-Arbouix pour la période 1981-2006 (Vallée du Gave de Pau)

année	janv	fev	mars	avr	mai	juin	juil	aout	sept	oct	nov	dec
1950	80	131	105	195	50	65	51	94	49	78	88	249
1951	216	117	108	61	190	87	56	80	68	53	100	158
1952	311	157	50	54	23	44	103	29	31	290	97	212
1954	122	143	95	56	185	90	34	53	76	64	57	215
1955	170	66	25	9	40	79	99	42	92	111	34	226
1956	199	33	21	145	149	83	38	94	56	43	120	38
1957	82	81	43	173	136	245	45	61	67	45	68	38
1958	110	43	202	119	86	91	71	30	65	51	102	182
1959	103	3	147	165	93	115	32	81	151	146	75	177
1960	61	37	140	77	99	89	49	42	94	212	119	308
1961	257	98	4	186	78	66	81	47	101	122	143	65
1962	97	160	125	140	175	20	42	31	84	85	164	150
1963	76	52	200	81	65	143	87	198	116	39	118	106
1964	32	105	127	100	99	37	52	82	105	179	52	172
1965	247	47	99	171	98	46	17	57	145	72	129	296
1966	47	147	47	104	152	60	50	27	17	197	202	278
1967	62	10	59	54	39	66	98	37	66	54	181	130
1968	190	45	44	37	183	61	58	55	86	22	84	143
1969	58	45	113	89	52	48	72	35	100	20	42	344
1970	74	135	99	73	104	106	25	29	7	87	55	30
1971	140	229	160	120	109	99	42	61	81	59	186	42
1972	210	120	50	174	82	83	53	107	85	35	43	114
1973	79	183	55	71	44	73	128	86	58	37	102	136
1974	32	154	169	101	54	66	58	84	93	271	185	36
1975	76	15	183	48	147	65	23	84	76	72	217	22
1976	43	81	86	144	91	25	66	63	76	184	93	109
1977	31	55	43	92	211	91	298	134	12	74	108	29
1978	270	100	180	132	197	124	41	27	46	88	27	53
1979	73	108	86	195	120	8	16	94	130	135	103	114
1980	208	47	181	66	151	67	35	51	22	261	125	276
1981		86	93	91	78	39		26	73	105	45	258
1982		119	167	12	71	56	87	102	52	187	98	205
1983	12	76	115	58	40	22		99	5	83	55	82
1984	162	113	74	35	115	79	10	99	126	76	136	93
1985	69	45	117	62	152	54	29	27	1	30	84	82
1986	259	38	51	122	43	40	22	16	94	43	129	144
1987	95	94	95	78	64	50	73	58	38	98	96	18
1988	221	106	142	125	69	91	30	52	72	21	22	72
1989	19	64	54	256	30	8	48	48	63	37	85	43

1990	74	101	31	142	134	108	68	45	37	103	60	154
1991	40	30	106	97	169	64	51	69	135	39	136	42
1992	27	30	91	111	58	200	72	131	65	308	141	105
1993	8	38	32	143	69	93	17	73	187	130	59	178
1994	78	200	23	195	38	57	34	7	88	53	84	159
1995	185	96	79	74	99	71	61	42	91	38	71	134
1996	146	178	84	111	90	58	164	88	67	84	308	100
1997	120	38	12	29	79	89	148	102	37	52	147	181
1998	82	17	109	144	101	53	45	43	151	131	139	75
1999	122	60	59	109	120	53	77	73	103	23	108	157
2000	4	126	73	116	109	144	63	65	38	93	122	51
2001	137	29	101	109	61	45	86	34	19	42	68	25
2002	44	121	34	87	146	102	59	93	70	122	172	235
2003	143	101	67	52	122	50	21	42	166	88	106	147
2004	181	50	87	93	127	14	66	100	35	81	122	116
2005	119	51	35	132	124	39	41	45	107	89	76	89
2006	81	20	114	53	44	88	40	51	105		99	52

