



HAL
open science

Caractérisation des fructifications des chênaies et hêtraies du réseau RENECOFOR

Hilaire Martin

► **To cite this version:**

Hilaire Martin. Caractérisation des fructifications des chênaies et hêtraies du réseau RENECOFOR. Sciences de l'environnement. 2009. hal-02592566

HAL Id: hal-02592566

<https://hal.inrae.fr/hal-02592566>

Submitted on 15 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

ÉCOLE PRATIQUE DES HAUTES ÉTUDES

Sciences de la Vie et de la Terre

MÉMOIRE

présenté

par **Hilaire MARTIN**

pour l'obtention du Diplôme de l'École Pratique des Hautes Études

**CARACTÉRISATION DES FRUCTIFICATIONS
DES CHÊNAIES ET HÊTRAIES
DU RÉSEAU RENECOFOR**

soutenu le 18 novembre 2009, à Paris, devant le jury suivant :

DELESALLE Bruno : Maître de Conférences, EPHE, Perpignan.....Président
GUILLAUME Claude – Pierre: Maître de Conférences, EPHE, Montpellier.....Rapporteur
LEBOURGEOIS François : Maître de Conférences, AgroParisTech, Nancy.....Examineur
ULRICH Erwin : Responsable du réseau RENECOFOR, ONF, FontainebleauTuteur scientifique
CARCAILLET Christopher : Directeur d'études, EPHE, Montpellier.....Tuteur pédagogique

Mémoire préparé sous la direction de :

ULRICH Erwin : Responsable du réseau RENECOFOR
Office National des Forêts, DT-Recherche, boulevard de Constance, BP 77300, Fontainebleau
Courriel : erwin.ulrich@onf.fr

avec le tutorat pédagogique de :

CARCAILLET Christopher : Directeur d'études EPHE et Directeur du Centre de Bio-Archéologie et d'Écologie
UMR 5059 - CNRS/Université Montpellier 2, 163, rue A. Broussonet, 34 090 Montpellier
Courriel : christopher.carcaillet@univ-montp2.fr

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

ÉCOLE PRATIQUE DES HAUTES ÉTUDES

Sciences de la Vie et de la Terre

MÉMOIRE

présenté

par **Hilaire MARTIN**

pour l'obtention du Diplôme de l'École Pratique des Hautes Études

**CARACTÉRISATION DES FRUCTIFICATIONS
DES CHÊNAIES ET HÊTRAIES
DU RÉSEAU RENECOFOR**

soutenu le 18 novembre 2009, à Paris, devant le jury suivant :

DELESALLE Bruno : Maître de Conférences, EPHE, Perpignan.....Président
GUILLAUME Claude – Pierre: Maître de Conférences, EPHE, Montpellier.....Rapporteur
LEBOURGEOIS François : Maître de Conférences, AgroParisTech, Nancy.....Examineur
ULRICH Erwin : Responsable du réseau RENECOFOR, ONF, FontainebleauTuteur scientifique
CARCAILLET Christopher : Directeur d'études, EPHE, Montpellier.....Tuteur pédagogique

Mémoire préparé sous la direction de :

ULRICH Erwin : Responsable du réseau RENECOFOR
Office National des Forêts, DT-Recherche, boulevard de Constance, BP 77300, Fontainebleau
Courriel : erwin.ulrich@onf.fr

avec le tutorat pédagogique de :

CARCAILLET Christopher : Directeur d'études EPHE et Directeur du Centre de Bio-Archéologie et d'Écologie
UMR 5059 - CNRS/Université Montpellier 2, 163, rue A. Broussonet, 34 090 Montpellier
Courriel : christopher.carcaillet@univ-montp2.fr

CARACTÉRISATION DES FRUCTIFICATIONS DES CHÊNAIES ET HÊTRAIES DU RÉSEAU RENECOFOR

ORGANISMES IMPLIQUÉS

Encadrement scientifique



École Pratique des Hautes
Études



Office National des Forêts



Cemagref - UR EFNO

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu, les responsables et suppléants des placettes du réseau RENECOFOR ainsi que les techniciens des sections techniques interrégionales et des directions « forêts » de l'Office National des Forêts, pour le considérable travail de collecte et de tri des données.

Je porte toute ma reconnaissance à mon tuteur scientifique Mr Erwin Ulrich pour l'assurance qu'il m'a témoignée en me confiant cette étude, ainsi qu'à l'équipe du réseau RENECOFOR pour leur aide et leur soutien : Messieurs Luc Croisé, Sébastien Cecchini et Marc Lanier.

J'adresse également toute ma gratitude aux divers enseignants-chercheurs de l'EPHE que j'ai rencontrés durant la préparation de ce diplôme ainsi qu'à mon tuteur pédagogique Mr Christopher CARCAILLET.

Je remercie Mr Frédéric ARCHAUX pour son appui, ses conseils, son encadrement lors des analyses et ses relectures ainsi que l'ensemble du personnel du Cemagref de Nogent sur Vernisson.

L'ensemble de ce travail a vu le jour grâce à l'aide de Mademoiselle Sophie Cornu, Messieurs Alain Brêthes (ONF), Joël Conche (ONF), François Morneau (IFN) et Loïc Nicolas (ONF).

Enfin, je remercie ma famille sans qui ce travail n'aurait pu être possible.

RÉSUMÉ

Du panage des porcs en forêt durant le Moyen Âge jusqu'à la prise en compte à la fin du XVIII^{ème} siècle pour la régénération naturelle des peuplements forestiers, les fructifications ont joué un rôle important dans l'environnement de l'homme. Si de nos jours l'engraissement du bétail en forêt n'est plus d'actualité ; le renouvellement des forêts gérées est quant à lui toujours de rigueur. Ainsi, la compréhension des variations des fructifications s'avère nécessaire pour le gestionnaire forestier.

Cette étude tente de décrire et d'expliquer les variations des fructifications de trois espèces majeures en France que sont le hêtre, le chêne sessile et le chêne pédonculé. Ce travail s'appuie sur les placettes du réseau RENECOFOR sur une période de 10 ans, de 1995 à 2004. De nombreuses mesures sont effectuées avec entre autres le comptage et la pesée des fruits récoltés à l'échelle de la placette. Ces informations constituent les données de base de cette étude.

Les analyses sont d'abord effectuées sur les moyennes décennales puis sur les variations interannuelles pour trois variables à expliquer : nombre de fruits/ha, poids/ha et poids unitaire. Deux méthodes statistiques sont utilisées : les sélections automatiques de variables (stepAIC) pour les moyennes décennales et les modèles linéaires mixtes avec auto-corrélation temporelle pour les variations interannuelles.

Un résultat intéressant concerne l'absence de différence pour le poids/ha aussi bien entre les deux espèces de chêne qu'entre les genres *Fagus* et *Quercus*. Pour le chêne sessile, le nombre de fruits/ha, le poids/ha et le poids unitaire sont expliqués par la terre fine, la richesse chimique du sol et des hivers cléments. Pour le hêtre, il apparaît que la production de faînes décroît fortement d'Ouest en Est et augmente avec la surface du houppier sans que les variables climatiques, géologiques ou pédologiques sous-jacentes à cette distribution soient identifiées.

Concernant les variations interannuelles, la phénologie se révèle comme une variable explicative pertinente. Pour le chêne sessile, on constate l'importance des glandées des années antérieures ainsi que l'impact négatif de la sécheresse estivale de l'année précédente et le rôle stimulant de la saison de végétation de l'année de la fructification. Pour le hêtre, le caractère biennal est confirmé par l'influence des fructifications précédentes, l'effet inhibiteur de la sécheresse estivale de l'année antérieure et la date de début de débourrement de l'année de la faînée.

Les résultats sont concluants pour le hêtre et sont plus discutables pour les chênes en raison de la période d'étude trop courte et du nombre de placettes trop faible.

Ces conclusions sont discutées aux regards des contraintes de la période d'étude et des difficultés de la modélisation liées aux valeurs manquantes et aux arrières-effets.

Mots clés : fructification, gland, faîne, chêne, hêtre, forêt.

Sommaire

REMERCIEMENTS	1
RÉSUMÉ	2
Liste des tables	4
Liste des figures	5
Liste des annexes	6
1. INTRODUCTION	8
2. MATÉRIELS ET MÉTHODES	12
2.1 Le réseau RENECOFOR	12
2.2 Protocoles de mesures et descriptions des variables	13
2.2.1 Variables à expliquer	13
2.2.1.1 Période d'étude	14
2.2.1.1 Sélection des données	14
2.2.2. Variables explicatives	17
2.2.2.1 Variables stationnelles	17
2.2.2.2 Variables édaphiques	18
2.2.2.3 Variables phénologiques	21
2.2.2.4 Variables dendrométriques	23
2.2.2.5 Variables météorologiques	25
2.2.2.6 Variables bioclimatiques	26
2.3. Choix des variables indépendantes	27
2.3.1 Démarche bibliographique	27
2.3.4 Démarche exploratoire	30
2.4. Méthodes d'analyses	30
3. RESULTATS	33
3.1 Caractérisation des variables à expliquer	33
3.2 Corrélation entre variables explicatives	36
3.3 Analyse des moyennes décennales des fructifications	39
3.4 Analyse des fructifications annuelles	45
3.4.1 Normalisation des variables à expliquer	45
3.4.2 Résultats des modèles linéaires pour les fructifications annuelles	46
3.4.2.1 Chêne pédonculé et sessile	46

3.4.2.2 Chêne sessile, nombre de fruits/ha	48
3.4.2.3 Chêne sessile, poids/ha	53
3.4.2.4 Chêne sessile, poids unitaire	53
3.4.2.5 Hêtre, nombre de fruits/ha	53
3.4.2.6 Hêtre, poids/ha	54
3.4.2.7 Hêtre, poids unitaire	54
4. DISCUSSION	56
4.1 Niveau moyen des fructifications	56
4.2 Fructifications annuelles	57
5. CONCLUSION	62
BIBLIOGRAPHIE	64
ANNEXES	69

Liste des tables

Tableau 1: Description des variables stationnelles	17
Tableau 2: Description des variables édaphiques	19
Tableau 3: Description des variables phénologiques	21
Tableau 4: Description des variables météorologiques	25
Tableau 5 : Liste des variables recensées dans la bibliographie	29
Tableau 6 : Résultats des tests de Shapiro-Wilk vérifiant la normalité des variables à expliquer	33
Tableau 7 : Coordonnées des variables sur les 3 premiers axes pour les deux chênes	37
Tableau 8 : Comparaison des modèles avec les différentes approches de sélection de variables explicatives (moyennes décennales de 1995-2004)	40
Tableau 9 : Normalisation des variables à expliquer	45
Tableau 10 : Modèles des fructifications annuelles pour le chêne sessile et le hêtre (période 1995-2004)	54

Liste des figures

Figure 1 : Moyennes annuelles (1995-2004) des variables centrées réduites, en A : nombre de fruits/ha, B : poids/ha et C : poids unitaire.....	16
Figure 2 : Distribution altitudinale des placettes par essence.....	18
Figure 3 : Distribution des valeurs du réservoir utilisable maximal en mm/m, par essence.....	20
Figure 4 : Distributions des moyennes des variables phénologiques (1997-2004).....	22
Figure 5 : Variables dendrométriques mesurées en 1995 des placettes RENECOFOR.....	24
Figure 6 : Distance (km) entre les placettes Météo France et les placettes RENECOFOR.....	25
Figure 7 : Modèle général de fructification, d'après Sork (1993).....	31
Figure 8 : Distribution des moyennes de nombre de fruits/ha des placettes des deux chênes.....	34
Figure 9 : Distribution des moyennes de masse de fruits/ha des placettes par essence.....	35
Figure 10 : Distribution des moyennes de poids unitaire (g) de fruit des placettes des deux chênes..	36
Figure 11 : Cercle des corrélations des variables explicatives des chênes.....	38
Figure 12 : Détail de l'Anova de type III pour le modèle de poids/ha des deux chênes.....	41
Figure 13 : Nuage de points de la moyenne décennale de poids/ha de glands en fonction du stock de terre fine chez le chêne sessile.....	42
Figure 14 : Détail de l'Anova de type III pour le modèle de poids/ha des deux chênes. PPTT40 et Nb3nov.....	42
Figure 15 : Détail du modèle de poids/ha des deux chênes. PPTT40 et Nb3nov.....	43
Figure 16 : Droite de Henri des résidus du modèle final pour la moyenne décennale de poids/ha de gland pour le chêne sessile (A), et corrélation entre les deux variables (B).....	43
Figure 17 : Détail des variables prises individuellement du modèle de poids/ha des deux chênes. PPTT40 et Nb3nov.....	44
Figure 18 : Graphes d'auto corrélation temporelle. L'auto corrélation est caractérisée par le franchissement de l'intervalle de confiance (en pointillé) par les barres illustrant les rythmes des fructifications (flèche rouge).....	47
Figure 19 : Détail du modèle du nombre de fruits pour le chêne sessile.....	51
Figure 20 : Caractéristiques du modèle du nombre de fruits/ha (logarithme du nombre de fruit/m ²) du chêne sessile : en (A) auto corrélation temporelle initiale, en (B) auto corrélation temporelle finale, en (C) distribution des résidus en fonction des valeurs prédites.....	52

Liste des annexes

Annexe 1 : La peinture du « mois de novembre » extraite du chef-d'œuvre des frères Limbourg.	69
Annexe 2 : Carte de répartition et de niveau de mesure des placettes de chênes et de hêtre.	70
Annexe 3 : liste initiale des variables dépendantes et indépendantes.....	71
Annexe 4 : Données de fructification.....	74
Annexe 5: Variables explicatives.....	85
Annexe 6 : Distances des placettes Météo France les plus proches des placettes RENECOFOR.	91
Annexe 7 : Résultats ACP (coordonnées sur les axes, graphiques et matrices de corrélation).....	95
Annexe 8 : Corrélations entre les variables des modèles calculés sur les moyennes décennales des variables explicatives.	101
Annexe 9 : Résultats des tests de Shapiro-Wilk vérifiant la normalité des variables à expliquer.....	117
Annexe 10 : Détails des modèles linéaires mixtes des fructifications annuelles.	122

INTRODUCTION

1. INTRODUCTION

Il est toujours surprenant en automne de marcher en forêt sur des sols jonchés de graines. Dans le monde forestier les chroniques à ce sujet sont nombreuses (KELLY et SORK, 2002) et l'importance des fructifications est d'ailleurs connue depuis fort longtemps, comme en témoigne la peinture des frères Limbourg datant du XV^{ème} siècle (annexe 1). Cette enluminure du mois de novembre retrace le battage d'une glandée pour l'engraissement des porcs (PICARD, 1995; KOENIG et KNOPS, 2005). Cette activité s'est maintenue du Moyen Âge jusqu'à l'arrivée de la pomme de terre vers 1750 où elle a fait place à l'engraissement du bétail à l'étable (SCHÜTZ, 1990). En Europe du Nord, vers la fin du XVIII^{ème} siècle, les premiers principes de la sylviculture prennent en compte les fructifications en préconisant le renouvellement des peuplements forestiers par voie de régénération naturelle (SCHÜTZ, 1990). Ce mode de renouvellement est d'ailleurs toujours d'actualité en France, puisqu'il répond, entre autres, aux objectifs de production, de respect du patrimoine génétique, et du maintien de la biodiversité (JARRET, 2004).

Au regard de la littérature scientifique, les fructifications se définissent par une production massive et intermittente de graines à l'échelle d'une population de plantes (NILSSON et WÄSTLJUNG, 1987; SORK et BRAMBLE, 1993; KELLY, 1994; PIOVESAN et ADAMS, 2001; SATAKE et IWASA, 2002a, 2002b; LIEBHOLD, *et al.*, 2004; MONKS et KELLY, 2006). Ces variations de production concernent principalement les plantes à longue durée de vie pouvant supporter des années de fructification faibles voire nulles. Les arbres sur l'ensemble de la biosphère ainsi que quelques espèces de graminées de l'hémisphère sud illustrent parfaitement bien ce phénomène (KELLY, 1994).

Différents types de production de graine sont décrits par la communauté scientifique (SORK et BRAMBLE, 1993; SORK, *et al.*, 1993a; GREENBER et PARRESOL, 2000; SATAKE et IWASA, 2002a; SCHAUBER, *et al.*, 2002; IWASA et SATAKE, 2004; LIEBHOLD, *et al.*, 2004; SUZUKI, *et al.*, 2005). Les *fructifications strictes* sont par exemple, définies par des années sans aucune fructification et des années avec des fructifications très importantes ; c'est le cas par exemple des plantes ne fructifiant qu'après un événement spécifique tel que les incendies. Ce système s'oppose à des *fructifications régulières* initiées indépendamment des facteurs externes ou internes. Entre ces deux extrêmes existe une stratégie intermédiaire ; les *fructifications normales* caractérisées par des végétaux élaborant des graines en quantité variable (par exemple les genres *Fagus* et *Quercus*) (KELLY, 1994).

Diverses hypothèses tentent de caractériser ces alternances. Concernant les niveaux de production, une des plus anciennes considère que les ressources trophiques du milieu expliquent principalement les rythmes de production de graines. Des fertilisations artificielles des sols menées en France par l'Institut National de la Recherche Agronomique, INRA (GARBAYE et LEROY, 1974; LE TACON et OSWALD, 1977), et le Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et forêts, Cemagref, illustrent en partie cette hypothèse puisqu'ils montrent un impact positif sur les

fructifications du hêtre et des chênes (PHILIPPE, 1989; PHILIPPE et CONCHE, 2006). Ces enrichissements se composent d'azote, de phosphore, de potassium, de calcium et de magnésium.

Pour les variations interannuelles, l'orchestration des fructifications par les conditions météorologiques est également une thèse très répandue (KOENIG et KNOPS, 2002; LUSK, *et al.*, 2007). Des travaux menés dans l'état du Missouri pour trois espèces affiliées aux groupes des chênes blancs et rouges (*Quercus alba*, *Q. rubra*, et *Q. velutina*), montrent qu'une bonne année de fructification pour un individu, l'est généralement pour l'ensemble de l'espèce (SORK et BRAMBLE, 1993). Les conclusions soulignent que les trois espèces se comportent de la même manière les « mauvaises » années et se désynchronisent dans l'élaboration de leurs glandées. Les températures printanières semblent peser pour ces trois espèces notamment les quinze derniers jours d'avril et la première semaine de mai. On retrouve ce constat dans d'autres publications aussi bien pour les groupes des chênes rouges et blancs (AUCHMOODY, *et al.*, 1993; LUSK, *et al.*, 2007) que pour le hêtre (MATTHEWS, 1955; WACHTER, 1964; SUZUKI, *et al.*, 2005). Pour les chênes sessile et pédonculé apparentés au groupe des chênes blancs, les pluies peuvent également compromettre toute fécondation en précipitant le pollen au sol (BONNET-MASIMBERT, 1984).

L'hypothèse de la balance des ressources propose un modèle fondé sur les dynamiques internes allouant l'énergie soit à la croissance, soit à la reproduction (NILSSON et WÄSTLJUNG, 1987; SORK et BRAMBLE, 1993; KELLY, 1994). Des chercheurs japonais illustrent ce postulat sur *Fagus crenata*, B en supposant que chaque arbre accumule les produits annuels de la photosynthèse et initie ses fleurs quand les réserves énergétiques excèdent un seuil (SATAKE et IWASA, 2002a, 2002b). Cette explication sous-tend un rythme biennal que l'on retrouve aussi chez *Fagus sylvatica*, L (HILTON et PACKHAM, 2003; SUZUKI, *et al.*, 2005; YASUMURA, *et al.*, 2006). En revanche chez ce dernier les faînéés sembleraient être contraintes par les ressources de l'arbre, elles-mêmes conditionnées par des facteurs externes telles que les conditions climatiques (OSWALD, 1984).

Plusieurs paramètres peuvent chronologiquement caractériser les alternances de fructifications. Ainsi, pour le hêtre, un été doux et humide à l'année $n-2$ permet l'accumulation des glucides. Une sécheresse estivale à l'année $n-1$ libère ces sucres vers l'initiation florale, ce qui conduit à une bonne fructification à l'année n (PIOVESAN et ADAMS, 2001).

L'effet « Moran » et le couplage pollinique sont généralement deux *scenarii* souvent reliés (SORK, *et al.*, 1993a; KELLY, *et al.*, 2001; SATAKE et IWASA, 2002a, 2002b). Le premier se définit comme une synchronisation initiée par un facteur extérieur commun et des cycles de reproduction de populations isolées ayant une écophysiologie commune. Le second quant à lui, traduit un phénomène local lié à la dépendance d'un arbre au pollen de ses voisins de la même espèce (KOENIG, *et al.*, 1999; SATAKE et IWASA, 2002a; LIEBHOLD, *et al.*, 2004).

Enfin, du point de vue de l'évolution, la satiété des granivores formulée par Janzen en 1971, est un point de vue important dans l'explication des alternances. Il établit que les années « fortes » sont une adaptation de pérennisation de l'espèce, par assouvissement des prédateurs (PERRINS, 1966; NILSSON et WÄSTLJUNG, 1987; KELLY, 1994; HANSSON, 1998; SATO, 2000; PIOVESAN et

ADAMS, 2001; KELLY et SORK, 2002; SCHAUBER, *et al.*, 2002; SELAS, 2003; KOENIG et KNOPS, 2005). Ce postulat sous-tend que les années « faibles » affament ces derniers. Des travaux suédois sur le hêtre montrent que cela ne peut s'appliquer qu'aux granivores strictement inféodés à l'espèce hôte et que les années fastes correspondent en plus, à un re-stockage énergétique (NILSSON et WÄSTLJUNG, 1987).

En parallèle de la recherche fondamentale sur une meilleure compréhension des variations des fructifications, des outils prédictifs ont été élaborés afin de permettre aux gestionnaires de milieux naturels d'estimer les quantités de fructifications. Certains de ces outils reposent sur des modèles construits à partir de techniques de piégeages de graines, mises en relation avec des paramètres météorologiques et dendrométriques (TESSIER du CROS, *et al.*, 1981; OSWALD, 1984; AUCHMOODY, *et al.*, 1993; DEY, 1995). D'autres utilitaires se basant sur des comptages visuels de fruits ou de fleurs effectués sur des individus isolés, proposent des estimations de production de fruits (KOENIG, *et al.*, 1994; PICARD, 1995; GARRISON, *et al.*, 1998). Le comptage des fleurs n'est d'ailleurs pas un indice pertinent aux regards de la prédation par l'entomofaune (CONNOR, *et al.*, 1976; ROUGON, *et al.*, 1995). Les meilleurs résultats pour cette technique sont obtenus sur des milieux forestiers semi-ouverts de Californie permettant une bonne visualisation des houppiers (KOENIG, *et al.*, 1994; GARRISON, *et al.*, 1998). En revanche pour des peuplements denses et hauts, le comptage s'avère difficile et d'autres paramètres sont alors nécessaires pour évaluer l'abondance d'une glandée (PICARD, 1995).

De nombreuses hypothèses tentent d'expliquer les rythmes des fructifications chez les espèces ligneuses. Au regard de la bibliographie, ces phénomènes sont expliqués par des combinaisons de facteurs externes et internes prenant en compte le réchauffement climatique. Le dernier rapport de synthèse du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, GIEC, montre entre autres pour l'Europe du Nord un caractère hâtif des phénomènes printaniers ainsi qu'une augmentation des températures moyennes (GIEC, 2007). A ce titre, il est judicieux de s'interroger de l'impact de ces changements sur les fructifications des peuplements forestiers. L'objectif de cette étude est donc, de comprendre le déterminisme interne, climatique et stationnel de trois essences majeures en France que sont les chênes (sessile et pédonculé) et le hêtre. Les placettes du réseau RENECOFOR, où un suivi de la fructification a lieu depuis 1993, constituent l'ensemble des données de ce travail. Les hypothèses sous-jacentes concernent à la fois la production et les variations interannuelles des fructifications. On pourrait penser dans un premier temps que les conditions du milieu influent sur les fructifications. On pourrait s'attendre par la suite à des arrières-effets à la fois des productions précédentes et des conditions météorologiques antérieures sur les variations interannuelles des fructifications. Ces rythmes pourraient être expliqués en partie par la phénologie : marqueur sensible des effets du réchauffement climatiques (LEBOURGEOIS, *et al.*, 2008). Enfin, l'ensemble de ces paramètres pourrait souligner le caractère biennal des fructifications chez le hêtre.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Le réseau RENECOFOR

Le Réseau National de suivi à long terme des Ecosystèmes Forestiers (RENECOFOR) a été créé en 1992 par l'Office National des Forêts et avait comme vocation de compléter deux réseaux précédemment installés pour suivre l'état sanitaire des forêts. Le premier réseau des « correspondants observateurs » installé en 1989 et piloté par le Département de la Santé des Forêts vise à surveiller l'état phytosanitaire des forêts. Le deuxième réseau « européen » également mis en place en 1989 se concentre sur une surveillance du degré de défoliation ou de coloration anormale des placettes permanentes.

L'objectif du réseau RENECOFOR est de suivre pendant une durée d'au moins 30 ans l'état sanitaire des forêts françaises, tout en mesurant de nombreux paramètres écologiques pouvant être considérés comme facteur explicatif de l'état des écosystèmes forestiers (PASQUET, 2002)

Ce réseau comporte 102 placettes permanentes, majoritairement installées en futaie régulière afin d'éviter de trop grandes disparités entre les peuplements forestiers. Les 10 principales essences forestières (chêne pédonculé et sessile, hêtre, épicéa, douglas, mélèze, pin laricio, pin maritime, pin sylvestre et sapin pectiné) sont représentées dans différentes régions forestières en fonction de leur répartition naturelle. La gestion forestière continue à s'exercer normalement par le jeu des éclaircies, afin de réduire la concurrence entre les arbres et de maintenir un couvert fermé (CLUZEAU, *et al.*, 1998).

RENECOFOR comprenait jusqu'à fin 2007, différentes intensités de mesure, à savoir :

- 102 placettes mesurées en niveau 1, avec un suivi minimum ;
- 27 des 102 placettes, de niveau 2 sont caractérisées par des mesures supplémentaires de dépôts atmosphériques totaux (sous-réseau CATAENAT) ;
- 17 des 27 placettes, de niveau 3, où sont en plus, mesurées les solutions de sol à 20 et 70 cm de profondeur.

La numérotation des placettes se compose d'une part de deux ou trois lettres majuscules faisant référence au nom vernaculaire de l'essence, et d'autre part du numéro de département concerné.

Les lettres « a » et « b » figurent à la suite du numéro départemental quand deux placettes de même essence sont implantées dans le même département.

Ainsi pour la présente étude, les abréviations signifient respectivement : CHP pour le chêne

pédonculé, CHS pour le chêne sessile (dont 2 placettes de mélanges de chênes sessiles et pédonculés), HET pour le hêtre (dont deux placettes localisées au Luxembourg).

Sur chaque placette de deux hectares, une zone centrale d'un demi hectare est clôturée, afin de protéger les installations contre le vandalisme, les dégâts par les grands herbivores et limiter le piétinement. L'ensemble des mesures et observations sont effectuées à la fois sur la zone centrale et la zone tampon. Les cartes de l'annexe 2 présentent la localisation ainsi que le niveau de mesure des 52 placettes de cette étude.

Sur les placettes les fruits sont collectés pour déterminer la masse et le nombre produits, ainsi que divers paramètres explicatifs, à savoir : les conditions stationnelles locales, les facteurs du sol, la défoliation, l'aspect phytosanitaire, la phénologie, la dendrométrie et la météorologie.

Les 59 variables sont listées en annexe 3.

2.2 Protocoles de mesures et descriptions des variables

2.2.1 Variables à expliquer

L'ensemble des informations présentées dans ce chapitre fait référence au manuel n°5 du réseau RENECOFOR (ULRICH, *et al.*, 1997). Sur la zone centrale de la placette, 10 collecteurs d'une surface de 0,5 m² chacun, sont répartis selon un dispositif systématique sur deux ou trois lignes. La distance entre les collecteurs est de 12 m minimum et 20 m maximum selon la forme des placettes (rectangulaire ou carrée). Ce type de disposition vise à récolter des **données au niveau de la placette et non au niveau de l'arbre**.

Les collecteurs de forme carrée ont une paroi verticale d'environ 40 cm de hauteur. Ces derniers sont réalisés en toile de polypropylène tissée pour garantir une grande résistance. Afin de faciliter l'écoulement, les collecteurs sont évidés dans le fond avec un trou de 15 cm x 15 cm. Les fonds sont recouverts d'une grille permettant la récolte des petits éléments.

Les retombées de litière (branches, feuilles et fruits) sont collectées à raison de trois à cinq fois par an. Il est demandé aux opérateurs de veiller à conserver les mêmes dates de prélèvement chaque année, à savoir :

- le premier prélèvement est collecté à la fin de la période hivernale, **saïson 1** ;
- le deuxième prélèvement est réalisé à la fin du développement du feuillage, **saïson 2** ;
- le troisième prélèvement est fait en été vers la fin des grandes chaleurs (fin août - fin septembre), **saïson 3** ;
- le dernier prélèvement est récolté à la fin de la chute automnale des feuilles. Selon les quantités de retombées, ce prélèvement peut être réalisé en plusieurs fois, **saïson 4** voir **5**.

Les récoltes subissent, si nécessaire, un « pré-séchage » dans une pièce couverte. Le tri des retombées consiste pour le volet de la fructification, à séparer les fruits de l'essence principale (d'après la surface terrière) des essences secondaires. **Les cupules et bogues sans fruits n'ont pas été comptés de même que les fruits viables et non viables non pas été séparés.**

Les échantillons sont séchés 24 h à l'étuve à 105° C puis pesés et comptés. Les données sont ensuite envoyées au centre national de coordination à Fontainebleau pour validation et saisie dans la base. Les variables à expliquer fournies par le centre sont des variables transformées à l'hectare. **Il s'agit du poids/ha (kg) sec et du nombre de fruits/ha ainsi que du poids unitaire sec (g) issu du rapport des deux précédentes variables. Pour les deux variables massiques, la mention « poids sec » sera sous-entendue afin de ne pas alourdir le texte**

2.2.1.1 Période d'étude

Pour la présente étude, la période d'analyse s'étend de l'été jusqu'à la chute automnale des feuilles. Elle correspond aux **saisons 3 et 4** (voire 5 dans le cas de récolte exceptionnelle).

L'installation des collecteurs s'est échelonnée durant les années 1993 et 1994. Ces deux premières années étant considérées comme une période de test pour les collecteurs, les récoltes correspondantes n'ont pas été prises en compte dans cette étude. Il en va de même pour les dernières données qui n'avaient pas été toutes enregistrées au lancement de cette étude (2005 jusqu'à 2008). Ainsi, le jeu de données pour le présent travail couvre la période 1995 à 2004, soit 10 ans.

2.2.1.1 Sélection des données

Une première description des données a mis en évidence des informations manquantes tant au niveau des périodes de collecte qu'au niveau des années de collecte. Ce constat a conduit à élaborer puis à appliquer une règle de décision permettant de prendre ou non en compte ces enregistrements. La sélection s'est opérée avec les filtres suivants :

- les dates de début de collecte de la saison 3 devaient être comprises entre le 01/05 et le 31/07 ;
- les dates de fin de collecte de la saison 4 devaient être comprises entre le 01/11 et le 31/01.

A ces filtres s'est ajouté un critère de validation de la continuité des collectes entre les saisons 3 et 4. Enfin, le nombre de bacs récolteurs sur les placettes centrales ne devait pas être inférieur à 5 durant la période de collecte et le nombre d'années de récolte sur la période décennale ne devait pas être inférieur à 6.

En plus de la vérification de la période de collecte, un contrôle a été effectué sur les deux variables à expliquer par le poids unitaire permettant de traquer les valeurs aberrantes. Les données fournies étant ramenées à l'hectare, il convient ici d'exposer les problèmes rencontrés et les décisions prises

en conséquence. Les dix bacs récolteurs par placette représentent 5 m² de surface collectée. Un coefficient multiplicateur de 2000 est alors appliqué aux nombres de fruits et au poids pour ramener ces données à l'hectare. Un des problèmes fréquemment rencontrés a concerné le cas où un seul fruit était présent dans l'un des 10 bacs. Les balances utilisées par le réseau RENECOFOR étant tarées au gramme près, si le poids de cet unique fruit était inférieur à 0,5 g le résultat affiché était de 0 g soit 0 kg/ha pour 2000 fruits/ha. Il a été décidé de remplacer systématiquement pour ce genre de problème la valeur du poids 0 kg/ha en une valeur manquante. Un autre problème moins fréquemment rencontré, était la situation inverse : un poids renseigné avec un nombre de fruits nul. Ce constat survenait principalement lorsque il y avait présence de fruits avortés et qu'il était impossible aux opérateurs de séparer les fruits avortés de leur cupules ou bogues. Pour ce cas également, la valeur nulle du nombre de fruits a été remplacée par une valeur manquante.

Au total 7 placettes ont été retenues pour le chêne pédonculé pour les variables de nombre de fruits et de poids unitaire et 8 placettes pour le poids/ha. Pour le chêne sessile, 21 placettes ont été gardées pour les 3 variables à expliquer. Enfin, pour le hêtre 18 placettes ont été conservées pour le nombre de fruit et 17 placettes pour les poids unitaires et les poids/ha.

Enfin, face à ces variables à expliquer il convient de garder à l'esprit que ces descripteurs ne reflètent pas entièrement la production de graines. La littérature scientifique indique d'ailleurs que la technique de piégeage par bacs récolteurs ne fournit qu'une sous-estimation de la fructification au regard de la prédation par l'avifaune et/ou des micromammifères (OSWALD, 1984; AUCHMOODY, *et al.*, 1993).

Les graphes de la figure 1 présentent succinctement les données de fructifications par années. Cependant, compte tenu des valeurs manquantes, des moyennes annuelles ont été calculées à partir de variables centrées réduites sur les moyennes des placettes (valeur – moyenne de la placette /écart type). Outre l'intérêt de pouvoir comparer des moyennes annuelles calculées sur un nombre différent de placette, ce procédé permet également la comparaison des trois essences sur une même échelle, à savoir :

- Moyennes annuelles des variables centrées réduites sur les moyennes des placettes pour le nombre de fruits/ha (NBF) ;
- Moyennes annuelles des variables centrées réduites sur les moyennes des placettes pour le poids/ha de fruits (KGF) ;
- Moyennes annuelles des variables centrées réduites sur les moyennes des placettes pour le poids unitaire de fruit (GNB).

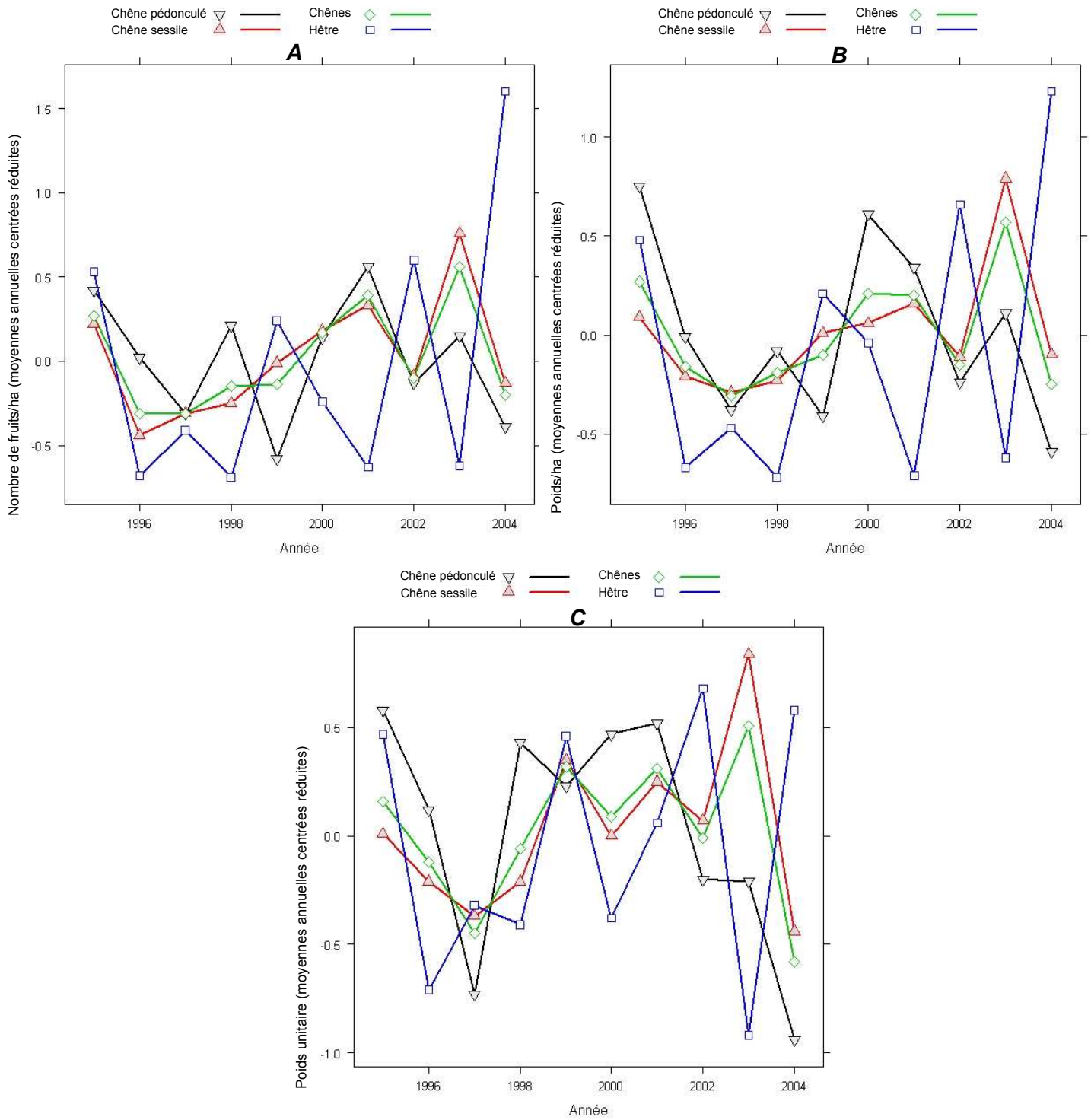


Figure 1 : Moyennes annuelles (1995-2004) des variables centrées réduites, en A : nombre de fruits/ha, B : poids/ha et C : poids unitaire. Les couleurs des lignes correspondent respectivement, à : noire pour le chêne pédonculé, rouge pour le chêne sessile, vert pour les deux chênes et bleu pour le hêtre.

D'une manière générale, on retrouve les mêmes tendances et ordres de grandeur pour les trois variables à expliquer avec les trois essences.

Le hêtre présente un rythme de production quasi bisannuel en alternance avec les deux chênes, notamment à partir de l'année 2001 et jusqu'à la fin de la période d'étude. Les moyennes des variables centrées réduites sont assez proches pour les trois essences pour l'année 1997. Ce constat s'observe également pour les chênes pour les années 2001 et 2002. En revanche des écarts importants pour ces deux espèces sont à noter pour les années 1995 et 1998, avec une amplitude très marquée pour l'année 2003. Cette année est caractérisée par une importante canicule estivale et l'on observe un comportement différent entre les genres *Quercus* et *Fagus* quant aux fructifications. Les deux chênes et dans une moindre mesure le pédonculé, ont fructifié l'année de la canicule. En revanche, le hêtre n'a quasiment rien produit en 2003 pour abondamment fructifier en 2004.

2.2.2. Variables explicatives

Les paragraphes suivants présentent les différentes variables explicatives avec le cas échéant le pourcentage de valeur manquante.

2.2.2.1 Variables stationnelles

Le tableau suivant reprend l'ensemble des variables stationnelles mesurées sur chaque placette.

Tableau 1: Description des variables stationnelles.

Variables stationnelles	Unité	Description
Alti	m	Altitude de la placette
Pente	%	Pente de la placette
Expo		Exposition de la placette : -2=nord, -1=nord-est, 0=est ou ouest ou plat, 1=sud-est, 2=sud, 1=sud-ouest, -1=nord-ouest
Topo		Topographie locale de la placette : 0=terrain plat ou replat ou mi-versant, -1=haut de versant ou sommet arrondi, 1=bas de versant
LambertX	km	Abscisse de la placette dans le système de coordonnées cartographiques Lambert II étendu
LambertY	km	Ordonnée de la placette sous couvert dans le système de coordonnées cartographiques Lambert II étendu

Concernant l'exposition et la topographie, il a été décidé de recoder les données qualitatives en variables quantitatives discrètes. Pour l'exposition, les stations chaudes ont été avantagées allant du sud-ouest au sud-est par des entiers positifs. Par ce même procédé, les placettes ont été

différenciées selon leur condition topographique. Aucune valeur manquante n'a été observée pour les variables stationnelles. A titre indicatif, la figure 2 présente la distribution altitudinale des placettes par essence.

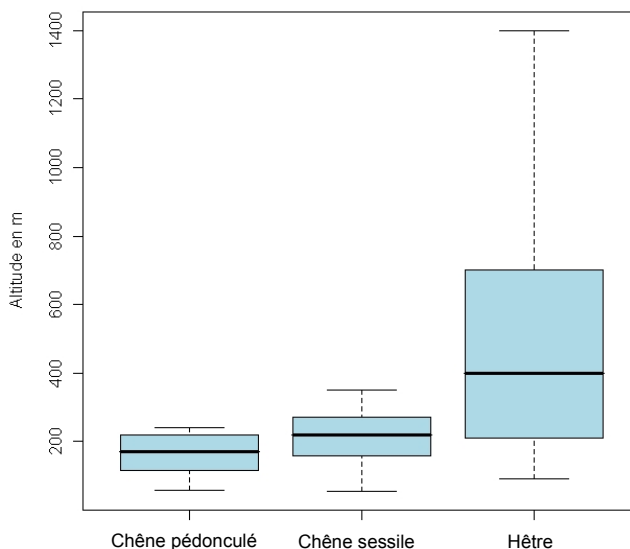


Figure 2 : Distribution altitudinale des placettes par essence.

L'altitude maximale des placettes de chênes n'excède pas 400 m. Pour le hêtre, la distribution altitudinale des placettes s'étend de l'étage collinéen jusqu'à l'étage montagnard.

2.2.2.2 Variables édaphiques

Les protocoles de prélèvement des échantillons et d'analyses chimiques sont présentés dans le rapport RENECOFOR sur la chimie et stocks des horizons minéraux (BENBRAHIM, *et al.*, 2009).

Les inventaires des caractéristiques physico-chimiques des sols ont été réalisés en deux étapes :

- Prélèvements dans les horizons 0 à 40 cm de 1993 à 1995 ;
- Prélèvements dans les horizons de 40 à 100 cm en 1998.

Le protocole d'échantillonnage pour le prélèvement des horizons 0-40 cm repose sur la méthode des grappes. Sur chaque placette RENECOFOR, 5 grappes de 13,5 m de côté ont été matérialisées (4 aux coins et une au centre). Une maille carrée de 4,5 m de côté est disposée sur la grappe offrant ainsi 16 possibilités de prélèvement aux intersections. Cinq points sont alors tirés au sort et constituent le futur échantillon composite (par regroupement à volume égal) de la grappe. Pour les horizons supérieurs, une placette est donc représentée par 5 grappes, elles-mêmes constituées de 5 échantillons composites. Concernant le prélèvement des horizons 40-100 cm, le protocole diffère du précédent. Les échantillons ont été prélevés dans les deux fosses pédologiques creusées à l'extérieur de la placette. Des prélèvements sont réalisés sur deux faces de la fosse pour les horizons 40-80 cm

et 80-100 cm. Les prélèvements sont regroupés de manière à avoir par fosse : un prélèvement pour les horizons 40-80 cm et un prélèvement pour les horizons 80-100 cm. Le Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois, (LERFOB) (UMR Inra-ENGREF, 1092), a également fourni le rapport carbone/azote de l'humus (CNhumus), le pH (utilisant le chlorure de calcium comme échangeur, pHca) et la réserve utile du sol (RUM). Pour de plus amples informations, l'annexe 5A renseigne sur la description des données manquantes par essence et par variable à expliquer.

D'une manière générale, le pourcentage de valeur manquante n'excède pas 15% chez les chênes et atteint 27% pour le hêtre. Ces résultats reflètent des problèmes de collecte dans les horizons de profondeur compte tenu de la faible épaisseur du sol et/ou de la charge importante en cailloux.

Tableau 2: Description des variables édaphiques.