Températures minimales moyennes mensuelles enregistrées dans la station Argelès-Gazost pour la période 1950-1981 et dans la station Ayros-Arbouix pour la période 1981-2006 (Vallée du Gave de Pau)

année	janv	fev	mars	avr	mai	juin	juil	aout	sept	noct	nov	dec
1964								13,8	14,4	6,2	2,7	0,0
1965	0,5	-1,1	3,7	6,3	8,9	12,7	13,5	12,7	8,6	6,0	3,2	1,4
1966	-0,4	3,1	0,7	5,3	6,6	10,5	12,1	11,2	9,8	6,7	1,1	1,2
1967	-1,1	-0,3	2,5	3,4	5,9	8,9	13,6	12,2	9,2	7,0	2,1	-2,2
1968	-0,2	1,0	1,6	4,6	6,2	9,8	11,6	11,8	9,4	5,8	3,6	0,6
1969	-0,7	-2,4	2,2	4,1	6,6	8,9	11,0	11,2	8,0	5,0	-1,1	-2,5
1970	0,6	-0,4	-0,7	2,8	6,2	10,2	11,2	11,5	8,5	3,4	3,2	-2,7
1971	-0,7	-0,9	-1,6	4,5	8,0	9,0	12,3	12,5	8,6	5,6	-0,3	-1,0
1972	-0,6	1,9	1,5	4,4	5,9	9,5	11,7	11,1	8,2	4,9	2,0	-0,5
1973	-0,7	-0,8	-1,3	2,5	7,7	10,8	13,1	14,2	9,5	3,9	0,0	0,0
1974	0,1	0,9	1,6	4,2	7,5	9,7	12,5	12,4	9,0	3,2	3,5	-0,1
1975	0,3	0,9	1,9	4,0	6,6	9,6	12,2	13,5	9,6	5,2	1,5	-1,0
1976	-2,6	0,4	0,9	3,5	7,3	10,4	12,7	11,5	8,4	5,5	0,6	-0,2
1977	0,5	2,2	2,6	4,6	6,3	9,4	12,1	10,9	8,2	6,1	0,9	1,2
1978	-1,1	2,5	2,2	3,6	7,0	9,3	11,7	11,6	8,7	4,6	-0,3	2,1
1979	-0,7		2,2	4,2	6,3	11,0	12,7	12,1	10,1	6,6	1,3	0,9
1980	-0,8	1,4	1,7	3,1	7,4	9,5	10,7	12,5	10,7	6,1	1,4	-1,9
1981		-2,2	3,0	3,0	7,0	9,9		13,7	12,5	7,9	3,1	1,6
1982		1,1	3,0	4,2	7,2	12,1	13,7	12,5	11,2	6,4	4,5	1,8
1983	0,6	-0,7	3,5	5,4	7,3	12,9	16,1	14,2	11,6	7,9	6,8	1,9
1984	1,4	0,1	0,4	5,2	5,7	11,3	13,5	12,9	9,8	7,0	6,1	2,7
1985	-3,7	3,8	1,7	5,4	6,4	11,4	14,7	12,6	12,6	9,3	2,3	3,6
1986	1,5	0,6	3,1	3,0	9,0	11,7	12,6	13,4	11,9	9,4	3,2	2,5
1987	-1,2	1,7	3,4	6,9	7,5	10,9	14,2	14,9	14,4	9,2	4,2	3,3
1988	4,1	1,6	2,5	6,6	9,3	11,2	13,3	15,0	10,2	8,2	3,7	0,6
1989	0,0	2,6	5,2	4,1	9,8	11,6	14,7	14,9	10,9	8,6	6,7	5,6
1990	1,4	6,0	4,6	4,9	9,7	12,3	14,0	14,1	12,7	8,7	2,9	-1,6
1991	0,9	0,6	5,0	3,5	5,8	11,6	14,5	16,0	13,2	6,2	4,2	1,2
1992	-1,6	0,7	3,1	5,0	9,8	10,0	13,8	13,0	10,6	7,3	6,0	3,1
1993	1,8	0,0	2,6	4,7	8,5	11,9	12,5	13,1	9,5	6,5	2,1	3,5
1994	1,0	2,6	5,2	3,8	9,0	11,6	15,9	15,7	10,4	9,2	7,0	2,7