Variables édaphiques	Unité	Description
PPTT	t/ha	Stock de terre fine (de 0-40 cm et de 40-100 cm de prof.)
CARB	t/ha	Stock de carbone organique (de 0-40 cm et de 40-100 cm de prof.)
N	t/ha	Stock d'azote organique (de 0-40 cm et de 40-100 cm de prof.)
P	kg/ha	Stock de phosphore extractible (de 0-40 cm et de 40-100 cm de prof.)
CAECH	kg/ha	Stock de cations basiques échangeables : Ca ²⁺ (de 0-40 cm et de 40-100 cm)
MGECH	kg/ha	Stock de cations basiques échangeables : Mg ²⁺ (de 0-40 cm et de 40-100 cm)
KECH	kg/ha	Stock de cations basiques échangeables : K ⁺ (de 0-40 cm et de 40-100 cm)
AL	kg/ha	Stock de cations acides échangeables : Al ³⁺ (de 0-40 cm et de 40-100 cm)
H	kg/ha	Stock de cations acides échangeables : H ⁺ (de 0-40 cm et de 40-100 cm)
MN	kg/ha	Stock de cations acides échangeables : Mn ²⁺ (de 0-40 cm et de 40-100 cm)
CECE	kg/ha	Stock de la capacité d'échange cationique (de 0-40 cm et de 40-100 cm)
CN		Rapport carbone sur azote (de 0-40 cm et de 40-100 cm)
CN humus		Rapport carbone sur azote dans l'humus
S/T0-40	%	Taux de saturation en %, pour l'horizon 0-40 cm
pHca0-40		pHca
RUM	mm/m	Réservoir utilisable maximal ou Réserve utile maximale sur 1 m
TypHumus		Humus : 1=mor, 2=dysmoder, 3=moder & hémimoder, 4=oligomull & dysmull, 5=eumull & mésomull

A titre indicatif, la figure 3 présente la ventilation par essence du réservoir utilisable maximal (ou réserve utile).

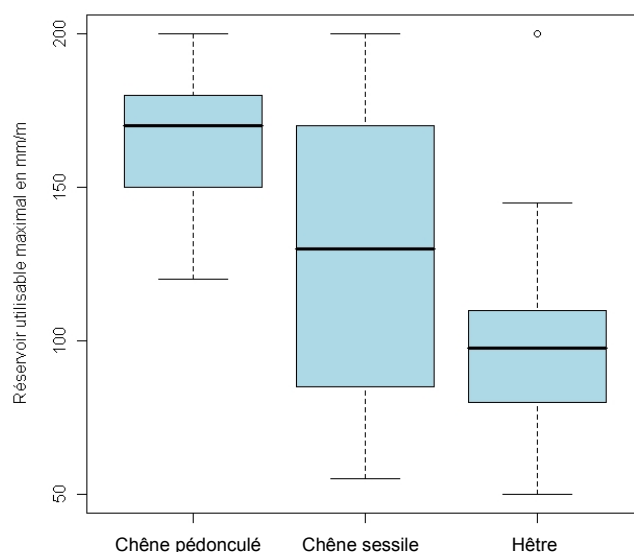


Figure 3 : Distribution des valeurs du réservoir utilisable maximal en mm/m, par essence.

L'amplitude du réservoir utile maximal des placettes de chêne pédonculé est assez restreinte avec une médiane se situant vers 170 mm/m. Cette valeur indique de faibles contraintes pour cette essence (BAIZE et JABIOL, 1995). Pour les placettes de chêne sessile et de hêtre, on observe des valeurs basses proches de 50 mm/m pour le premier quartile exprimant des faibles potentialités de ressource en eau (BAIZE et JABIOL, 1995). Pour le hêtre, la placette RENECOFOR du département de l'Aisne présente une valeur extrême de 200 mm/m qui dépasse de plus de 1,5 fois l'écart interquartile (Q3 – Q1). L'implantation des placettes de chêne sessile couvre une grande variation du réservoir utilisable maximal avec des valeurs extrêmes de 50 à 200 mm/m. La moitié des placettes ont une valeur de réservoir utilisable maximal comprise entre 80 et 170 mm/m environ.

2.2.2.3 Variables phénologiques

Le paragraphe suivant fait référence au rapport du LERFOB sur l'analyse spatiale et temporelle et du déterminisme climatique de la phénologie des peuplements du réseau RENECOFOR (LEBOURGEOIS et GODFROY, 2006).

Depuis 1997, des observations hebdomadaires sont réalisées de mars à juin pour le débourrement et de septembre à novembre pour le jaunissement, sur les 36 arbres « observations » de l'essence principale. Les notations concernent des stades précis de débourrement et de jaunissement que le lecteur pourra consulter dans la publication précédemment citée, mais également dans le manuel de référence pour les observations phénologiques (ULRICH, *et al.*, 1997). Les données de phénologie concernent la période 1997-2004, soit 8 années.

Le tableau 3 présente les différentes variables phénologiques disponibles. Les valeurs manquantes sont annexées au 5B et C. Le pourcentage maximal de valeur manquante s'élève à 25% pour les variables phénologiques.

Tableau 3: Description des variables phénologiques.

Variables phénologiques	Description
DD1	Date en jour julien pour laquelle 10% des arbres présentent sur au moins 20% du houppier des bourgeons ouverts avec des petites feuilles
DD9	Date en jour julien pour laquelle 90% des arbres présentent sur au moins 20% du houppier des bourgeons ouverts avec des petites feuilles
JJ1	Date en jour julien pour laquelle 10% des arbres présentent un jaunissement sur au moins 20% du houppier
JJ9	Date en jour julien pour laquelle 90% des arbres présentent un jaunissement sur au moins 20% du houppier
SV11	Différence entre les stades 10% pour le débourrement et 10% pour le jaunissement (durée la plus longue)
SV19	Différence entre stades 10% pour le débourrement. et 90% pour le jaunissement
SV91	Différence entre les stades 90% pour le débourrement et 10% pour le jaunissement
SV99	Différence entre les stades 90% pour le débourrement et 90% pour le jaunissement (durée la plus courte)

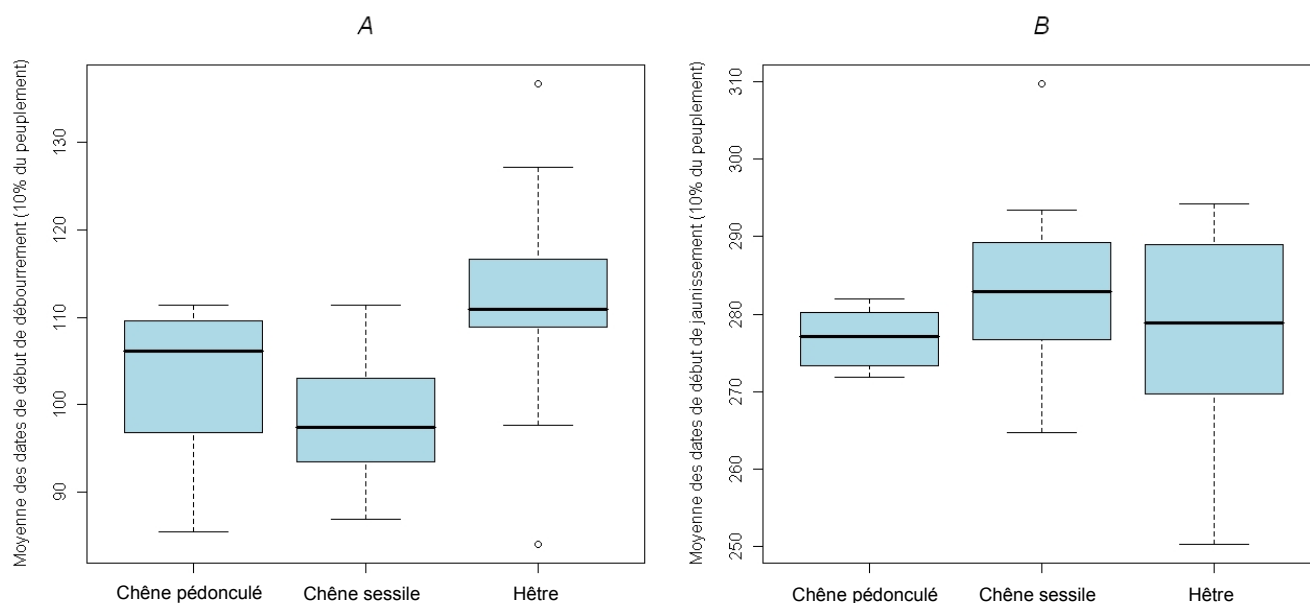


Figure 4 : Distributions des moyennes des variables phénologiques (1997-2004) en jour julien, des placettes RENECOFOR (par essence). A : Date de début de débourrement (10% du peuplement), B : Date de début de jaunissement (10% du peuplement).

A titre indicatif, la figure 4 présente la répartition des moyennes des dates de début de débourrement et de jaunissement (10% du peuplement) pour les placettes des trois essences. Pour la date de début de débourrement, l'amplitude entre les deux chênes est à peu près la même (20 j environ). En revanche, les médianes de distribution des moyennes, diffèrent d'une dizaine de jour environ au profit d'un débourrement plus précoce pour le chêne sessile se situant vers la deuxième quinzaine d'avril. La médiane de la date de début de débourrement du hêtre tourne autour de la troisième semaine d'avril. Deux valeurs extrêmes sont observées pour les placettes des Pyrénées-Atlantiques (vers la fin mars) et du Gard (vers la mi-mai).

Concernant la date de début de jaunissement, on observe une amplitude très faible (une dizaine de jours) pour le chêne pédonculé. Les médianes des moyennes de début de jaunissement sont assez proches pour les trois espèces et se situent vers les deux premières semaines d'octobre. L'amplitude pour le chêne sessile est d'environ un mois et démarre à la troisième semaine de septembre. La valeur extrême concerne la placette d'Ille-et-Villaine qui affiche une date moyenne de jaunissement vers la première semaine de novembre. Enfin pour le hêtre, la date de début de jaunissement s'étale de la deuxième semaine de septembre jusqu'à la troisième semaine d'octobre.

2.2.2.4 Variables dendrométriques

Ces variables sont issues du rapports d'interprétation des mesures dendrométriques et de l'étude dendrochronologique des 102 peuplement du réseau (LEBOURGEOIS, 1997; CLUZEAU, *et al.*, 1998).

Une tentative de reconstitution des accroissements en surface terrière de l'essence principale de 1995 à 2004 par placette a été menée sans succès aux travers des différents inventaires dendrométriques. Cette tâche a échoué en raison d'une part, du rythme différent des prélèvements d'une placette à une autre et d'autre part, des contraintes de gestion liées à l'exploitabilité des éclaircies.

Il convient ici d'explicitier les procédures d'inventaire du réseau RENECOFOR afin d'éclairer le lecteur. Des inventaires dits « avant éclaircie » sont systématiquement réalisés sur toutes les placettes du réseau en plus des inventaires quinquennaux. Le martelage effectué, il est possible de soustraire les futurs arbres enlevés. Si l'éclaircie a lieu dans la foulée, l'inventaire « après éclaircie » représente bien le peuplement. En revanche, pour des contraintes économiques locales (par exemple : stock important de bois sur le marché après les tempêtes de 1999), il se peut que l'abattage soit différé d'une à plusieurs saison de végétation. Ainsi les arbres qui auraient dû profiter de l'éclaircie se trouvent toujours en concurrence avec ceux qui auraient dû être enlevés. Ce constat a conduit à ne prendre que les mesures dendrométriques de l'essence principale de 1995 ainsi que le cumul des perturbations incluant les éclaircies et les tempêtes, soient :

- Age : Age du peuplement en 1995 ;
- dep : Moyenne des diamètres de l'essence principale en 1995 ;
- Ho : Hauteur moyenne de l'essence principale en 1995 ;
- Gep : Pourcentage de l'essence principale en surface terrière/ha en 1995 ;
- Nep : Nbre de tige/ha de l'essence principale en 1995 ;
- H_d : Moyenne du rapport hauteur/diamètre de l'essence principale en 1995 ;
- Hbh : Moyenne de la hauteur de la base du houppier de l'essence principale en 1995 ;
- Lh : Moyenne de la hauteur relative du houppier de l'essence principale en 1995 ;
- Sh : Moyenne des projections des surfaces des houppiers en 1995 ;
- Nb_per : Cumul des perturbations par placettes [éclaircies+tempêtes].

Pour décrire sommairement les peuplements les graphiques suivants présentent trois variables dendrométriques réparties par essence, à savoir : l'âge, la hauteur dominante et la surface du houppier.

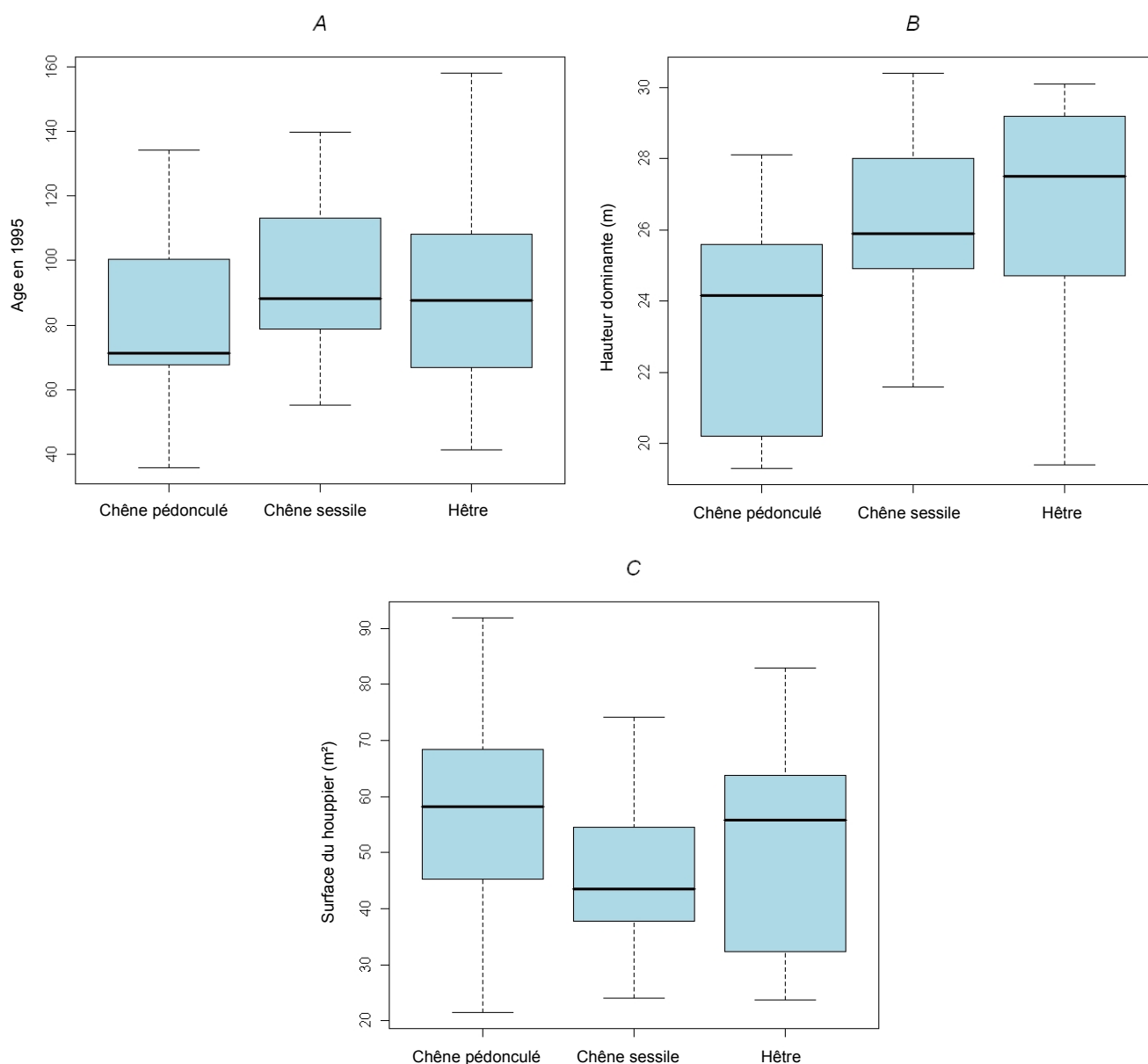


Figure 5 : Variables dendrométriques mesurées en 1995 des placettes RENECOFOR (par essence).

A : Age, B : Hauteur dominante (m), C : Surface du houppier (m²).

L'amplitude maximale de l'âge est atteinte pour les placettes de hêtre avec des peuplements se répartissant entre 40 et 160 ans environ. La médiane de l'âge des peuplements de chêne pédonculé est sensiblement inférieure (70 ans) au chêne sessile et au hêtre (90 ans). Concernant la hauteur dominante, on observe une gradation de la médiane par essence allant d'environ 24 m pour le chêne pédonculé à 26 m pour le chêne sessile et à plus de 27 m pour le hêtre. Le maximum de hauteur dominante est atteint pour le chêne sessile avec des peuplements dépassant les 30 m. Pour la surface du houppier le chêne pédonculé, contrairement au chêne sessile, montre des valeurs maximales à la fois pour l'amplitude (environ 25 à 95 m²) et la médiane (près de 60 m²). Pour les variables dendrométriques, les valeurs manquantes ne concernent que les placettes de hêtre du Luxembourg (annexe 5D).

2.2.2.5 Variables météorologiques

La constitution du jeu de données de la présente étude a nécessité l'achat de données météorologiques auprès de Météo France. Le tableau 4 renseigne sur les différentes données disponibles pour les variables météorologiques.

Tableau 4: Description des variables météorologiques.

Variables météorologiques	Unité	Description
P	mm	Précipitations mensuelles
Tnab	°C	Température minimale du mois
Tn	°C	Moyenne des températures minimales quotidiennes
Txab	°C	Température maximale du mois
TxM	°C	Moyenne des températures maximales quotidiennes
Tm	°C	Moyenne mensuelle des températures moyennes quotidiennes
Nb1	Nb	Nombre de jours où la température minimale est $\leq -5^{\circ}\text{C}$
Nb2	Nb	Nombre de jours où $-5^{\circ}\text{C} < \text{température minimale} \leq 0^{\circ}\text{C}$
Nb3	Nb	Nombre de jours où $0^{\circ}\text{C} < \text{température minimale} \leq 5^{\circ}\text{C}$

Les valeurs manquantes de ces variables exceptées les précipitations, ne concernent que les placettes de hêtre du Luxembourg, (annexe 5E). La figure suivante montre la distribution des distances entre les placettes Météo France et les placettes RENECOFOR.

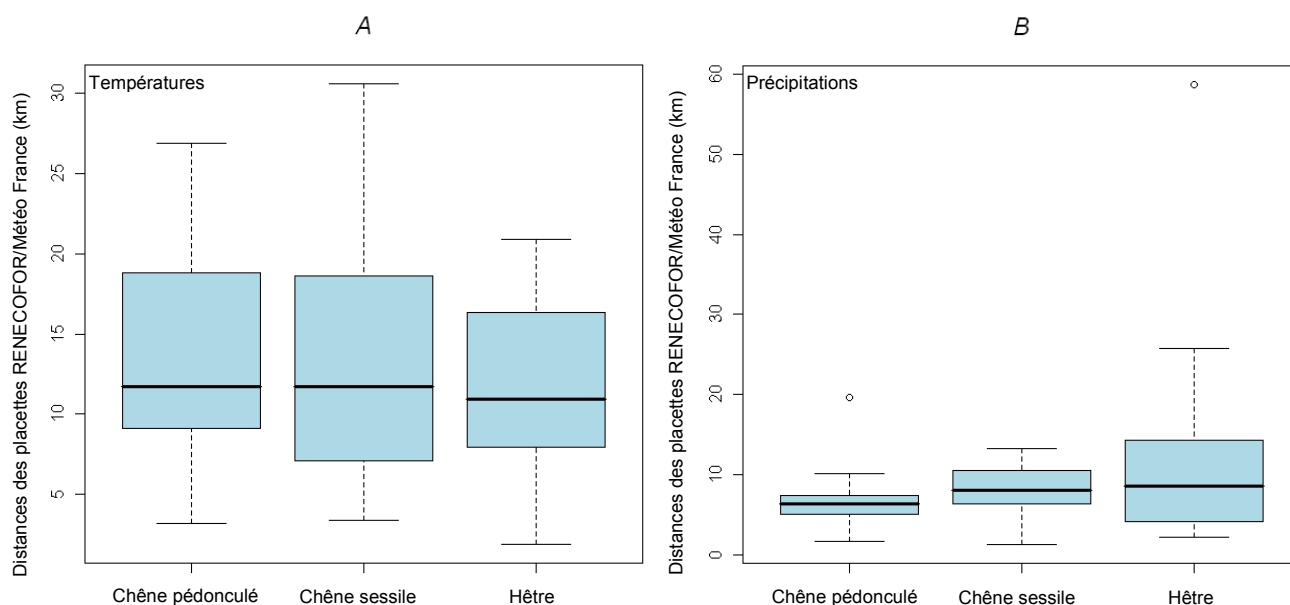


Figure 6 : Distance (km) entre les placettes Météo France et les placettes RENECOFOR (par essence). A : températures, B : précipitations.

La valeur extrême pour les précipitations, concerne les placettes de hêtre au Luxembourg dont la station météorologique la plus proche se trouve dans la ville de Metz. Les données plus précises sont annexées au n°A et 6B.

2.2.2.6 Variables bioclimatiques

Ces données ont été fournies par l'équipe d'Ecologie forestière du LERFOB. Les indices bioclimatiques correspondent à :

- Ins : durée annuelle d'insolation sur la période 1997-2003, issue des stations Météo France les plus proches des placettes ;
- Rad : les radiations solaires mensuelles sont calculées à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) sur lequel la course du soleil est simulée grâce à un Système d'Information Géographique (LEBOURGEOIS et PIEDALLU, 2005). L'échelle la plus fine de cette variable est actuellement de 50 m grâce à la précision du Modèle Numérique de Terrain. Cet indice permet d'appréhender la variation topographique locale à l'échelle d'une forêt ou d'un massif forestier ;
- ID : l'indice de De Martonne renseigne sur l'aridité du climat. Il est de plus largement utilisé pour la répartition des essences ;
- ETP et BHc : ces indices ont été calculés pour la période 1993-2004. L'ETP correspond à l'évapotranspiration d'un couvert végétal dont l'alimentation en eau n'est pas contraignante (LOZET et MATHIEU, 2002). Plusieurs formules de calcul existent et dépendent d'ajustement statistique selon les auteurs. Les « ETP » fournis par le LERFOB ont été générés selon les formules de Thornthwaite, Turc et Hargreaves. Quant aux bilans hydriques, ils sont le résultat de la différence entre les précipitations et l'ETP.

L'annexe 5F montre que seule la variable de durée annuelle d'insolation présente des pourcentages de valeurs manquantes non négligeables avec des seuils pouvant dépasser les 40%.

2.3. Choix des variables indépendantes

Compte tenu du nombre important de variables explicatives à étudier et à sélectionner, deux démarches ont été testées. La première est liée à la littérature scientifique et la seconde est typiquement exploratoire. Ne sachant pas a priori s'il existe des différences entre les deux chênes, j'ai pris le parti de les étudier ensemble puis séparément. Aussi, les essences ont-elles été analysées comme suit :

- Chênes pédonculé et sessile ;
- Chêne pédonculé ;
- Chêne sessile ;
- Hêtre.

2.3.1 Démarche bibliographique

L'ouvrage collectif « pollinisation et productions végétales » édité par l'INRA 1984, apporte de nombreux éclairages sur la biologie des essences étudiées. Pour la partie concernant les deux chênes, l'auteur souligne dans son introduction, les difficultés de régénération liées aux fructifications irrégulières notamment dans l'Est de la France (BONNET-MASIMBERT, 1984). L'auteur décrit ensuite le cycle de reproduction exposé dans le paragraphe suivant.

L'initiation florale (mâle et vraisemblablement femelle) apparaît durant l'été de l'année $n-1$. Passée la période de dormance hivernale, maturation pollinique, pollinisation et floraison femelle s'effectuent d'avril à la mi-mai de l'année n . De la deuxième quinzaine de mai jusqu'au début du mois de juillet, la germination du pollen et la formation des ovaires et ovules se mettent en place. La fécondation a lieu vers la fin de juillet et le développement et la maturation du bourgeon s'étalent d'août à septembre. Enfin, octobre voit la chute et la germination immédiate des glands. Au sujet de l'écologie de la floraison, l'auteur évoque une phase critique sur la période allant de la pollinisation à la fécondation. Ainsi, les gelées printanières affectent les chatons mâles et plus particulièrement les anthères et les filets. D'autre part, des conditions météorologiques trop fraîches lors de la fin de la maturation pollinique, empêchent la déhiscence des anthères et la libération du pollen. Cette phase est également contrainte par les pluies qui précipitent le pollen au sol. Enfin, la prédation entomologique comme par exemple les Chématobies¹, est un facteur externe important puisqu'elle peut anéantir toute une floraison (BONNET-MASIMBERT, 1973).

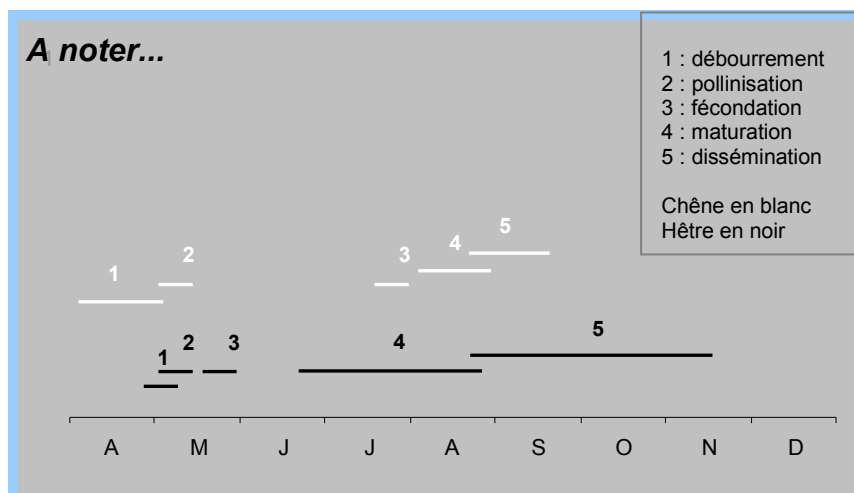
¹ Famille de lépidoptère dont les chenilles occasionnent de nombreux dégâts sur les arbres.

Pour le hêtre, la synthèse a été rédigée par H. Oswald qui constate en premier lieu que la parthénocarpié² est un phénomène courant chez cette essence (OSWALD, 1984). Ce constat est par ailleurs confirmé dans d'autres publications (HILTON et PACKHAM, 1997, 2003). L'auteur place ensuite les diverses phases biologiques dans la chronologie développée ci-après.

La réceptivité des fleurs femelles s'étend de fin avril à fin mai. La pollinisation s'effectue sur les premiers quinze jours de mai, tandis que la fécondation sur les quinze derniers. La maturation des faînes se déroule de la fin juin au début de septembre. Enfin la dissémination des fruits s'étale du début de septembre à la mi-décembre (faînes pleines et faînes avortées).

Au sujet de l'écologie de la fructification, Oswald évoque différents paramètres. Les conditions météorologiques ont là encore toute leur importance. Par exemple, un stress hydrique estival à l'année *n-1* soutient l'élaboration des bourgeons florifères. L'auteur remarque également le rôle inhibiteur des gelées printanières et des précipitations pour les mêmes raisons évoquées que pour les chênes. Les facteurs édaphiques ne sont pas en reste tant du point de vue de la réserve utile du sol que de la richesse chimique. Pour cette dernière, Oswald présente l'importance de ses travaux sur la fertilisation minérale. La sylviculture a également des conséquences non négligeables sur la fructification, puisque de gros arbres avec de grandes surfaces de houppier fructifient mieux. Enfin, le hêtre est tout autant sensible aux attaques des insectes défoliateurs.

L'encadré présente succinctement les différentes phases de fructification pour les essences étudiées (d'après OSWALD, 1984 ; LEBOURGEOIS *et al*, 2008).



L'étude bibliographique se penchant sur les mêmes espèces et/ou apparentées (groupe des chênes blancs américains et *Fagus crenata*) a permis de sélectionner diverses variables pouvant expliquer le niveau moyen et les variations interannuelles des fructifications. L'ensemble de ces variables est présenté dans le tableau 5.

² Une fleur femelle non fécondée peut donner un fruit stérile.

Tableau 5 : Liste des variables recensées dans la bibliographie.

Domaine	Variable	Nbre de citation
Dendrométrie	Diamètre à 1,30 m	5
	Surface du houppier	2
	Gelées printanières	7
Météorologie	Sécheresse estivale	
	T° et Précipitations	
	P-ETP Thornthwaite	6
	Précipitations automnales	1
	Moy des t° max automnales	1
Pédologie	N, P, K, Ca, Mg	3
Géographie	Longitude	1

Concernant la dendrométrie, des variables simples ressortent de la bibliographie tels que le diamètre (NILSSON et WÄSTLJUNG, 1987; AUCHMOODY, *et al.*, 1993; SORK, *et al.*, 1993a; DEY, 1995; KOENIG et KNOPS, 2005), la surface terrière (AUCHMOODY, *et al.*, 1993; GREENBER et PARRESOL, 2000) et la surface des houppiers (SORK, *et al.*, 1993a; DEY, 1995). L'ensemble de ces variables sous-tend que des gros arbres assez proches les uns des autres et avec de gros houppiers ont plus de chance de mieux fructifier.

Concernant les variables météorologiques, les gelées printanières (avril et mai) occupent le devant de la scène en terme d'occurrence bibliographique tant pour les chênes que pour le hêtre (WACHTER, 1964; AUCHMOODY, *et al.*, 1993; SORK et BRAMBLE, 1993; SORK, *et al.*, 1993a; HILTON et PACKHAM, 2003; KON, *et al.*, 2005; SUZUKI, *et al.*, 2005). Au regard de l'ensemble des données explicatives, ce paramètre peut être exprimé par diverses variables, à savoir : la température minimale absolue (T_{ab}), la moyenne des températures minimales quotidiennes (T_n), le nombre de jours où la température minimale est ≤ -5°C (Nb1), le nombre de jours où la température minimale est comprise entre -5 et 0°C (Nb2) et le nombre de jours où la température minimale est comprise entre 0 et 5°C (Nb3).

La sécheresse estivale regroupant à la fois les températures et les précipitations (juin, juillet et août) est également abondamment citée (MATTHEWS, 1955; WACHTER, 1964; SORK, *et al.*, 1993a; PIOVESAN et ADAMS, 2001; HILTON et PACKHAM, 2003; KOENIG et KNOPS, 2005; LUSK, *et al.*, 2007). Ce paramètre peut éventuellement se traduire dans les variables suivantes : la température maximale du mois (T_{xab}), la moyenne des températures maximales quotidiennes (T_{xM}), les précipitations, mais aussi les divers indices d'évapotranspiration (ETP) et bilans climatiques (P-ETP).

De plus, une référence sur les chênes blancs souligne l'effet des précipitations et températures maximales automnales (LUSK, *et al.*, 2007). Ces variables seront testées afin de sélectionner les plus pertinentes pour la construction des futurs modèles.

Le caractère édaphique ressort également de l'étude bibliographique avec notamment les travaux menés par l'Inra et le Cemagref sur les éléments suivants : N, P, K, Ca, Mg (GARBAYE et LEROY, 1974; LE TACON et OSWALD, 1977; PHILIPPE, 1989). Concernant le jeu de données, toutes ces variables seront confrontées aux variables à expliquer. Des variables pédologiques plus synthétiques seront également testées, à savoir : le stock de terre fine (PPTT), la capacité d'échange cationique (CECE), Le rapport carbone/azote (CN), le rapport carbone/azote de l'humus, le taux de saturation (S/T), le pH et le type d'humus.

Enfin, la longitude est prise en compte dans un article concernant les chênes de d'Amérique du Nord (LUSK, *et al.*, 2007). Cette variable sera à manipuler avec précaution puisque le terrain de l'étude était couvert par un gradient longitudinal plus large que celui du territoire de l'étude présente.

2.3.4 Démarche exploratoire

Dans cette démarche, toutes les variables explicatives seront testées (variables présentées en annexe n°3). La différence avec la démarche bibliographique tient aux données phénologiques qui n'apparaissent pas dans les publications traitant de la fructification des arbres forestiers.

2.4. Méthodes d'analyses

La figure 7, d'après Sork (SORK, *et al.*, 1993b), propose une synthèse des hypothèses liées aux fructifications. La taille des flèches noires est proportionnelle à la relation entre deux variables. On retrouve ainsi les pôles développés précédemment regroupés partiellement et renommés sous différents vocables. *L'efficacité de la pollinisation* sous-tend toutes les étapes de l'initiation florale à l'élaboration du fruit. Ces différentes phases biologiques sont essentiellement rythmées par les conditions météorologiques. *Les conditions du milieu* centralisent les données abiotiques ainsi que des variables météorologiques et dendrométriques synthétiques. Les *variations interannuelles* rassemblent toutes les données de fructifications. Enfin la *prédation* traite des relations entre granivores et fructifications.

Ainsi pour caractériser les fructifications, des analyses seront réalisées sur les moyennes décennales dans un premier temps, puis sur les variations interannuelles. La première vise à comparer simplement les moyennes des variables à expliquer des trois espèces. Ces moyennes seront ensuite confrontées, via les démarches expliquées précédemment (bibliographique et exploratoire), aux variables explicatives. La mise en relation des moyennes décennales avec ces variables pourra éventuellement apporter des éléments de compréhension sur le rôle des *conditions du milieu* et en

partie sur l'efficacité de la pollinisation. Les analyses des moyennes simplifient les mécanismes mais n'expliquent pas les variations interannuelles. Ces dernières seront explicitées par des analyses annuelles qui de plus pourront éclairer la partie concernant l'efficacité de la pollinisation.

En revanche, ces modèles sont à la fois plus complexes et très sensibles aux valeurs manquantes et aux arrières-effets. Dans le figuré suivant, les deux analyses apparaissent sur fond bleu. Aucune variable, dans le jeu de données, ne peut expliciter le rôle de la prédation.

Pour l'ensemble des analyses, le logiciel statistique R a été utilisé (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008).

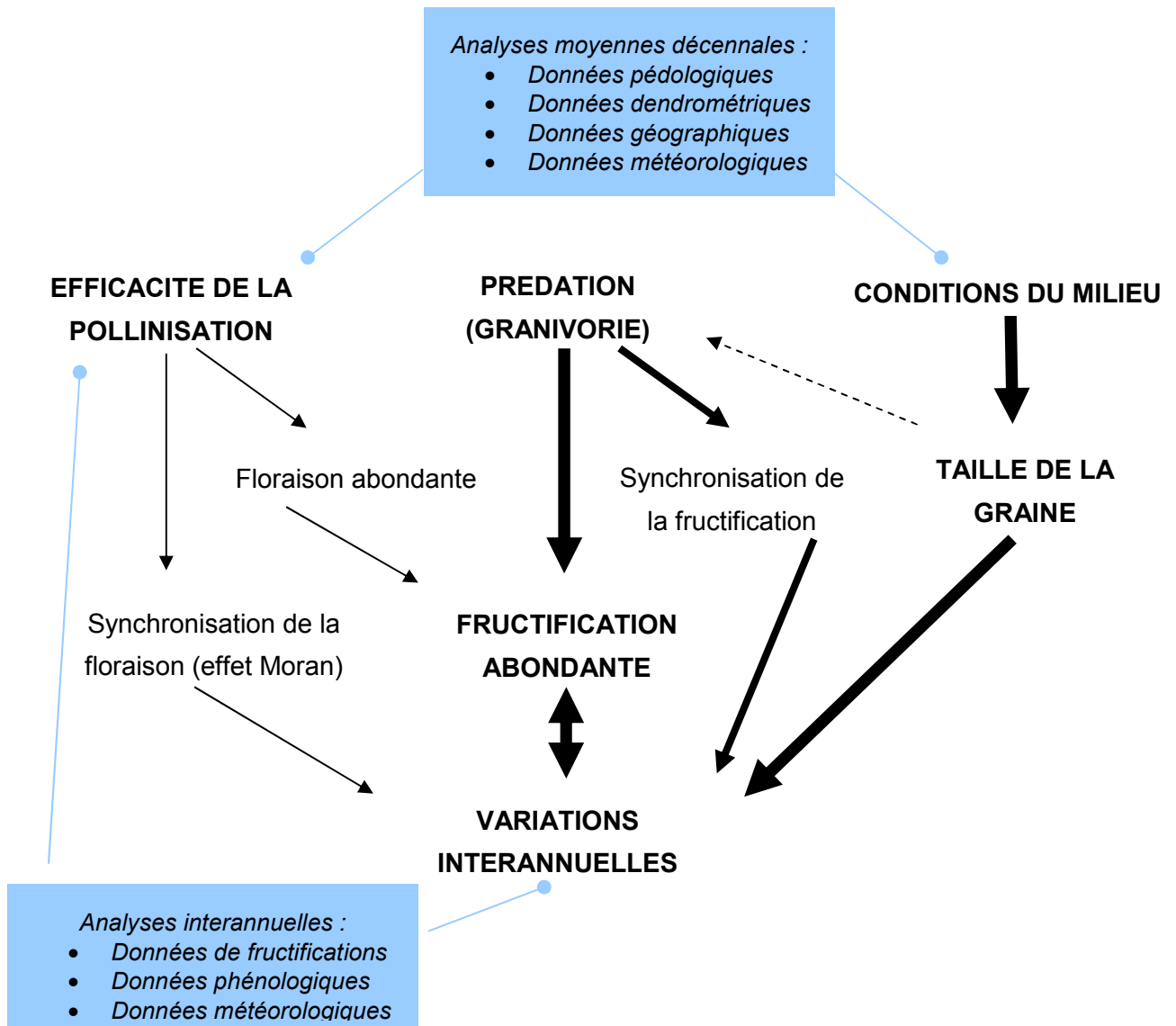


Figure 7 : Modèle général de fructification, d'après Sork (1993). La taille des flèches noires indique l'importance de la relation entre deux variables. Les encadrés et les lignes bleues positionnent les deux types d'analyse.

RÉSULTATS

3. RESULTATS

3.1 Caractérisation des variables à expliquer

Ce premier travail permet de voir si d'une manière générale, il y a des différences entre les essences en terme de fructification sur la période 1995-2004. Les variables à expliquer sont les moyennes décennales de nombre de fruits/ha, de poids/ha et de poids unitaire de la graine.

Dans un premier temps, la normalité des variables est testée afin de choisir entre un test de comparaison paramétrique et un test non paramétrique. Concernant la normalité, l'hypothèse H_0 testée vérifie que la distribution des différentes variables est conforme à une distribution normale. Cette hypothèse est acceptée quand la valeur du p-value du test est supérieure à 0,05. Le tableau 6 présente les résultats du test de normalité.

Tableau 6 : Résultats des tests de Shapiro-Wilk vérifiant la normalité des variables à expliquer.

Variabiles	Shapiro-Wilk	p-value	H0
Chêne pédonculé, moyennes décennales de nombre de fruits/ha	0,633	< 0,001	non
Chêne pédonculé, moyennes décennales de poids/ha	0,915	0,390	oui
Chêne pédonculé, moyennes décennales de poids unitaire	0,941	0,653	oui
Chêne sessile, moyennes décennales de nombre de fruits/ha	0,926	0,050	oui
Chêne sessile, moyennes décennales de poids/ha	0,949	0,172	oui
Chêne sessile, moyennes décennales de poids unitaire	0,974	0,699	oui
Hêtre, moyennes décennales de nombre de fruits/ha	0,715	< 0,001	non
Hêtre, moyennes décennales de poids/ha	0,938	0,017	non
Hêtre, moyennes décennales de poids unitaire	0,868	< 0,001	non

Au regard des résultats, la normalité de la distribution des moyennes décennales (1995-2004) est acceptée pour le chêne sessile, alors qu'elle est rejetée pour le hêtre ; seule la distribution du nombre de fruits/ha du chêne pédonculé ne suit pas une distribution normale.

- Analyse de la moyenne décennale (1995-2004) du nombre de fruits par hectare

Compte tenu de la différence morphologique entre glands et faînes, il est inutile de tester si la moyenne décennale du nombre de graines de hêtre est différente de celle des chênes. En revanche, il

peut être intéressant de savoir s'il existe une différence entre les deux chênes. La moyenne décennale (1995-2004) du nombre de fruits/ha du chêne pédonculé ne suivant pas une loi normale, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis est utilisé. Ce test n'indique pas de différence significative du nombre moyen de fruits/ha entre chêne sessile et pédonculé (Kruskal-Wallis chi-squared = 3,35, $p = 0,07$). Néanmoins, le faible nombre de placettes de chêne pédonculé rend le test peu puissant et il est probable qu'il existe une différence.

La figure 8 révèle à la fois une différence de médiane mais surtout une différence de variance.

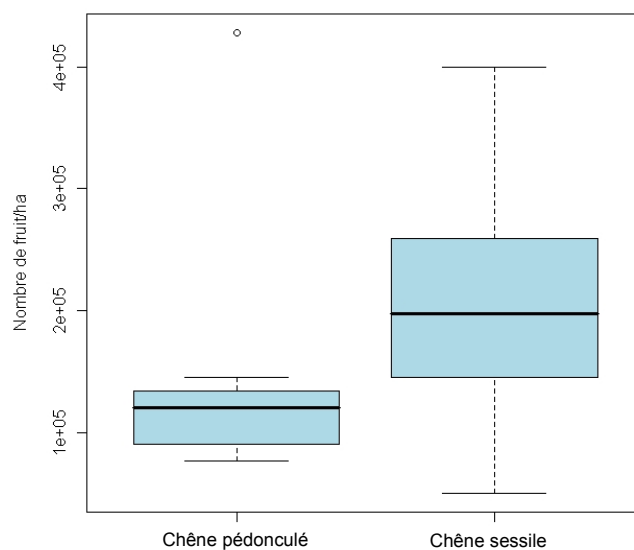


Figure 8 : Distribution des moyennes de nombre de fruits/ha (1995-2004) des placettes des deux chênes.

- Analyse de la moyenne décennale (1995-2004) du poids total de fruits par hectare

La figure 9 décrit l'amplitude des moyennes décennales de poids total de fruit des placettes par essence.

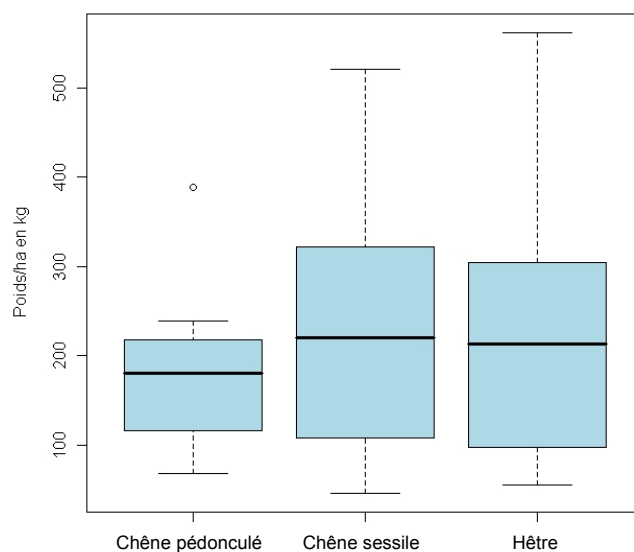


Figure 9 : Distribution des moyennes de masse de fruit/ha des placettes par essence de 1995 à 2004.

Compte tenu du résultat du test de normalité des données de hêtre, le test de Kruskal-Wallis est appliqué pour comparer les moyennes décennales des trois essences. La puissance de ce dernier (Kruskal-Wallis chi-squared = 0,68, $p = 0,71$) amène à conclure que les moyennes décennales 1995-2004 en terme de poids/ha des trois essences feuillues du réseau RENECOFOR ne sont pas différentes (H_0 non rejetée).

- Analyse du poids unitaire du fruit

En raison de la morphologie différente entre les fruits des genres *Fagus* et *Quercus*, il ne sert à rien de montrer une quelconque différence au niveau du poids unitaire. En revanche, il peut être intéressant de voir s'il existe une différence de poids unitaire de fruit entre les deux chênes. Les moyennes décennales des deux essences suivant une loi normale, un test t est utilisé. On ne détecte pas de différence significative de poids unitaire entre les deux chênes ($t = -0,31$, $p = 0,76$), comme le souligne la figure 10.