1995	1,4	4,0	3,0	4,4	9,1	10,9	15,4	14,1	9,8	10,0	5,0	3,3
1996	4,1	0,3	2,9	5,9	7,8	12,2	13,8	13,0	9,1	8,0	5,0	3,5
1997	3,0	5,2	5,7	7,3	11,3	13,2	14,9	17,1	14,1	11,8	7,1	5,0
1998	4,2	5,0	6,0	6,3	10,7	13,5	15,4	15,5	13,0	8,4	2,3	1,9
1999	1,8	0,5	4,1	5,0	10,8	12,0	14,3	14,9	12,2	8,4	1,9	1,0
2000	-1,0	3,5	3,3	5,6	10,3	12,6	13,2	13,8	12,1	8,5	5,0	5,7
2001	4,1	2,4	7,9	4,7	9,3	11,9	14,2	15,3	10,1	11,4	2,3	-1,1
2002	3,1	3,6	5,8	6,1	8,5	13,6	13,9	13,6	10,9	9,4	5,8	5,3
2003	1,6	1,6	6,4	7,7	9,8	16,6	15,7	18,0	13,1	8,5	6,5	3,6
2004	3,3	2,0	2,7	5,2	8,5	13,7	14,2	15,1	12,6	10,7	3,0	2,8
2005	0,4	-1,5	3,5	6,3	10,8	14,7	15,1	14,1	12,1	10,8	3,8	-0,2
2006	-0,5	-0,6	4,8	6,2	9,9	13,1	15,9	11,3	12,5	11,0	5,9	0,3

Températures maximales moyennes mensuelles enregistrées dans la station Argelès-Gazost pour la période 1950-1981 et dans la station Ayros-Arbouix pour la période 1981-2006 (Vallée du Gave de Pau)

année	janv	fev	mars	avr	mai	juin	juil	aout	sept	oct	nov	dec
1964								25,2	26,7	16,1	13,1	9,5
1965	9,6	9,3	16,0	15,2	19,9	21,8	23,3	23,0	20,1	19,5	14,8	11,7
1966	11,7	16,5	12,2	17,3	18,3	22,4	22,0	23,3	24,7	18,2	9,7	9,7
1967	10,4	13,4	14,8	14,2	19,4	20,8	25,1	23,7	22,1	21,1	13,8	6,6
1968	10,5	12,2	12,2	17,0	17,3	21,0	24,9	23,0	22,0	22,2	15,7	10,0
1969	11,9	9,1	12,7	14,4	19,9	19,9	25,6	23,8	20,4	19,9	14,7	8,0
1970	13,1	10,6	10,3	14,1	18,3	23,2	23,7	24,1	24,8	18,0	17,3	9,1
1971	12,3	10,9	8,7	17,1	18,0	19,7	25,9	24,0	21,9	20,2	9,8	11,8
1972	9,0	12,3	14,1	13,2	16,7	18,5	22,9	22,0	18,0	18,0	14,5	11,7
1973	9,4	8,6	12,3	13,8	20,7	21,4	22,6	25,9	22,7	17,0	14,4	8,5
1974	12,6	10,0	12,8	14,0	18,3	21,8	23,3	24,2	19,4	12,6	13,2	11,6
1975	12,2	13,2	10,7	14,3	17,2	20,8	24,9	25,3	21,5	18,4	12,3	7,4
1976	9,0	11,6	13,7	14,1	18,5	25,4	25,4	24,7	21,0	16,9	11,0	10,6
1977	9,7	13,5	16,1	14,1	15,6	19,9	20,9	20,8	21,0	20,2	13,4	13,8
1978	8,2	11,5	13,8	12,8	16,7	19,9	22,7	22,9	22,4	18,3	14,6	13,2
1979	9,8		12,9	12,8	17,4	20,9	23,8	22,5	21,4	18,4	12,7	10,5
1980	10,8	13,7	12,3	14,0	15,9	19,9	22,0	24,8	23,6	16,9	14,2	8,3
1981		9,0	18,2	18,0	19,3	24,3		24,5	23,3	18,9	16,3	12,7
1982		13,5	13,4	17,5	20,7	24,4	26,7	23,2	24,3	17,7	14,4	9,8
1983	11,4	8,9	14,4	17,0	18,4	24,1	28,1	24,7	26,3	21,4	17,2	13,4
1984	10,6	9,6	10,3	18,6	16,0	22,7	27,4	24,0	21,2	20,5	16,6	11,5
1985	6,5	15,9	11,0	17,5	17,3	21,9	26,1	24,6	27,0	21,8	11,4	14,5
1986	8,8	9,7	13,6	11,3	21,6	22,8	25,2	25,4	23,8	19,7	14,5	12,2
1987	8,2	10,1	13,7	18,2	17,3	21,8	23,5	26,8	26,8	18,8	12,0	13,4
1988	11,6	10,8	11,9	15,8	18,8	21,0	24,4	24,4	20,6	21,0	15,2	9,5
1989	11,5	13,1	16,1	12,8	21,4	23,5	27,5	26,6	22,0	20,1	16,5	15,6
1990	12,1	17,3	15,6	13,9	21,4	21,6	26,5	27,3	23,9	19,4	11,8	7,0
1991	9,4	11,0	14,6	14,2	15,0	21,0	25,4	27,4	24,2	15,5	13,1	11,9
1992	8,2	12,7	12,6	15,8	22,0	18,9	24,7	24,2	22,0	13,4	16,3	11,6
1993	14,6	9,5	14,2	14,4	19,0	22,7	22,6	24,5	20,2	15,0	12,3	11,0
1994	9,5	11,1	15,5	12,2	20,7	23,6	27,6	27,6	20,6	18,7	16,9	12,1
1995	10,2	13,5	13,4	15,4	20,0	21,4	26,5	25,3	19,7	22,2	15,7	10,8
1996	13,3	8,3	13,1	16,1	18,8	22,8	24,3	22,8	19,9	18,7	13,0	11,4
1997	11,4	17,7	19,8	20,7	23,1	23,1	23,7	28,5	26,1	22,8	16,4	13,0
1998	14,3	17,7	17,3	16,7	20,6	23,0	26,0	27,9	23,2	17,7	11,4	10,5