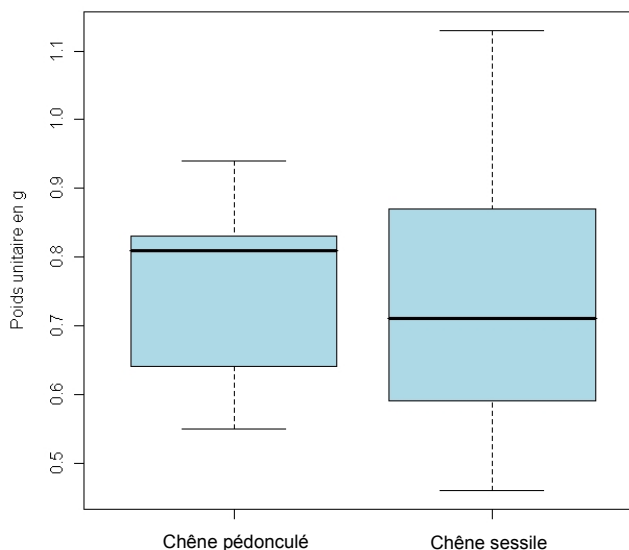


Figure 10 : Distribution des moyennes de poids unitaire (g) de fruit des placettes des deux chênes de 1995 à 2004.

3.2 Corrélation entre variables explicatives

Pour cette vérification, des Analyses en Composantes Principales (ACP) par essence sont réalisées afin d'observer d'une part les corrélations entre les variables explicatives (qui sont toutes quantitatives) et d'autre part pour caractériser les variables qui composent chaque essence. Ce type de traitement est également utilisé pour la simplification de grands jeux de données. Cet outil se base sur la visualisation des variables par ordination et projection sur des plans factoriels. Sur le cercle des corrélations, les variables les plus proches du périmètre sont les mieux représentées contrairement à celles situées près du centre (GEORGIN, 2002). Seules les coordonnées des variables supérieures à la valeur absolue de 0,75 indiquant un bon niveau de représentation sur l'axe étudié, sont prises en compte.

Les différents résultats sont présentés par essence. Seuls les résultats pour les chênes sont présentés dans ce chapitre, les tableaux des coordonnées et les graphiques des autres essences sont rassemblés en annexe 7. Enfin, la simple dénomination des variables météorologiques, bioclimatiques et phénologiques sous-tend qu'il s'agit de moyennes décennales.

D'une manière générale des variables sont communes aux trois espèces à savoir: la date de début de débourrement (10% du peuplement), le nombre de jours où la température est inférieure ou égale à 0°C, les saisons de végétation ainsi que la température minimale.

Le chêne pédonculé est en plus porté par des variables intégratrices telles que le type d'humus et le rapport carbone/azote ainsi que par des variables dendrométriques : diamètre (1, 30 m), surface de houppier. Le chêne sessile diffère entre autres du hêtre par les variables bioclimatiques. Les bilans hydriques marquent le jeu de données du chêne sessile, tandis que les différents indices d'évapotranspiration portent celui du hêtre.

- Chêne pédonculé et sessile

Les trois premiers axes expliquent plus de 50 % de la variance. Le premier axe rassemble à la fois des variables phénologiques, météorologiques et géographiques. Le troisième axe est caractérisé par des variables pédologiques.

Pour le premier facteur deux groupes de variables sont corrélés négativement. Le premier groupe est composé par la date de début de débourrement et la longitude. L'effet du gradient Est-Ouest sur le débourrement a par ailleurs déjà été observé sur le réseau RENECOFOR (LEBOURGEOIS et GODFROY, 2006; LEBOURGEOIS, *et al.*, 2008). Le second groupe est largement constitué par les saisons de végétation, l'évapotranspiration de Thornthwaite et les températures maximales et moyennes. Le troisième axe est porté par : Ca^{2+} , Mg^{2+} et la capacité d'échange cationique.

Le tableau 7 et la figure 11 illustrent ces différents résultats.

Tableau 7 : Coordonnées des variables sur les 3 premiers axes pour les deux chênes.

Variables	F1 (25,8%)	F2 (40,1%)	F3 (52,6%)
Date de début de débourrement (10% du peuplement, dd1_M)	0,81	0,09	-0,10
Longitude (X_L2E)	0,77	-0,04	-0,15
Mg^{2+} (MGECH40)	0,43	-0,25	0,75
Capacité d'échange cationique (CECE40)	0,42	-0,20	0,79
Ca^{2+} (CAECH40)	0,41	-0,17	0,79
Températures maximales (TxMMG)	-0,75	-0,45	-0,05
Evapotranspiration de Thornthwaite (ETPchMMG)	-0,78	-0,43	0,16
Saison de végétation (sv11_M)	-0,83	0,12	-0,03
Températures minimales (TmMMG)	-0,86	-0,39	0,17
Saison de végétation (sv99_M)	-0,91	0,19	0,02
Saison de végétation (sv19_M)	-0,92	-0,05	-0,03

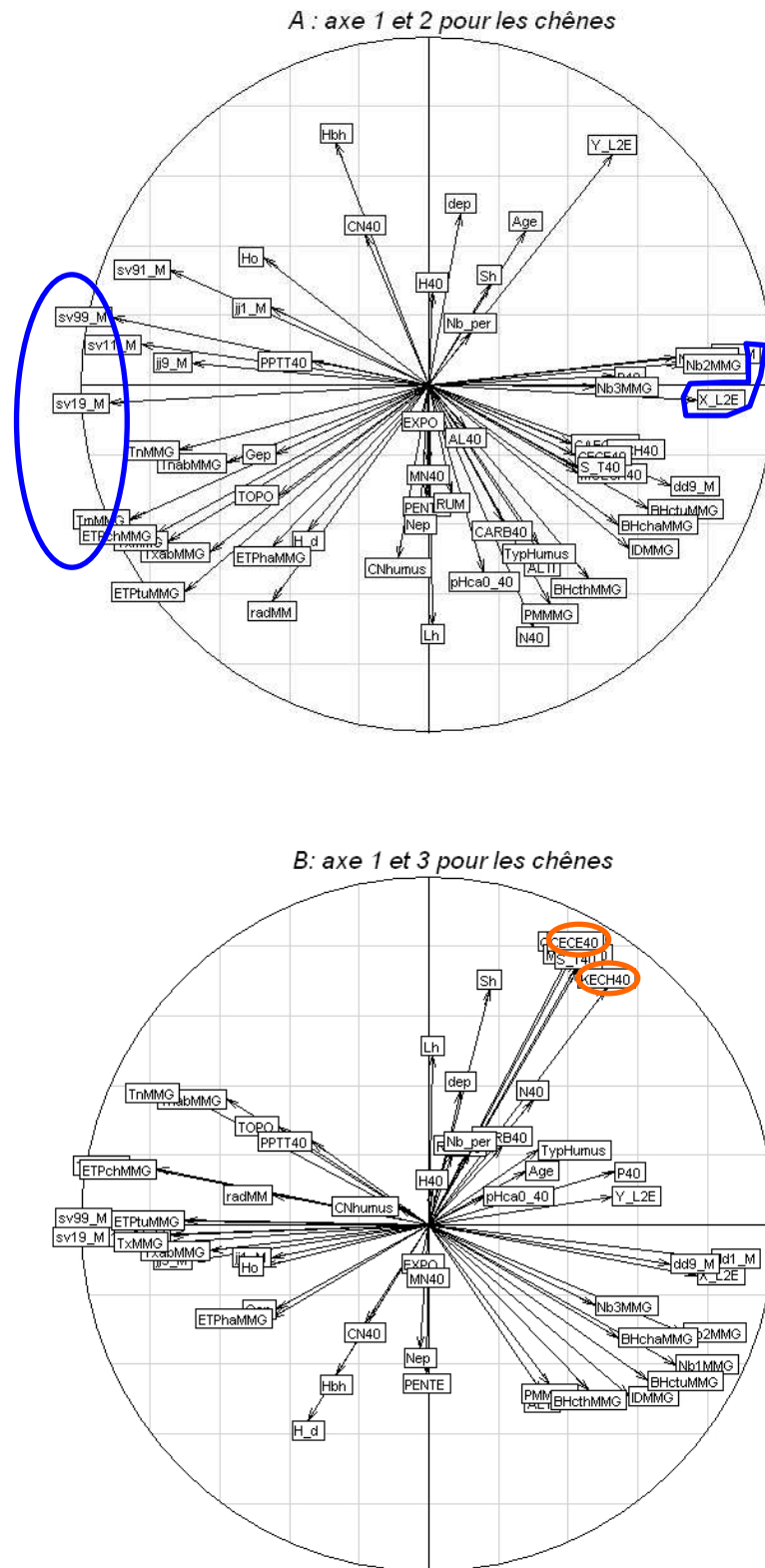


Figure 11 : Cercle des corrélations des variables explicatives des chênes. A : axe 1 et 2. B : axe 1 et 3.

- Chêne pédonculé

Plus de 60% de la variance est expliquée par les deux premiers axes. En plus des variables déjà listées pour les deux chênes, on note entre autres la présence sur l'axe n°1 de la latitude et des nombres de températures négatives. L'axe n°2 est en partie porté par le diamètre et la surface du houppier. Ces deux variables sont négativement reliées aux précipitations et au bilan hydrique de Thornthwaite. Les axes sont détaillés en annexe 7.

- Chêne sessile

Les quatre premiers axes représentent près de 60% de la variance expliquée. Le premier facteur est constitué par des variables phénologiques, météorologiques et géographiques. Seul le rapport C/N est la variable la mieux représentée du quatrième facteur (voir annexe 7).

Pour le premier axe, deux groupes de variables sont corrélés négativement. Le premier se compose des dates de début de débourrement, de la longitude et du nombre de jour où la température est inférieure ou égale à 0°C. Pour le second on retrouve toutes les variables phénologiques, les températures (minimales, moyennes et maximales) ainsi que les ETP de Turc et de Thornthwaite.

- Hêtre

Plus de 50% de la variance est expliquée par les deux premiers axes. Deux groupes de variables reliés négativement composent le premier axe. L'indice de De Martonne, les dates de début de débourrement et les bilans climatiques s'opposent aux saisons de végétations et à la hauteur dominante. Pour le second axe un groupe constitué d'indices synthétiques de richesse du sol est corrélé négativement à l'aluminium. L'annexe 7 détaille les différents axes.

3.3 Analyse des moyennes décennales des fructifications

Les variables explicatives sélectionnées avec les deux démarches (bibliographique et exploratoire), sont confrontées aux variables à expliquer par la méthode du « stepAIC » développée sous le logiciel R. Cette méthode ascendante puis descendante, sélectionne le modèle optimal par la plus petite valeur de l'AIC (Akaike Information Criterion). Cette valeur représente le meilleur compromis entre le minimum de variables et le maximum de variance expliquée. Malgré cela, il existe un risque important d'obtenir des modèles avec des variables qui contribuent peu au caractère explicatif du modèle (modèle sur-paramétré). Pour limiter ce risque, le nombre de placettes par essence a été pris en compte avec pour consigne d'environ dix placettes par variables à sélectionner. Cependant, les variables choisies par la méthode du step AIC n'ont pas toujours un pouvoir explicatif pertinent.

L'anova de type I pour les modèles à variable unique et de type III pour les modèles à variables multiples, a permis de contrôler la significativité des variables retenues exprimée par un test t (noté $\Pr(>|t|)$) de la nullité (PASQUET, 2002; AZAÏS et BARDET, 2006). Ainsi, une valeur de ce test supérieure à 0,05 (erreur de première espèce) confirme l'hypothèse de nullité de la variable, jugée alors comme non significative. Lorsque deux variables ont été sélectionnées, un test de corrélation a été effectué et consigné en annexe 8. Les résultats exposés dans le tableau 8 sont issus de la confrontation des variables explicatives aux moyennes décennales (1995-2004) des variables à expliquer. Afin d'alléger le texte de cette partie, le nom des variables est simplement évoqué sans préciser qu'il s'agit des moyennes décennales (1995-2004) pour les variables météorologiques et bioclimatiques. D'autre part, quand les modèles faisaient apparaître des variables météorologiques ou bioclimatiques, des modèles plus fins ont été construits avec des moyennes mensuelles décennales (et non plus des variables saisonnières). D'une manière générale, les approches bibliographiques et exploratoires aboutissent aux mêmes modèles pour l'ensemble des variables à expliquer.

Tableau 8 : Comparaison des modèles avec les différentes approches de sélection de variables explicatives (moyennes décennales de 1995-2004). CPS = chênes, CHP = chêne pédonculé, CHS = chêne sessile, HET = hêtre. Signif. codes: 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 '.' 1

Variables à expliquer	Nbre de placettes initiales	Nbre de variables à retenir	Approche bibliographique/exploratoire : Variables retenues	R ² aj	AIC
CPS, nbre de fruits/ha	27	2	Rien		
CPS, poids/ha	28	2	Rien		
CPS, poids unitaire	27	2	Stock de terre fine* + Nbre de jour de la température minimale de janvier comprise entre 0 et 5°C *	0,30	-104,31
CHP, nbre de fruits/ha	6	Tendance	Rien		
CHP, poids/ha	7	Tendance	- Réservoir utilisable maximal*	0,57	59,24
CHP, poids unitaire	6	Tendance	-pHca**	0,93	-38,19
CHS, nbre de fruits/ha	21	2	Stock de terre fine* + rapport carbone/azote*	0,29	477,54
CHS, poids/ha	21	2	Stock de terre fine* + Nbre de jour de la température minimale de novembre comprise entre 0 et 5°C *	0,36	197,57
CHS, poids unitaire	21	2	Stock de terre fine* + taux de saturation*	0,33	-79,26
HET, nbre de fruits/ha	15	1	- Longitude***	0,73	368,55
HET, poids/ha	14	1	Rien		
HET, poids unitaire	14	1	Surface du houppier**	0,43	-113,37

Aucune variable ne permet d'expliquer les variations de nombre de fruits/ha et de poids/ha pour les deux chênes réunis. En revanche, le poids unitaire du gland pour les deux chênes est expliqué à la fois par le stock de terre fine (PPTT40) et le nombre de jours dans le mois de janvier où la température est comprise entre 0 et 5°C (Nb3jan). Ces deux variables étant significatives à 5 %.

Bien qu'il ne s'agisse que de tendance pour le chêne pédonculé, deux variables pédologiques semblent influencer sur le poids/ha et le poids unitaire : la réserve utile (RUM) et le pH (pHca0_40).

Concernant le chêne sessile, le stock de terre fine des premiers horizons est commun aux trois variables à expliquer. Cette variable édaphique est d'ailleurs significative au seuil de 5%, voire 1% pour le poids/ha. Ce stock de terre fine s'accompagne soit du rapport carbone/azote (CN40) pour le nombre de fruits/ha, soit du taux de saturation (S_T40) pour le poids unitaire du gland. Ces deux rapports reflètent la richesse chimique des sols. Pour le poids/ha, le nombre moyen de jours où la température du mois de janvier est comprise entre 0 et 5°C constitue la deuxième variable du modèle. C'est la construction de ce modèle qui a été choisie pour illustrer le raisonnement de sélection de variables explicatives par le « stepAIC ».

Dans un premier temps, l'outil sélectionne le stock de terre fine (PPTT40) avec le nombre de jour où la température est comprise entre 0 et 5°C (Nb3MMG) pour un indice d'Akaike de 201. L'anova de type III fait apparaître une significativité au seuil de 5% uniquement pour le stock de terre fine (voir figure 12).

```
lm(KGFMM~PPTT40 + Nb3MMG)
Anova type="III"
Anova Table (Type III tests)
Response: KGFMM
Sum Sq Df F value Pr(>F)
(Intercept) 49438 1 3.8490 0.06543 .
PPTT40 94941 1 7.3917 0.01408 *
Nb3MMG 48010 1 3.7378 0.06908 .
Residuals 231198 18
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Figure 12 : Détail de l'Anova de type III pour le modèle de poids/ha des deux chênes. Stock de terre fine (PPTT40) et + Nbre de jour de la température minimale comprise entre 0 et 5°C (Nb3MMG).

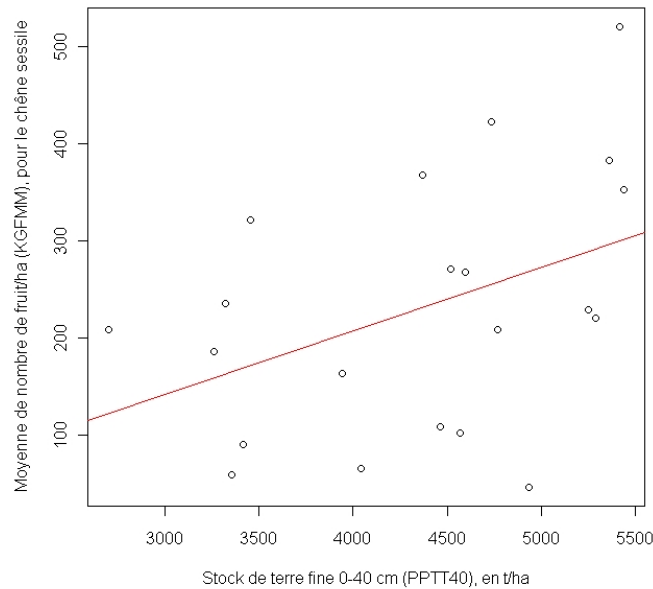


Figure 13 : Nuage de points de la moyenne décennale de poids/ha de gland en fonction du stock de terre fine chez le chêne sessile.

La relation entre le poids/ha et le stock de terre fine présentée en figure 13, ne résulte pas de points extrêmes et paraît linéaire. En revanche pour la deuxième variable, on cherche à savoir si les moyennes décennales mensuelles de nombre de jours où la température est comprise entre 0 et 5°C peuvent améliorer l’AIC. Le step AIC sélectionne le mois de novembre (Nb3nov) qui est significatif au seuil de 5% (voir figure 14) pour un AIC de 197 ($\Delta = 4$).

```
lm(KGFMM~PPTT40 + Nb3nov
Anova type="III"
Anova Table (Type III tests)
Response: KGFMM
      Sum Sq Df F value  Pr(>F)
(Intercept) 83494 1 7.8129 0.011960 *
PPTT40      125829 1 11.7744 0.002977 **
Nb3nov       86850 1 8.1270 0.010614 *
Residuals   192359 18
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Figure 14 : Détail de l’Anova de type III pour le modèle de poids/ha des deux chênes. Stock de terre fine (PPTT40) et + Nbre de jour de la température minimale de novembre comprise entre 0 et 5°C (Nb3nov).


```
lm(KGFMM~PPTT40 + Nb3nov)
Residuals:
      Min       1Q   Median       3Q      Max
-146.749 -100.854   6.154   81.174  153.109

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -883.5634   316.1043  -2.795  0.01196 *
PPTT40         0.1095     0.0319   3.431  0.00298 **
Nb3nov         51.5984    18.0997   2.851  0.01061 *

Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 103.4 on 18 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.4306,    Adjusted R-squared:  0.3673
F-statistic: 6.805 on 2 and 18 DF,  p-value: 0.006295
```

Figure 15 : Détail du modèle de poids/ha des deux chênes. Stock de terre fine (PPTT40) et Nbre de jour de la température minimale de novembre comprise entre 0 et 5°C (Nb3nov).

La figure 16A montre la distribution des résidus autour d’une droite de Henri. Cette dernière relie les points formés par les quantiles empiriques des résidus, en fonction des quantiles théoriques d’une loi normale (AZAÏS et BARDET, 2006). Si les moyennes décennales du mois de novembre améliorent l’AIC, il est à constater que la normalité de la distribution des résidus reste discutable.

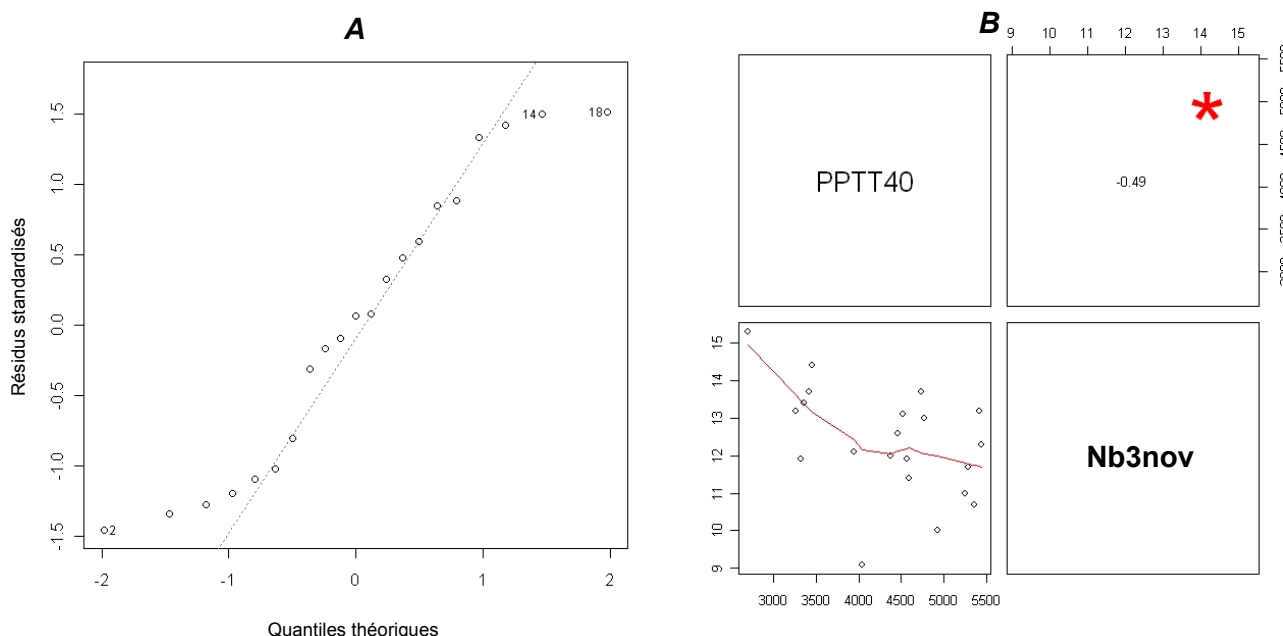


Figure 16 : Droite de Henri des résidus du modèle final pour la moyenne décennale de poids/ha de gland pour le chêne sessile (A), et corrélation entre les deux variables (B).

La figure 16B montre de plus, que les deux variables du modèle sont corrélées.

Dans la figure 17, les coefficients des variables prises individuellement sont de même ordre de grandeur lorsque ces dernières participent conjointement au modèle. Le modèle peut être retenu.

```
lm(KGFMM~PPTT40)
Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -53.6715    144.4645  -0.372  0.7144
PPTT40       0.0653      0.0327   1.997  0.0604 .
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Residual standard error: 121.2 on 19 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.1735,    Adjusted R-squared:  0.13
F-statistic: 3.988 on 1 and 19 DF,  p-value: 0.06036

lm(KGFMM~Nb3nov)
Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -35.20     246.57  -0.143  0.888
Nb311        21.44      19.81   1.082  0.293
Residual standard error: 129.4 on 19 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.05808,    Adjusted R-squared:  0.008507
F-statistic: 1.172 on 1 and 19 DF,  p-value: 0.2926
```

Figure 17 : Détail des variables prises individuellement du modèle de poids/ha des deux chênes. Stock de terre fine (PPTT40) et Nbre de jour de la température minimale de novembre comprise entre 0 et 5°C (Nb3nov).

Les démarches de sélection par stepAIC sont consignées en annexe n°8 pour toutes les variables à expliquer des essences étudiées.

Enfin, au regard du tableau 8, on note que pour le hêtre la longueur (XL2E) explique 73% de la variance avec une forte significativité pour le nombre de fruit/ha. Pour le poids unitaire, il s'agit de la surface de houppier de 1995 (Sh).

3.4 Analyse des fructifications annuelles

L'évaluation des fructifications annuelles est soumise à la contrainte des arrières-effets. En plus des mesures répétées sur chaque placette, il faut tenir compte de l'auto-corrélation temporelle liée aux fructifications des années précédentes. Des modèles linéaires mixtes prenant en compte l'auto-corrélation temporelle des résidus, sont utilisés grâce au paramètre corARMA de la librairie « nlme » développée sous le logiciel R (PINHEIRO et BATES, 2000). Cette structure de modèle nécessite l'identification des paramètres d'auto régression (p) et de moyenne mobile (q). Plus explicitement, ces indices traduisent le nombre d'années antérieures à prendre en compte et le nombre d'années servant à calculer la moyenne mobile. Le graphique de la fonction d'auto corrélation ACF sous R permet de visualiser l'éventuelle auto-corrélation temporelle. De manière générale, la construction des modèles a été guidée par une approche pragmatique visant à vérifier à chaque étape de l'élaboration, les paramètres d'auto régression.

3.4.1 Normalisation des variables à expliquer

Le tableau 9 recense les transformations des variables à expliquer afin d'avoir un maximum de placettes dont les valeurs annuelles suivent une loi normale. Par convention, un seuil acceptable du nombre de placettes ne suivant pas une loi normale est fixé à 5%.

Tableau 9 : Normalisation des variables à expliquer.

Variable à expliquer	Nbre de placettes	Transformation de la variable à expliquer	Nbre acceptable de placettes non normales (5%)	Nbre réel de placettes non normales	H0
Chênes, nbre de fruits/ha	28	$\log(\text{nbre de fruits}/\text{m}^2+1)$	1,4	4	N
Chênes, poids/ha	29	$\log((\text{poids}/\text{m}^2)+1)$	2,61	4	N
Chênes, poids unitaire	28	Poids unitaire	1,4	4	N
Chêne pédonculé, nbre de fruits/ha	7	$\log((\text{nbre de fruits}/\text{m}^2^{0,5})+1)$	0,35	0	O
Chêne pédonculé, poids/ha	8	$\log((\text{poids}/\text{m}^2^{0,5})+1)$	0,4	1	O
Chêne pédonculé, poids unitaire	7	Poids unitaire	0,35	0	O
Chêne sessile, nbre de fruits/ha	21	$\log(\text{nbre de fruits}/\text{m}^2+1)$	1,05	3	N
Chêne sessile, poids/ha	21	$\log((\text{poids}/\text{m}^2^{0,5})+1)$	1,05	3	N
Chêne sessile, poids unitaire	21	Poids unitaire	1,05	4	N
Hêtre, nbre de fruits/ha	16	$\log((\text{nbre de fruits}/\text{m}^2^{0,5})+1)$	0,8	0	O
Hêtre, poids/ha	15	$\log((\text{poids}/\text{m}^2^{0,5})+1)$	0,75	2	O
Hêtre, poids unitaire	15	Poids unitaire	0,75	6	N

La transformation améliore faiblement la normalité des variables à expliquer pour le chêne pédonculé et pour la majeure partie des variables du hêtre. Pour les chênes et plus particulièrement pour le chêne sessile, la normalisation des données ne permet pas d'infléchir le nombre de placettes « non normales ». Généralement, le nombre de fruits/ha est transformé en logarithme de la racine carré du nombre de fruit/m², tout comme le poids/ha que l'on retrouve sous la forme du logarithme de la racine carré du poids/m². Le poids unitaire reste inchangé. L'annexe 9 détaille les résultats pour les différentes placettes.

3.4.2 Résultats des modèles linéaires pour les fructifications annuelles

Compte tenu du nombre très important de variables, une sélection des plus pertinentes a été effectuée en prenant en compte les résultats obtenus par l'approche multivariée et par la bibliographie:

- Dates de début de débourrement (10 et 90% du peuplement, DD1, DD9) ;
- Dates de début de jaunissement (10 et 90% du peuplement, JJ1, JJ9) ;
- Saisons de végétations (SV11, SV19, SV91, SV99) ;
- Précipitations (P), Températures moyennes (Tm) ;
- Nbre de jours où la température minimale est comprise entre -5 et 5°C (Nb1, Nb2, Nb3) ;
- Evapotranspirations, Bilans climatiques (Thorntwaite, Turc, Hargreaves).

Dans un second temps, des regroupements saisonniers de ce jeu de données ont été réalisés en rassemblant pour l'hiver les mois de décembre (année $n-1$) janvier et février, pour le printemps les mois de mars avril et mai, pour l'été les mois de juin, juillet et d'août et pour l'automne les mois de septembre, octobre et novembre. Enfin pour toutes ces variables explicatives, l'année précédente a été testée (notée par « $_1$ » derrière le nom de la variable et l'année). Pour le nombre de fruits/ha, le poids/ha et le poids unitaire, les deux années précédentes ont été prises en compte.

3.4.2.1 Chêne pédonculé et sessile

Concernant les chênes, une analyse sur le regroupement a été menée par l'intermédiaire des graphiques d'auto corrélation temporelle (figure 18). Il s'avère que les rythmes de fructifications des deux espèces ne sont pas synchronisés. Le jeu de données ne permet pas d'imputer cette différence à la spéciation tant le nombre de placette par essence est déséquilibré. Aussi à cette étape, le travail au profit uniquement du chêne sessile a été décidé. Tout comme précédemment, le raisonnement n'est présenté que sur un volet spécifique, en l'occurrence le nombre de fruits/ha du chêne sessile, renvoyant le lecteur à l'annexe n°10 pour les autres analyses.

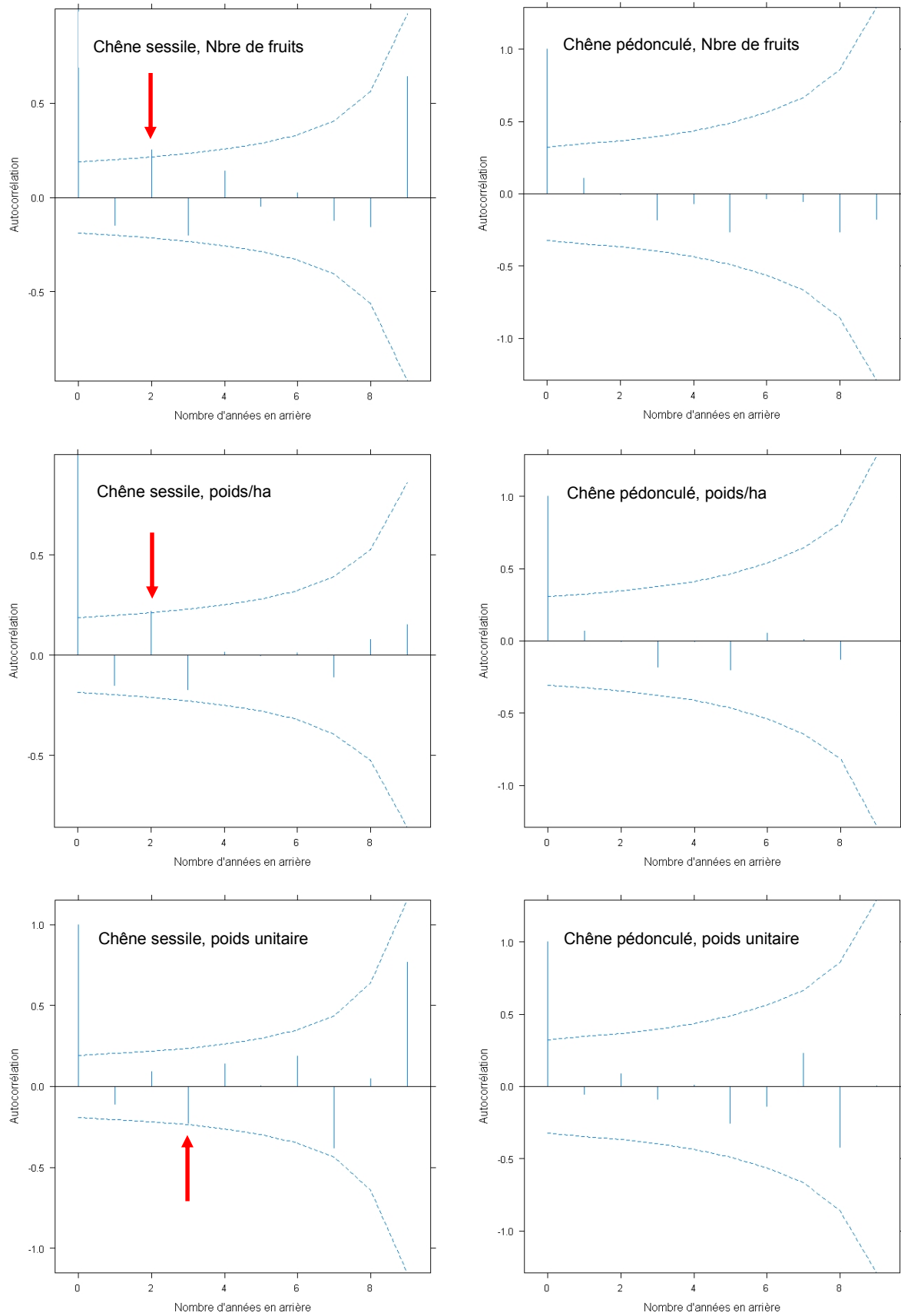


Figure 18 : Graphes d'auto corrélation temporelle. L'auto corrélation est caractérisée par le franchissement de l'intervalle de confiance (en pointillé) par les barres illustrant les rythmes des fructifications (flèche rouge).

3.4.2.2 Chêne sessile, nombre de fruits/ha

De nombreuses étapes ont été nécessaires pour parvenir au modèle final. Tout comme pour l'analyse des moyennes décennales, la sélection des modèles s'est faite par comparaison d'AIC ayant le même nombre d'enregistrements. Il est important de rappeler que les variables météorologiques et bioclimatiques ne présentaient pas de valeurs manquantes contrairement à la phénologie. Dans un premier temps un modèle avec les variables météorologiques et bioclimatiques les plus pertinentes a été construit auxquelles se sont confrontées par la suite les variables phénologiques ayant un nombre d'enregistrements plus restreint.

- Stabilisation du corARMA

A ce stade de l'analyse, différentes combinaisons possibles des deux paramètres du corARMA (p et q), ont été testées. L'étude ne portant que sur 10 ans, les tests ont été effectués avec des valeurs s'échelonnant de 1 à 5. Le résultat a conduit à retenir le modèle suivant :

- $\log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2)+1) \sim 1, \text{corARMA}(p=2, q=1)$, pour un AIC de 673 et un nombre d'observations de 186.

Ce résultat provisoire signifie que l'on prend en compte les deux années précédentes et que la moyenne mobile est calculée en prenant une année de part et d'autre de l'année n .

- Effet de la fructification antérieure

Durant cette étape, l'objectif a été de voir si les fructifications antérieures amélioraient le modèle. Là encore, contraint par les 10 années sur lesquelles se déroulent l'étude, les fructifications de l'année $n-1$ et $n-2$ ont été testées. La comparaison de modèle par AIC, nécessitant un même nombre d'enregistrements, le modèle précédent a été contraint aux nombres d'observations des fructifications des années n , $n-1$ et $n-2$.

Le résultat a fait apparaître qu'en plus de la fenêtre de deux ans déplacée sur le jeu de données, les fructifications de l'année $n-2$ amélioraient sensiblement la valeur de l'AIC :

- $\log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2)+1) \sim 1, \text{corARMA}(p=2, q=1)$, AIC= 444, Nbre= 121
- $\log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2)+1) \sim \log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2_{-1})+1), \text{corARMA}(p=2, q=1)$, AIC= 448
Nbre= 121
- $\log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2)+1) \sim \log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2_{-2})+1), \text{corARMA}(p=2, q=1)$, AIC= 439
Nbre= 121

- Confrontation aux variables explicatives de l'année n

Fort du précédent modèle, toutes les saisons des variables météorologiques et bioclimatiques avec un jeu de données restreint uniquement aux fructifications des années n et $n-2$ ont été expérimentées. Il est apparu que l'évapotranspiration automnale de Hargreaves corrigeait positivement l'AIC :

- **$\log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2)+1) \sim + \log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2_{-2})+1) - \text{évapotranspiration automnale de Hargreaves}$** , $\text{corARMA}(\rho=2, q=1)$, AIC= 488 Nbre= 134

- Confrontation aux variables explicatives de l'année $n-1$

Le précédent modèle a été soumis aux mêmes variables que précédemment mais à l'année $n-1$. Le nombre de jours où la température est comprise entre 0 et 5°C de l'hiver précédent est ressorti.

- **$\log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2)+1) \sim + \log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2_{-2})+1) + \text{Nbre de jours où la température minimale hivernale est comprise entre 0 et 5°C}_1$** , $\text{corARMA}(\rho=2, q=1)$, AIC= 482 Nbre= 134

- Confrontation aux variables explicatives de l'année n et $n-1$

L'objectif de cette étape a été de voir si les deux variables précédentes prises conjointement, amélioreraient le modèle. Il s'est avéré que la valeur de l'AIC était légèrement plus basse.

- **$\log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2)+1) \sim + \log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2_{-2})+1) + - \text{évapotranspiration automnale de Hargreaves}$** , **$+ \text{Nbre de jours où la température minimale hivernale est comprise entre 0 et 5°C}_1$** , $\text{corARMA}(\rho=2, q=1)$, AIC= 481 Nbre= 134

- Confrontation aux variables trouvées lors de la sélection des variables décennales

Pour le nombre de fruits/ha, le stock de terre fine des premiers horizons avait été retenu. Cette variable ajoutée aux précédentes, diminuent encore l'AIC. Par la suite, les différentes valeurs du paramètre du corARMA ont été re-testées. Les différents résultats de l'AIC ont conduit à diminuer la valeur de q d'une unité.

- **$\log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2)+1) \sim + \log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2_{-2})+1) + - \text{évapotranspiration automnale de Hargreaves}$** , **$+ \text{Nbre de jours où la température minimale hivernale est comprise entre 0 et 5°C}_1$** , **$+ \text{Stock de terre fine}$** , $\text{corARMA}(\rho=2, q=0)$, AIC= 479 Nbre= 134

- Confrontation aux variables phénologiques

Les trois précédentes variables ont été comparées une à une puis toutes ensemble à toutes les variables phénologiques de l'année n puis de l'année $n-1$. La date de début de débourrement (10% du peuplement débourré) de l'année $n-1$ a considérablement amélioré le modèle au point d'« écraser » les trois autres variables. Pour cette étape, la plus petite valeur de l'AIC renvoyait à la date de début de débourrement de l'année précédente. Il est à signaler que d'autres modèles étaient tous autant éligibles au regard de la différence de l'AIC ($\Delta \leq 2$).

- **$\log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2)+1) \sim + \log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2_{-2})+1) + \text{Date de début de débourrement (10\% du peuplement)}_{-1}$, corARMA($p=2,q=0$), AIC= 287 Nbre= 81**
- $\log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2)+1) \sim + \log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2_{-2})+1) + \text{Date de début de débourrement (10\% du peuplement)}_{-1} + \text{Stock de terre fine}$, corARMA($p=2,q=0$), AIC= 288 Nbre= 81
- $\log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2)+1) \sim + \log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2_{-2})+1) + \text{Nbre de jours où la température minimale hivernale est comprise entre 0 et 5°C} + \text{Date de début de débourrement (10\% du peuplement)}_{-1}$, corARMA($p=2,q=0$), AIC= 288 Nbre= 81
- $\log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2)+1) \sim + \log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2_{-2})+1) + \text{Saison de végétation (91)}$, corARMA($p=2,q=0$), AIC= 288 Nbre= 81

- Finalisation du modèle

Pour cette dernière étape, les paramètres du corARMA, l'influence des années antérieures du nombre de fruit ainsi que les modèles du paragraphe précédent ont été contrôlés. Le modèle final prend donc en compte le nombre de fruit de l'année $n-1$ avec la saison de végétation de l'année n sans paramètres de corARMA. La différence d'AIC avec le modèle suivant est supérieure à 2 ($292 - 287 = 5$).

- **$\log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2)+1) \sim + \log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2_{-1})+1) + \text{Saison de végétation (DD9-JJ1)}$, AIC= 287 Nbre= 83**
- $\log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2)+1) \sim + \log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2_{-1})+1) + \text{Stock de terre fine} + \text{Date de début de débourrement (10\% du peuplement)}_{-1}$, AIC= 292 Nbre= 83

La figure 19 détaille les caractéristiques du modèle. L'anova montre que les deux variables prises conjointement dans le modèle sont significatives. Ces mêmes variables prises individuellement sont également significatives mais les résultats ne sont pas détaillés.


```

summary
Linear mixed-effects model fit by maximum likelihood
      AIC      BIC    logLik
 422.2694 436.0373 -206.1347
Random effects:
Formula: ~1 | CODE
      (Intercept) Residual
StdDev:   0.4082889 1.381539
Fixed effects: log((NBFM2) + 1) ~ log((NBFM2_1) + 1) + SV91
              Value Std.Error DF   t-value p-value
(Intercept)   -0.8353040 1.2758191  93 -0.6547198  0.5143
log((NBFM2_1) + 1) -0.2038196 0.0881566  93 -2.3120166  0.0230
SV91           0.0201589 0.0073247  93  2.7521852  0.0071
Correlation:
              (Intr) 1((N+1
log((NBFM2_1) + 1) -0.150
SV91                -0.980 -0.004
Standardized Within-Group Residuals:
      Min      Q1      Med      Q3      Max
-1.92465551 -0.83375167 -0.09087796  0.76015906  2.03315706
Number of Observations: 116
Number of Groups: 21
anova
              numDF denDF   F-value p-value
(Intercept)         1    93 178.85970 <.0001
log((NBFM2_1) + 1)  1    93  5.29691  0.0236
SV91                 1    93  7.57452  0.0071

```

Figure 19 : Détail du modèle du nombre de fruits pour le chêne sessile.

Les illustrations suivantes montrent en (A) que le modèle initial présente une auto-corrélation temporelle à la deuxième année. Sur la figure (B), cette auto-corrélation est corrigée par le modèle constitué de la fructification de l'année précédente et de la saison de végétation de l'année en cours. En (C), la distribution des résidus ne présente pas de grande disparité.

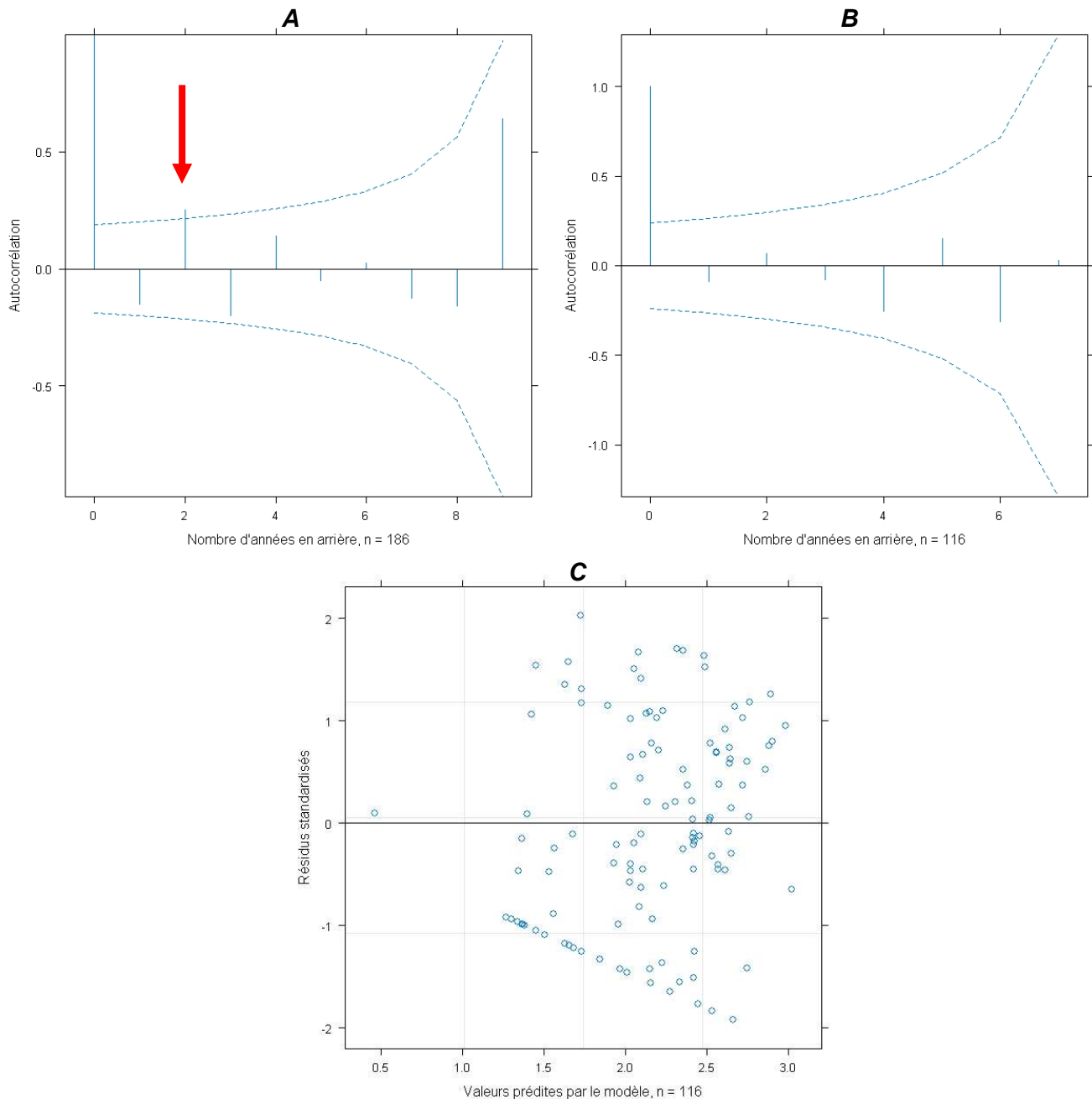


Figure 20 : Caractéristiques du modèle du nombre de fruits/ha (logarithme du nombre de fruit/m²) du chêne sessile : en (A) auto corrélation temporelle initiale, en (B) auto corrélation temporelle finale, en (C) distribution des résidus en fonction des valeurs prédites.