1999	11,3	8,7	13,6	15,9	20,2	21,6	25,0	25,1	23,6	19,7	11,5	9,9
2000	9,4	13,3	13,9	15,0	20,1	22,2	22,9	24,3	23,3	16,9	14,1	14,5
2001	12,4	10,8	17,6	14,0	19,2	22,8	23,6	26,4	20,6	22,6	9,7	8,8
2002	13,4	13,0	15,5	15,5	18,0	23,1	22,6	21,9	21,1	19,3	14,2	12,7
2003	9,0	10,2	17,2	17,1	19,9	28,0	26,5	30,8	22,7	17,3	16,1	11,0
2004	10,9	11,4	11,9	13,9	18,5	25,5	24,9	25,3	23,8	21,2	12,7	9,8
2005	10,1	6,8	15,1	16,4	21,5	27,0	27,4	25,4	22,5	20,6	12,5	8,4
2006	7,7	8,3	14,9	16,2	21,4	25,4	27,9	23,2	24,5	21,6	15,6	10,1

Annexe 3 : Moyennes mensuelles calculées pour les deux vallées étudiées pour une période commune : 1952-2006 pour les précipitations, 1965-2006 pour les températures, avec le coefficient de variation (CV). Les valeurs de CV considérées comme élevées (en rose) sont les valeurs supérieures à la moyenne + l'écart type.

Mois	Vallée de l'Adour					
	pp	CV%pp	Tmin	CV%Tmn	Tmax	CV%Tmx
janv	119.69	65.12	-2.01	99.05	4.67	43.90
fevr	92.73	59.72	-1.85	124.55	5.53	47.09
mars	94.27	53.18	-0.44	492.45	7.61	29.86
avr	110.80	38.52	1.24	115.44	8.86	21.31
mai	116.68	42.14	4.60	39.22	12.31	18.76
juin	94.18	47.23	7.86	22.42	15.71	14.89
juil	79.52	54.29	9.93	14.51	18.27	10.64
aout	85.52	43.79	10.06	16.48	18.31	11.42
sept	93.20	53.03	8.03	20.04	16.07	11.82
oct	108.64	66.27	5.50	37.58	13.13	18.88
nov	123.17	48.78	1.26	173.10	8.00	27.60
dec	132.75	62.11	-1.12	171.78	5.17	36.62