Le modèle retenu pour le nombre de fruit du chêne sessile est le suivant :

$$\log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2)+1) \sim -\log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2_{-1})+1) + \text{saison de végétation (DD9-JJ1)}$$

3.4.2.3 Chêne sessile, poids/ha

Pour le poids/ha de glands de chêne sessile (logarithme de la racine carrée du poids/m²), le modèle final retient les fructifications de l'année $n-2$, l'évapotranspiration estivale de Thornthwaite de l'année $n-1$ et la durée de végétation de l'année n (date de début de débourrement pour 90% du peuplement jusqu'à la date de début de jaunissement pour 10% du peuplement). Toutes ces variables sont significatives au seuil de 5% qu'elles soient prises conjointement ou individuellement.

$$\log((\text{poids}/\text{m}^{2 \times 0,5})+1) \sim \log((\text{poids}/\text{m}^{2 \times 0,5}_{-2})+1) - \text{évapotranspiration estivale de Thornthwaite}_{-1} + \text{saison de végétation (DD9-JJ1)}$$

Seul l'évapotranspiration estivale de Thornthwaite de l'année $n-1$ influe négativement sur la variable à expliquer.

3.4.2.4 Chêne sessile, poids unitaire

On retrouve exactement les mêmes variables explicatives pour le poids unitaire du gland que pour le poids/ha chez le chêne sessile. Les variables sont toutes significatives (tests individuels et collectifs) exceptées le poids unitaire de l'année $n-2$.

$$\text{Poids unitaire} \sim +\text{Poids unitaire}_{-2} - \text{évapotranspiration estivale de Thornthwaite}_{-1} + \text{saison de végétation (DD9-JJ1)}$$

3.4.2.5 Hêtre, nombre de fruits/ha

Le nombre de faînes/ha (logarithme de la racine carrée du nombre de faîne/m²) croît avec le nombre de faîne de l'année précédente de l'année $n-2$. Cette production diminue avec le bilan climatique estival de Turc de l'année précédente et la date de début de débourrement (10% du peuplement débourré). Toutes les variables sont significatives (tests individuels et collectifs), exceptées la date de début de débourrement qui n'est significatif qu'individuellement (5%).

$$\log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^{2 \times 0,5}) + 1) \sim \log((\text{Nbre de fruits}/\text{m}^2_{-2 \times 0,5}) + 1) - \text{bilan climatique estival de Turc}_{-1} - \text{date de début de débourrement (10\% de peuplement)}$$

3.4.2.6 Hêtre, poids/ha

Le poids/ha de faîne (logarithme de la racine carrée de la masse de faîne/m²) décroît avec cette même variable à l'année $n-1$ et le bilan climatique estival de Thornthwaite de l'année précédente. Les deux variables sont très significatives.

$$\log((\text{poids}/\text{m}^{2\wedge 0.5}) + 1) \sim - \log((\text{poids}/\text{m}^2_{-1}\wedge 0.5) + 1) - \text{bilan climatique estival de Thornthwaite}$$

3.4.2.7 Hêtre, poids unitaire

L'unique variable sélectionnée (poids unitaire de l'année $n-2$) n'est pas significative, le modèle est rejeté.

Le tableau suivant reprend des résultats de ce chapitre.

Tableau 10 : Modèles des fructifications annuelles pour le chêne sessile et le hêtre (période 1995-2004). Signif. codes: 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Variable à expliquer	Nombre d'obs	Modèle
Chêne sessile: Log((Nbre de fruits/m ²)+1)	116	- 0,83 - 0,20(log((nbre de fruits/m ² _1))* + 0,02(saison de végétation(DD9-JJ1))**
Chêne sessile: Log((poids/m ² ^{0,5})+1)	120	2,91 + 0,19(log((poids/m ² _2)+1))** - 0,03(évapotranspiration estivale de Thornthwaite_1)*** + 0,008(saison de végétation (DD9-JJ1))*
Chêne sessile: Poids unitaire	108	2,10 + 0,09(poids unitaire_2) - 0,02(évapotranspiration estivale de Thornthwaite_1)*** + 0,005(saison de végétation (DD9-JJ1))*
Hêtre: Log((Nbre de fruits/m ² ^{0,5})+1)	93	1,99 + 0,34(log((nbre de fruits/m ² _2 ^{0,5})+1))** - 0,01(bilan climatique estival de Turc_1)** - 0,01(date de début de débourrement (10% du peuplement))
Hêtre: Log((poids/m ² ^{0,5})+1)	83	0,96 - 0,47(log((poids/m ² _1 ^{0,5})+1))***- 0,01(bilan climatique estival de Thornthwaite_1)***
Hêtre: Poids unitaire	71	Modèle rejeté

DISCUSSION

4. DISCUSSION

4.1 Niveau moyen des fructifications

Le résultat le plus inattendu est certainement l'absence de différence du poids sec de graines à l'hectare entre les trois espèces, bien que la morphologie des graines diffère selon le genre (figure 9). La médiane de poids sec à l'hectare pour ces trois essences tourne autour des 200 kg. Concernant le poids unitaire des glands, le test n'indique pas non plus de différence significative entre le gland du chêne sessile et celui du chêne pédonculé.

Pour comprendre les fructifications à l'échelle décennale, la procédure de sélection du stepAIC retient des variables cohérentes avec la littérature scientifique et cela avec les deux démarches : bibliographique et exploratoire. Durant cette analyse, aucune variable phénologique n'est ressortie avec la méthode de sélection du stepAIC. Pour les trois fagacées étudiées, trois domaines de variables explicatives ressortent, à savoir : pédologique, météorologique et géographique. Ces domaines illustrent les conditions stationnelles. Les caractères du sol sont majoritairement sélectionnés avec des seuils de significativité souvent inférieurs à 5% voire 1%.

Pour le chêne sessile, le stock de terre fine des premiers horizons (0-40 cm) apparaît comme un facteur influant positivement et fortement sur le nombre de fruits à l'hectare, le poids à l'hectare, et le poids unitaire. La terre fine ressort également pour les fructifications feuillues dans les conclusions de l'étude menée sur la variabilité des litières du réseau RENECOFOR (PASQUET, 2002). Cette première variable est majoritairement suivie de variables synthétiques traduisant les potentialités de la richesse du sol (rapport C/N et taux de saturation). Le stock de terre fine des premiers horizons de surface (0-40cm) représente en quelque sorte la disponibilité de terre pour la rhizosphère en termes d'alimentation en eau et d'ancrage physique du végétal. Cette variable est positivement reliée à la topographie locale, exprimée par des quantités de terre plus importante en bas de versant (annexe 7, chêne sessile axe 1 et 2).

Le rapport carbone azote est un rapport entre le taux de carbone et le taux d'azote des matières organiques (JABIOL, *et al.*, 1995). Une valeur faible reflète un degré de décomposition rapide de la matière organique dans le sol (LOZET et MATHIEU, 2002). En revanche dans cette étude, le nombre de fruits/ha du chêne sessile est lié à une terre fine abondante avec un rapport carbone azote élevé. La littérature scientifique n'offre pas d'éléments de réponse quant à l'effet de sol présentant une minéralisation lente de la matière organique sur le nombre de fleur.

Le taux de saturation du sol décrit quant à lui, la partie apportée par les cations basiques échangeables par rapport à la capacité totale d'échange (GOBAT, *et al.*, 2003). Ce rapport illustre la capacité d'un sol à accueillir les bases échangeables.

De manière plus générale, ces résultats montrent que le chêne sessile fructifie plus et produit de gros

glands lorsqu'il croît sur des sols sans éléments grossiers avec une capacité importante de stockage en bases échangeables.

Il ressort en outre que la fructification et la taille des glands varient selon la rigueur du climat, en l'occurrence le nombre de jour des mois de novembre et janvier où la température est comprise entre 0 et 5°C. On retrouve également dans la littérature scientifique l'intérêt, entre autres, d'hivers cléments pour la croissance chez cette espèce (LEBOURGEOIS, *et al.*, 2004; LEBOURGEOIS, 2006, 2007).

Concernant le hêtre, il apparaît que la production de faînes décroît fortement d'Ouest en Est. La longitude n'apparaît pas dans la bibliographie comme une variable explicative des faînées. Tout au plus, une mention souligne l'effet d'un gradient Ouest-Est sur des fructifications de chênes blancs et rouges en Amérique du Nord (LUSK, *et al.*, 2007). Quoi qu'il en soit, la longitude en tant que telle ne saurait expliquer les variations de fructification. Dans le jeu de données, la longitude est corrélée au type d'humus (annexe 7, hêtre axe 1 et 3), laissant apparaître des formes d'humus de plus en plus carbonatées au fur et à mesure que l'on se déplace vers l'Est. La longitude révèle donc divers paramètres à savoir : la continentalité en terme météorologique, la pédologie avec des sols plus « calcaires » vers l'Est, mais surtout l'implantation géographique des placettes de hêtre du réseau RENECOFOR. Cette implantation ne reflète d'ailleurs pas entièrement l'aire naturelle de cette essence.

Le poids des faînes croît avec la surface du houppier. On retrouve d'ailleurs cette même variable reliée à la production florale dans d'autres travaux (OSWALD, 1984; NILSSON et WÄSTLJUNG, 1987). La surface du houppier est généralement négativement reliée au nombre de tiges (DEY, 1995). Il aurait été intéressant, dans la démarche exploratoire, de coder les types de peuplement des placettes du réseau RENECOFOR afin de voir si l'origine du traitement sylvicole (futaie régulière, taillis-sous-futaie) pouvait être une variable significative dans l'explication des fructifications.

D'autre part, même si le nombre de perturbations (éclaircies sylvicoles et tempêtes) durant la période de l'étude n'est pas ressorti dans l'explication des moyennes décennales, il aurait été intéressant de tester l'effet du prélèvement de chaque perturbation afin de voir si, par exemple, les houppiers des arbres restants bénéficiaient de l'espace disponible.

4.2 Fructifications annuelles

Les modèles linéaires mixtes prenant en compte l'auto-corrélation temporelle ont révélé des variables bioclimatiques et phénologiques comme principales sources d'explication des fructifications chez le chêne sessile et le hêtre. Il est important de signaler que la phénologie n'avait jamais été étudiée sur les arbres forestiers comme variable explicative du niveau des fructifications.

Cependant, ces résultats doivent être tempérés au regard du jeu de données. La sélection des modèles s'est effectuée par le plus petit indice d'AIC et n'a pas conservé les paramètres d'auto-régression. De plus, ces modèles avec auto-corrélation temporelle s'appliquent pour de grandes séries. Or, la période d'étude ne couvre que dix années et les variables phénologiques ne courent que

sur huit années.

Quoi qu'il en soit pour ces deux essences, les fructifications de l'année antérieure ou des deux précédentes conditionnent celle de l'année n . Compte tenu de la courte période d'étude, il n'a été possible que de remonter à l'année $n-2$. Il aurait été judicieux, pour le chêne, d'observer l'influence des fructifications des années $n-3$ et $n-4$ aux regards des travaux menés sur les chênes blancs en Amérique du Nord (SORK et BRAMBLE, 1993; SORK, *et al.*, 1993a).

Pour les indices bioclimatiques, les ETP et les bilans hydriques estivaux de l'année précédente affectent respectivement les glandées et les faînées de l'année. Concernant la phénologie, la saison de végétation et dans une moindre mesure la date de début de débourrement, conditionnent les glandées et les faînées.

La saison de végétation et les indices d'évapotranspiration sont négativement reliés à la longitude dans le cas du chêne sessile (annexe 7, chêne sessile, axe 1 et 4) mais pas dans celui du hêtre (LEBOURGEOIS et GODFROY, 2006). Ce constat s'explique par un nombre plus important, dans l'Ouest de la France, de placettes de chêne sessile (annexe 2). Ces indices ressortaient déjà sur les axes des ACP lors de l'analyse des corrélations entre les variables explicatives (annexe 7, chêne sessile et hêtre). La majeure partie des variables phénologiques et des indices bioclimatiques sont significatifs au seuil minimal de 5%.

Pour le chêne sessile, les variables retenues sont identiques pour les modèles du poids à l'hectare (plus précisément poids/m²) et du poids unitaire. Les poids à l'hectare et unitaire de l'année $n-2$ influent positivement sur ces mêmes variables à expliquer à l'année n . Il convient de signaler que seul le poids à l'hectare de l'année $n-2$ est significatif.

La sécheresse de l'année précédente affecte quant à elle les poids à l'hectare et unitaire de l'année n . L'évapotranspiration estivale reflète la sécheresse et c'est durant cette période à l'année $n-1$ qu'apparaît l'initiation florale (BONNET-MASIMBERT, 1984). La sécheresse estivale ressort également sur la compréhension des fructifications des chênes blancs d'Amérique du Nord mais à l'année n (SORK et BRAMBLE, 1993; SORK, *et al.*, 1993a). Ce même résultat est aussi observé à l'année n pour la croissance puisque les déficits hydriques estivaux limitent le développement foliaire et contraignent la photosynthèse (LEBOURGEOIS, 2006).

Au-delà des arrières-effets des productions précédentes ($n-2$) et des conditions climatiques estivales ($n-1$), la production et la taille des glands augmentent les années où la saison de végétation est la plus longue.

Pour le nombre de fruits à l'hectare, la fructification précédente en termes de nombre de fruits, pénalise la fructification de l'année n . Ce résultat corrobore celui publié par Sork pour les chênes blancs américains (SORK et BRAMBLE, 1993; SORK, *et al.*, 1993a; SORK, *et al.*, 1993b).

Chez le hêtre, le rythme biennal de fructification est bien connu (OSWALD, 1984; PIOVESAN et ADAMS, 2001). Cette biennalité est pareillement constatée chez *Fagus crenata* (YASUMURA, *et al.*,

2006) Ce rythme pourrait être expliqué par un stockage énergétique durant l'année de faible production (NILSSON et WÄSTLJUNG, 1987). Dans cette étude, la biennialité du hêtre s'exprime par l'impact positif des fructifications de l'année $n-2$ pour le nombre de fruits à l'hectare et par l'effet négatif de la faînée de l'année antérieure pour le poids à l'hectare.

Les conditions de sécheresse estivale de l'année antérieure, exprimées par le bilan climatique de Turc, ainsi que la date de début de débourrement (10% du peuplement) conditionnent à la baisse la production du nombre de fruit à l'hectare. D'un point de vue phénologique, la date de début de débourrement est négativement reliée à la saison de végétation (annexe 7, hêtre, axe 1 et 2). Ainsi un débourrement tardif pourrait être en partie la cause d'une saison de végétation courte pénalisant le nombre de fruit à l'hectare. Cette production est stimulée par la faînée de l'année $n-2$.

Pour le poids à l'hectare de faînes, c'est non pas le bilan climatique estival de l'année antérieure de Turc mais celui de Thornthwaite qui pèse sur cette variable. La sécheresse estivale n'est d'ailleurs pas toujours signalée comme un facteur négatif dans l'explication des faînées. Piovesan et Adams (2001), par exemple, considère qu'elle permet à l'année $n-1$ un relâchement immédiat des réserves vers l'initiation florale. Il est à signaler que la sécheresse chez ces auteurs est calculée à partir des mois de juin et de juillet ; contrairement à cette étude qui prend en plus en compte le mois d'août. Pour la croissance radiale, la sécheresse estivale a un impact négatif mais à l'année n (LEBOURGEOIS, 2007).

Pour affiner ces modèles annuels, il serait intéressant d'intégrer les données de fructification postérieures à 2004 en lien avec des données météorologiques mensuelles et non plus saisonnières. Ce jeu de données plus conséquent permettrait d'affiner ces premiers modèles explicatifs et offrirait la possibilité de réaliser des modèles prédictifs. Les divers *scenarii* évoquées par le GIEC pourraient être alors incorporés afin d'évaluer les conséquences du réchauffement climatique sur la production et les rythmes des fructifications. Ces années supplémentaires de récolte présenteraient l'intérêt de poursuivre les investigations sur les arrières-effets des fructifications antérieures à l'année $n-2$ notamment pour le chêne. La continuité de ce travail offrirait la possibilité de parfaire la connaissance du rythme des fructifications du hêtre qui semble être accéléré par le réchauffement climatique. En effet, de récents travaux menés en Suède montrent que la moyenne des faînées étaient de 4 à 6 ans pour la période couvrant le XVII^{ième} siècle jusqu'au début des années 1960. Cette moyenne chute à 2,5 années depuis les 30 dernières années (ÖVERGAARD, *et al.*, 2007). La poursuite de cette étude pourrait par exemple prendre en compte la spatialisation des sites en soulignant des synchronisations régionales en termes de dynamique population, notamment pour les placettes de hêtre dont la distribution altitudinale est plus importante que chez le chêne sessile (figure 2). Ces effets « Moran » sont d'ailleurs largement plébiscités par la littérature scientifique (KOENIG, *et al.*, 1999; SATAKE et IWASA, 2002a, 2002b; LIEBHOLD, *et al.*, 2004).

Une synergie serait également à développer avec une étude des granivores pour lesquels les rythmes des fructifications ne sont pas sans effets. Le concept d'antiprédation évoqué par Janzen visant à

saturer l'écosystème de graines afin de pérenniser l'espèce est un paramètre très fréquent dans l'explication de l'alternance des fructifications (KELLY, 1994; PIOVESAN et ADAMS, 2001; KELLY et SORK, 2002; SCHAUBER, *et al.*, 2002; SELAS, 2003; KOENIG et KNOPS, 2005). De plus, de nombreux exemples traitent des relations entre granivores et graines : geai des chênes (DUCOUSSO et PETIT, 1994), mésange charbonnière et faînes (PERRINS, 1966), prédation des rongeurs et plantigrades sur les graines (NILSSON et WÄSTLJUNG, 1987; HANSSON, 1998; SATO, 2000; SELAS, 2003).

Il existe traditionnellement un compromis entre croissance et reproduction chez les espèces longévives. A ce titre, il serait également judicieux de coupler ce travail avec la dendrochronologie afin d'observer d'éventuelles corrélations entre largeur de cerne et fructification. Des études ont montré une corrélation négative entre accroissement radial et fructification (OSWALD, 1984; MONKS et KELLY, 2006). Fort de ce constat, des chercheurs en Nouvelle Zélande ont élaboré l'hypothèse qu'un rythme accéléré des fructifications induit par le réchauffement climatique, aux dépens de la croissance, mettaient certaines communautés végétales en péril (SCHAUBER, *et al.*, 2002). Loin d'être si alarmiste, la simple prise en compte de la relation croissance/fructification apporterait des éclairages quant aux futures aires potentielles de répartition des espèces forestières (BADEAU, *et al.*, 2005).

CONCLUSION

5. CONCLUSION

Les travaux menés durant cette étude mettent en lumière quelques mécanismes pouvant expliquer les rythmes de fructifications des essences feuillues du réseau RENECOFOR pour la période 1995-2004. Pour les fagacées étudiées, des éléments édaphiques et géographiques décrivent les productions moyennes des fructifications. Du point de vue des productions annuelles pour le chêne sessile et le hêtre, ce sont principalement les fructifications antérieures, la sécheresse estivale de l'année précédente et la phénologie de l'année en cours qui orchestrent l'élaboration de la graine. Ces résultats confortent les hypothèses énoncées en introduction quant aux effets des conditions du milieu, des conditions météorologiques et des productions antérieures sur les fructifications. Ces conclusions renforcent également le caractère biennal du hêtre. Cette particularité s'avère intéressante pour la gestion forestière, et plus particulièrement pour le renouvellement des peuplements par régénération naturelle.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- AUCHMOODY, L.R., SMITH, H.C., WALTERS, R.S., (1993). - Acorn production in northern red oak stands in northwestern Pennsylvania. *Research Paper - Northeastern Forest Experiment Station, USDA Forest Service*, pp. 1-5.
- AZAÏS, J.M., BARDET, J.M., (2006). - Le modèle linéaire par l'exemple. *Dunod*, pp. 21, 65, 183.
- BADEAU, V., DUPOUEY, J.L., CLUZEAU, C., DRAPIER, J., (2005). - Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2100. *Forêt - entreprise*, 162, pp. 25-29.
- BAIZE, D., JABIOL, B., (1995). - Guide pour la description des sols. *INRA-Paris*, pp 278-288
- BENBRAHIM, M., ULRICH, E., BRÊTHES, A., LANIER, M., CECCHINI, S., (2009). - RENECOFOR - Chimie et stock des horizons minéraux jusqu'à 100 cm de profondeur dans les peuplements du réseau. *Office National des Forêts, Départements des Recherches Techniques*, pp. 1-108
- BONNET-MASIMBERT, M., (1973). - Problème de l'irrégularité des glandées : peut être un aspect entomologique ? *Revue Forestière Française*, N°5, pp. 375-377.
- BONNET-MASIMBERT, M., (1984). - Pollinisations et productions végétales. Biologie florale et cycle de reproduction de quelques arbres forestiers: Douglas, pin sylvestre, chênes. *INRA, Paris*, pp. 219-243
- CLUZEAU, C., ULRICH, E., LANIER, M., GARNIER, F., (1998). - RENECOFOR - Interprétation des mesures dendrométriques de 1991 à 1995 des 102 peuplements du réseau. *Office National des Forêts, Départements des Recherches Techniques*, 309 pages.
- CONNOR, K., FERET, P.P., ADAMS, R.E., (1976). - Variation in *Quercus* mast production. *Virginia Journal of Science*, 27, pp. 54.
- DEY, D. C., (1995). - Acorn production in red oak. *Forest Research Information Paper - Ontario Forest Research Institute*, pp. 1-22.
- DUCOUSSO, A., PETIT, R., (1994). - Le geai des chênes. *Forêt - entreprise*, 97, pp. 60-64.
- GARBAYE, J., LEROY, P., (1974). - Influence de la fertilisation sur la production de glands en Forêt de Bercé et Forêt de Boulogne. *Revue Forestière Française*, 3, pp. 223-228.
- GARRISON, B. A., WACHS, R. L., JONES, J. S., TRIGGS, M. L., (1998). - Visual counts of acorns of California black oak (*Quercus kelloggii*) as an indicator of mast production. *Western Journal of Applied Forestry*, 13, pp. 27-31.
- GEORGIN, J.-P., (2002). - Analyse interactive des données (ACP, AFC) avec Excel 2000, théorie et pratique. *Presses Universitaires Rennes*, pp. 1-261
- GIEC. (2007). - Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II, III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Equipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. *GIEC, Suisse, ...* pp 1-103.
- GOBAT, J. M., ARAGNO, M., MATTHEY, W., (2003). - Le Sol vivant. *Presses polytechniques et universitaires romandes*, p 69.