Mois	Vallée du Gave de Pau					
	pp	CV%pp	Tmin	CV%Tmn	Tmax	CV%Tmx
janv	113.13	67.66	0.61	306.46	10.65	17.35
fevr	83.74	63.16	1.29	151.65	11.66	23.04
mars	90.19	56.96	2.95	67.79	13.91	16.42
avr	103.79	48.73	4.80	26.40	15.30	12.80
mai	100.14	46.85	8.08	20.01	19.01	10.02
juin	73.09	58.64	11.37	14.86	22.32	9.19
juil	61.96	74.83	13.52	10.60	24.78	7.43
aout	63.80	54.29	13.45	12.60	24.76	7.86
sept	77.03	54.92	10.65	16.67	22.47	9.27
oct	98.23	72.74	7.49	29.12	19.01	12.17
nov	107.35	49.82	3.32	66.05	13.89	15.19
dec	130.21	63.63	1.41	156.88	10.94	19.19

Annexe 4 : Années extrêmes selon les données climatiques annuelles moyennes. En vert, les paramètres climatiques ayant des valeurs extrêmes élevées et en orange, des valeurs extrêmes basses.

Vallée de l'Adour

année	pp	Tmin	Tmax	Tmoy
1961	22	40	46	44
1967	6	27	39	35
1970	4	21	34	26
1971	52	17	25	21
1974	43	1	15	8
1976	34	4	30	14
1978	39	3	7	6
1979	54	9	1	2
1980	48	7	4	4
1982	50	2	2	1
1983	2	26	17	22
1984	49	16	5	7
1985	5	5	6	5
1987	8	8	3	3
1989	3	47	44	45
1992	51	35	22	31
1994	23	44	36	42
1995	1	42	37	43
1997	11	46	45	46
2002	53	39	38	38
2003	42	48	48	48
2006	15	45	47	47

Vallée du Gave de Pau

année	pp	Tmin	Tmax	Tmoy
1952	53			
1965	54	18	16	17
1969	18	1	10	1
1970	6	2	21	8
1971	51	3	11	4
1972	35	6	1	2
1973	24	5	5	3
1974	48	11	2	5
1976	26	4	12	9
1978	45	9	4	7
1979	38	16	8	13
1980	56	8	3	6
1983	1	28	39	39
1985	3	20	32	25
1989	5	39	42	40
1992	52	21	13	18
1996	55	25	14	21
1997	22	43	43	43
1998	30	41	41	41
2001	4	35	23	28
2002	44	40	28	37
2003	31	42	40	42
2006	2	33	34	34

Annexe 5 : Bilan des résultats significatifs concernant les analyses de l'effet de la compétition sur la croissance en diamètre.

Unité d'analyse	Variable étudiée	Facteur
Résultats avant éclaircie		
Comparaisons à l'échelle de la parcelle		
Parcelles	C - acc5	parcelle
Effet de voisinage		
Parcelle B6	Acc5	Sd2/300 m^2
	Acc5 + Acc10 + dbh	Sd2/ 50 et 70 m^2
Parcelle M2	Acc5	Sd2/ 300 m^2
Parcelle Pr1	Dbh	Sd2/70 m^2
Influence de la dimension initiale		
Parcelle B6	Résidu acc5-sd2/100 m^2	Dimension initiale
Parcelle M2	Résidu acc5-sd2/50,70, 100 m^2	Dimension initiale
Parcelle Pr1	Résidu acc5-sd2/50,70, 100, 300 m^2	Dimension initiale
Parcelle Pr1	Résidu acc10-sd2/50,70, 100, 300 m^2	Dimension initiale
Résultats après éclaircie		
Effet modalité global		
Toutes parcelles	Acc. Moyen	EF/TEF toutes années
Effet modalité par parcelle et par année		
Parcelle M2	Acc. Moyen toutes années ou par année	D / TD
Parcelle M2	Acc. Moyen toutes années ou par année	EF / TEF
Parcelle Pr1	Acc. Moyen toutes années ou par année	EF / TEF
Effet année par parcelle et par modalité		
Parcelle B6/EF	Acc. moyen	année
Parcelle M2 /EF	Acc. moyen	année
Parcelle Pr1/EF	Acc. moyen	année
Effet parcelle par modalité et par année		
Placettes EF	Acc. Moyen	Parcelle
Effet du voisinage		
Parcelle M2	Acc.3 ans et total	Sd2 après/50,70 et 100 m^2
Parcelle M2	Acc.2 ans	Sd2 après/50 m^2
Parcelle M2	Acc.1 an	Sd2 enlevés/70 m^2
Parcelle Pr1	Acc1	Sd2 avant /50 m^2
Parcelle Pr1	Acc1	Sd2 enlevés/50 m^2

Effet dbh initial		
Parcelle M2 /EF	Résidus acc 1an-sd2 enlevé /70m^2	Dbh initial
Parcelle M2 /EF	Résidus acc 2ans-sd2 après/50m^2	Dbh initial
Parcelle M2 /EF	Résidus acc 3ans-sd2/50, 70,100m^2 après	Dbh intial
Parcelle M2 /EF	Résidus acc total-sd2 après/50, 70,100m^2	Dbh intial
Parcelle Pr1/EF	Résidus acc 1an-sd2 après/70m^2	Dbh intial
Parcelle Pr1/EF	Résidus acc 1an-sd2 avant/50m^2	Dbh intial
Parcelle Pr1/EF	Résidus acc 1an-sd2 enlevé/50m^2	Dbh intial
Parcelle B6/EF ou tout	Acc. 1 an et 2 ans	Dbh initial
Parcelle M2/EF et tout	Acc 1, 2 et 3 ans	Dbh initial
Parcelle Pr1/EF et tout	Acc. 1 an et 2 ans	Dbh initial
Effet croissance passée		
Parcelle B6/EF	Classements Acc. 2 ans	Classements Acc 10 ans avant écl.
Parcelle M2 /EF	Classements Acc. 1 an	Classements Acc 10 ans avant écl.
Parcelle Pr1/EF	Classements Acc. 1 an	Classements Acc 10 ans avant écl.

Résumé :

Le changement des pratiques agricoles et surtout pastorales dans les Pyrénées Centrales a entraîné une colonisation des terres par le frêne (*Fraxinus excelsior* L.) en constituant des peuplements denses et fréquents dans le paysage pyrénéen. Ce travail est centré sur l'étude de la répartition actuelle et future de ces peuplements qu'on appelle « des accrus » et sur leur potentialité de croissance en relation avec les facteurs qui peuvent être limitants dans la perspective d'une valorisation économique de ces accrus. L'étude de la croissance a été réalisée à trois niveaux : la croissance en hauteur en fonction de la fertilité, et la croissance en diamètre en fonction du climat et de la compétition. Pour ce dernier facteur, la croissance a été étudiée sur des peuplements en place (sans intervention) et suites à deux modalités d'éclaircie. La détection des accrus de frêne au stade perchis avec les outils de télédétection n'est pas réalisable et nécessiterait d'importants investissements et adaptations pour devenir utilisables. La présence des accrus de frêne est surtout modulée par la topographie et l'utilisation du sol. En ce qui concerne la croissance en diamètre de ces accrus, elle est modulée par la vigueur des arbres, la compétition et le climat. Ce sont surtout les températures maximales d'avril et les températures minimales de septembre ou d'août qui influencent la croissance en surface de cerne. Le frêne réagit dès la première année à l'éclaircie, d'autant plus fortement et durablement que le peuplement est plus jeune. L'effet de la nutrition minérale sur la classification des accrus étudiés, selon leur croissance en hauteur, n'est pas évident.
L'ensemble des résultats obtenus dans ce travail constitue un outil pour aider à gérer les accrus de frêne dans la zone étudiée surtout dans un objectif économique.

Mots-clés :

Fraxinus excelsior, accrus, croissance, répartition, facteur limitant, éclaircie sylvicole, cartographie, climat, nutrition minérale, compétition, Pyrénées Centrales.