- GREENBER, C. H., PARRESOL, B. R., (2000). - Acorn production characteristics of Southern Appalachian oaks: a simple method to predict within-year acorn crop size. *Research Paper - Southern Research Station, USDA Forest Service*, 14 pages.
- HANSSON, L., (1998). - Mast seeding and population dynamics of rodents: one factor is not enough. *Oikos*, 82, pp. 591-594.
- HILTON, G. M., PACKHAM, J. R., (1997). - A sixteen-year record of regional and temporal variation in the fruiting of beech (*Fagus sylvatica* L.) in England (1980-1995). *Forestry (Oxford)*, 70, pp. 7-16.
- HILTON, G. M., PACKHAM, J. R., (2003). - Variation in the masting of common beech (*Fagus sylvatica*, L.) in northern Europe over two centuries (1800-2001). *Forestry (Oxford)*, 76, pp. 319-328.
- IWASA, Y., SATAKE, A., (2004). - Mechanisms inducing spatially extended synchrony in mast seeding: the role of pollen coupling and environmental fluctuation. *Ecological Research*, 19, pp. 13-20.
- JABIOL, B., BRÊTHES, A., TOUTAIN, F., PONGE, J.-F., BRUN, J.-J., (1995). - L'humus sous toutes ses formes. *ENGREF-Nancy*, p 61
- JARRET, P., (2004). - Guide des sylvicultures, Chênaie atlantique. *Lavoisier, Paris*, 335 pages.
- KELLY, D., (1994). - The evolutionary ecology of mast seeding. *Trends in Ecology & Evolution*, 9, pp. 465-470.
- KELLY, D., SORK, V. L., (2002). - Mast seeding in perennial plants: why, how, where? *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33, pp. 427-447.
- KELLY, D., HART, D. E., ALLEN, R. B., (2001). - Evaluating the wind pollination benefits of mast seeding. *Ecology*, 82, pp. 117-126.
- KOENIG, W. D., KNOPS, J. M. H., (2002). - The behavioral ecology of masting in oaks. *Oak forest ecosystems: ecology and management for wildlife, McShea and W. M. Healy, eds.*, pp. 129-148.
- KOENIG, W. D., KNOPS, J. M. H., (2005). - The Mystery of Masting in Trees. *American Scientist*, 93, pp. 340-347.
- KOENIG, W. D., KNOPS, J. M. H., CARMEN, W. J., STANBACK, M. T., MUMME, R. L., (1994). - Estimating acorn crops using visual surveys. *Canadian Journal of Forest Research*, 24, pp. 2105-2112.
- KOENIG, W. D., KNOPS, J. M. H., CARMEN, W. J., STANBACK, M. T., (1999). - Spatial dynamics in the absence of dispersal: acorn production by oaks in central coastal California. *Ecography*, 22, pp. 499-506.
- KON, H., NODA, T., TERAZAWA, K., KOYAMA, H., YASAKA, M., (2005). - Evolutionary advantages of mast seeding in *Fagus crenata*. *Journal of Ecology*, 93, pp. 1148-1155.
- LEBOURGEOIS, F., (1997). - Etude dendrochronologique des 102 peuplements du réseau. pp 1-47.
- LEBOURGEOIS, F., (2006). - Sensibilité au climat des Chênes sessile et pédonculé dans le réseau RENECOFOR. Comparaison avec les hêtraies. *Revue Forestière Française*, 1, pp 29-42.
- LEBOURGEOIS, F., (2007). - Sensibilité des écosystèmes forestiers au climat: ce que Renécofor nous a appris. *RDV techniques, Office National des Forêts*, n° 15, pp. 64-68.
- LEBOURGEOIS, F., GODFROY, P., (2006). - Analyse de la variabilité spatiale et temporelle et du déterminisme climatique de la phénologie des peuplements du Réseau National de Suivi à Long Terme des Ecosystèmes Forestiers (RENECOFOR). pp. 1-42.

- LEBOURGEOIS, F., PIEDALLU, C., (2005). - Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière à partir d'indices bioclimatiques. *Revue Forestière Française*, 4, pp 351-356.
- 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). *Ann. For. Sci.*, 61, pp 1-12.
- LEBOURGEOIS, F., PIERRAT, J.-C., PERREZ, V., PIEDALLU, C., CECCHINI, S., ULRICH, E., (2008). - Déterminisme de la phénologie des forêts tempérées françaises: étude sur les peuplements du réseau RENECOFOR. *Revue Forestière Française*, 3, pp 323-343.
- LE TACON, F., OSWALD, H., (1977). - Influence de la fertilité minérale sur la fructification du Hêtre (*Fagus sylvatica*). *Annales des Sciences Forestières*, 34 (2), pp. 89-109.
- LIEBHOLD, A., SORK, V., PELTONEN, M., KOENIG, W., BJORNSTAD, O. N., WESTFALL, R., ELKINTON, J., KNOPS, J. M. H., (2004). - Within-population spatial synchrony in mast seeding of North American oaks. *Oikos*, 104, pp. 156-164.
- LOZET, J., MATHIEU, C., (2002). - Dictionnaire de science du sol. *Editions TEC&DOC*, p 90
- LUSK, J. J., SWIHART, R. K., GOHEEN, J. R., (2007). - Correlates of interspecific synchrony and interannual variation in seed production by deciduous trees. *Forest Ecology and Management*, In Press, Corrected Proof, pp. 1-15.
- MATTHEWS, J. D., (1955). - The influence of weather on the frequency of Beech mast years in England. *Forestry*, 28, pp. 107-116.
- MONKS, A., KELLY, D., (2006). - Testing the resource-matching hypothesis in the mast seeding tree *Nothofagus truncata* (Fagaceae). *Austral Ecology*, 31, pp. 366-375.
- NILSSON, S. G., WÄSTLJUNG, U., (1987). - Seed predation and cross-pollination in mast-seeding beech (*Fagus sylvatica*) patches. *Ecology*, 68, pp. 260-265.
- OSWALD, H., (1984). - Floraison, pollinisation et fructification chez le hêtre (*Fagus sylvatica* L.). *Institut National de la Recherche Agronomique, pollinisations et productions végétales*, pp. 243-258
- ÖVERGAARD, R., GEMMEL, P., KARLSSON, M., (2007). - Effects of weather conditions on mast year frequency in beech (*Fagus sylvatica* L.) in Sweden. *Forestry*, 80, pp. 555-565.
- PASQUET, K., (2002). - Approche par régression linéaire multiple des sources de variabilité de la litière sur les 102 placettes du réseau RENECOFOR de 1996 à 2000, stage de maîtrise d'Ingénierie Mathématique. pp. 1-40.
- PERRINS, C. M., (1966). - Population fluctuations and clutch-size in the great tit, *Parus major* L. *Birds*, 59, pp. 601-646.
- PHILIPPE, G., (1989). - Intensification de la production de glands sur chêne sessile deux ans après une fertilisation complète - FD de Loches (37) -. *Annales du département Forêt du Cemagref*, n°5, pp. 141-149.
- PHILIPPE, G., CONCHE, J., (2006). - La fertilisation azotée: un outil parmi d'autres pour remédier à la pénurie de glands. *Rendez-vous techniques*, 13, pp. 78-84.
- PICARD, J., (1995). - Evaluation d'une glandée. *Forêts, Office National des*, pp. 1-27.
- PINHEIRO, J. C., BATES, D. M., (2000). - Mixed-Effects Models in S and S-PLUS. *Springer*, pp. 236-243
- PIOVESAN, G., ADAMS, J. M., (2001). - Masting behaviour in beech: linking reproduction and climatic variation. *Canadian Journal of Botany*, 79, pp. 1039-1047.

- 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>.
- ROUGON, C., ROQUES, A., ROUGON, D.J.L., (1995). - Impact des insectes sur les potentialités de régénération des Chênes (*Quercus* spp.) en France. Mise en évidence d'une action méconnue des curculionides phyllophages sur les organes reproducteurs avant la fécondation. *J. Appl. Ent.*, 119, pp. 455-463.
- SATAKE, A., IWASA, Y., (2002a). - Spatially limited pollen exchange and a long-range synchronization of trees. *Ecology*, 83, pp. 993-1005.
- SATAKE, A., IWASA, Y., (2002b). - The synchronized and intermittent reproduction of forest trees is mediated by the Moran effect, only in association with pollen coupling. *Journal of Ecology*, 90, pp. 830-838.
- SATO, T., (2000). - Effects of rodent gnawing on the survival of current-year seedlings of *Quercus crispula*. *Ecological Research*, 15, pp. 335-344.
- SCHAUBER, E. M., KELLY, D., TURCHIN, P., SIMON, C., LEE, W. G., ALLEN, R. B., PAYTON, I. J., WILSON, P. R., COWAN, P. E., BROCKIE, R. E., (2002). - Masting by eighteen New Zealand plant species: the role of temperature as a synchronizing cue. *Ecology*, 83, pp. 1214-1225.
- SCHÜTZ, J. P., (1990). - Sylviculture 1, Principes d'éducation des forêts. *Presses polytechniques et universitaires romandes*, p 5, 12.
- SELAS, V., (2003). - Moth outbreaks in relation to oak masting and population levels of small mammals: An alternative explanation to the mammal-predation hypothesis. *Population Ecology*, 45, pp. 157-159.
- SORK, V. L., BRAMBLE, J., (1993). - Prediction of acorn crops in three species of North American oaks: *Quercus alba*, *Q. rubra* and *Q. velutina*. *Annales des Sciences Forestières*, 50, Suppl 1, pp. 128-136.
- SORK, V. L., BRAMBLE, J., SEXTON, O., (1993a). - Ecology of mast-fruiting in three species of North American deciduous oaks. *Ecology*, 74, pp. 528-541.
- SORK, V. L., FLEMING, T. H., ESTRADA, A., (1993b). - Evolutionary ecology of mast-seeding in temperate and tropical oaks (*Quercus* spp.). *Vegetatio*, 107-108, pp. 133-147.
- SUZUKI, W., OSUMI, K., MASAKI, T., (2005). - Mast seeding and its spatial scale in *Fagus crenata* in northern Japan. *Forest Ecology and Management*, 205, pp. 105-116.
- TESSIER du CROS, E., LE TACON, F., NEPVEU, G., PARDE, J., PERRIN, R.J.T., (1981). - Le Hêtre. *INRA, Paris*, 613 pages.
- ULRICH, E., BREDI, N., DUPOUEY, J.-L., (1997). - Manuel de référence n°12 pour les observations phénologiques. pp 1-17.
- WACHTER, H., (1964). - The connections between weather beech mast years. *Forstarchiv*, 35, pp. 69-78.
- YASUMURA, Y., HIKISAKA, K., HIROSE, T., (2006). - Resource allocation to vegetative and reproductive growth in relation to mast seeding in *Fagus crenata*. *Forest Ecology and Management*, 229, pp. 228-233.

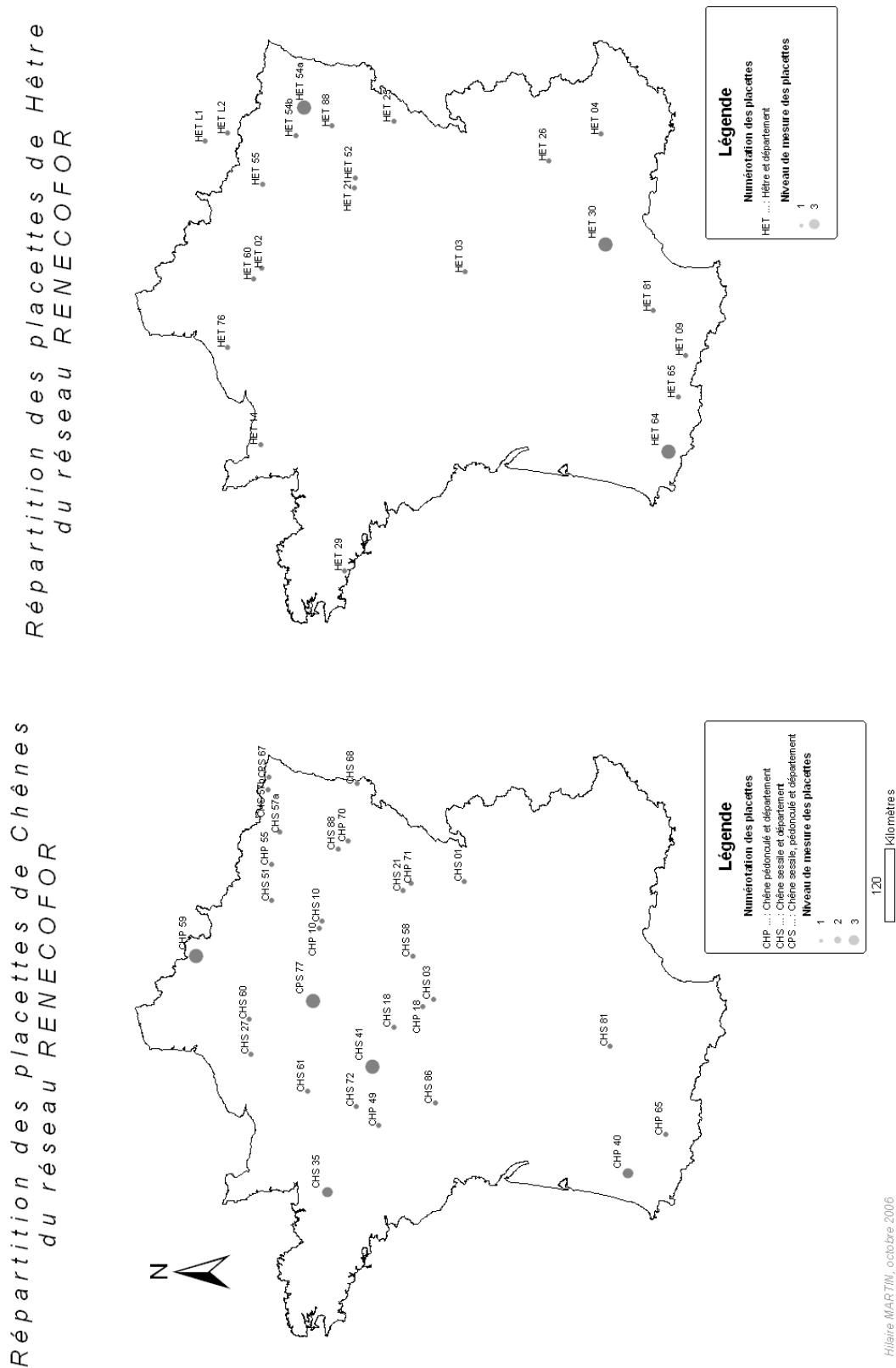
ANNEXES

ANNEXES

Annexe 1 : La peinture du « mois de novembre » extraite du chef-d'œuvre des frères Limbourg « Les très riches heures », retrace le battage d'une glandée pour le panage des porcs. Enluminure commandée par le Duc Jean de Berry au début du XV^{ième} siècle.



Annexe 2 : Carte de répartition et de niveau de mesure des placettes de chênes et de hêtre.



Filaine MARTIN, octobre 2006

Annexe 3 : liste initiale des variables dépendantes et indépendantes

	Codes	Unités	Variables
Variables à expliquer	KGF	kg/ha	Equivalent des fructifications en poids sec/ha de l'essence principale.
	NBF	nbre/ha	Nombre de fruits de l'essence principale à l'hectare.
	GNB		Poids unitaire de la graine de l'essence principale.
Variables stationnelles	Alti	m	Altitude de la placette sous couvert.
	Pente	%	Pente de la placette
	Expo		Exposition de la placette : -2=nord, -1=nord-est, 0=est, 1=sud-est, 2=sud, 1=sud-ouest, 0=ouest, -1=nord-ouest, 0=plat
	Topo		Topographie locale de la placette : 0=terrain plat, 0=replat, -1=haut de versant, 0=mi-versant, 1=bas de versant, -1=sommet arrondi
	LambertX	m	Abscisse de la placette sous couvert dans le système de coordonnées Lambert II étendu.
	LambertY	m	Ordonnée de la placette sous couvert dans le système de coordonnées Lambert II étendu.
Variables édaphiques	PPTT	t/ha	Stocks de terre fine (0-40 et 40-100 cm)
	CARB	t/ha	Stocks de carbone organique (0-40 et 40-100 cm)
	N	t/ha	Stocks d'azote organique (0-40 cm et 40-100 cm)
	P	Kg/ha	Stocks de phosphore extractible (0-40 cm et 40-100 cm)
	CAECH	Kg/ha	Stocks de cations basiques échangeables : Ca ²⁺ (0-40 cm et 40-100 cm)
	MGECH	Kg/ha	Stocks de cations basiques échangeables : Mg ²⁺ (0-40 cm et 40-100 cm)
	KECH	Kg/ha	Stocks de cations basiques échangeables : K ⁺ (0-40 et 40-100 cm)
	AL	Kg/ha	Stocks de cations acides échangeables : Al ³⁺ (0-40 cm et 40-100 cm)
	H	Kg/ha	Stocks de cations acides échangeables : H ⁺ (0-40 cm et 40-100 cm)
	MN	Kg/ha	Stocks de cations acides échangeables : Mn ²⁺ (0-40 cm et 40-100 cm)
	CECE	Kg/ha	Stocks de la capacité d'échange cationique (0-40 cm et 40-100 cm)
	CN		Rapport carbone sur azote (0-40 cm et 40-100 cm)
	CN humus		Rapport carbone sur azote dans l'humus
	S/T0-40		Taux de saturation en %, pour l'horizon 0-40 cm
	pHca0-40 et RUM		pH et réservoir utilisable maximal (en mm/m)
	TypHumus		Humus : 1=mor, 2=dysmoder, 3=moder & hémimoder, 4=oligomull & dysmull, 5=eumull & mésomull
Variables phénologiques	DD1		Date en jour julien pour laquelle 10% des arbres présentent sur au moins 20% du houppier des bourgeons ouverts avec des petites feuilles
	DD9		Date en jour julien pour laquelle 90% des arbres présentent sur au moins 20% du houppier des bourgeons ouverts avec des petites feuilles

JJ1		Date en jour julien pour laquelle 10% des arbres présentent un jaunissement sur au moins 20% du houppier	
JJ9		Date en jour julien pour laquelle 90% des arbres présentent un jaunissement sur au moins 20% du houppier	
SV11		Différence entre les stades 10% pour le débourrement et 10% pour le jaunissement (durée la plus longue)	
SV19		Différence entre stades 10% pour le débour. et 90% pour le jaunissement	
SV91		Différence entre les stades 90% pour le débourrement et 10% pour le jaunissement	
SV99		Différence entre les stades 90% pour le débourrement et 90% pour le jaunissement	
<hr/>			
Age	Nbre Année	Age du peuplement en 1995	
dep	cm	Moyenne des diamètres de l'essence principale en 1995	
Ho	m	Hauteur moyenne de l'essence principale en 1995	
Gep	%	Pourcentage de l'essence principale en surface terrière/ha en 1995	
Nep		Nombre de tige/ha de l'essence principale sur la placette en 1995	
H_d		Moyenne du rapport hauteur diamètre de l'essence principale (36 arbres « observations ») en 1995	
Variables dendrométriques	Hbh	m	Moyenne de la hauteur de la base du houppier de l'essence principale en 1995 prise sur les 36 arbres « observations »
	Lh	%	Moyenne de la longueur relative du houppier par rapport à la hauteur totale des 36 arbres « observations » en 1995
	Nb_per		Nombre de perturbations de la placette (éclaircies et tempête) entre 1995 et 2004
	Sh	m ²	Moyenne des projections des surfaces de houppiers des 36 arbres « observations » en 1995
<hr/>			

Variables météorologiques	P	mm	Précipitations mensuelles
	Tnab	°C	Température minimale du mois
	Tn	°C	Moyenne des températures minimales quotidiennes
	Txab	°C	Température maximale du mois
	TxM	°C	Moyenne des températures maximales quotidiennes
	Tm	°C	Moyenne mensuelle des températures moyennes quotidiennes
	Nb1		Nombre de jours où la température minimale est $\leq -5^{\circ}\text{C}$
	Nb2		Nombre de jours où $-5^{\circ}\text{C} < \text{température minimale} \leq 0^{\circ}\text{C}$
	Nb3		Nombre de jours où $0^{\circ}\text{C} < \text{température minimale} \leq 5^{\circ}\text{C}$
Variables bioclimatiques	Ins		Durée d'insolation sur la période 1997-2003
	rad	MJ/m ²	Radiations solaires mensuelles
	ID		Indice de De Martonne, $ID = 12 \cdot p / t + 10$
	ETPth		ETP Thornthwaite
	BHcth		Bilan hydrique climatique selon ETP Thornthwaite : P -ETP
	ETPt _u		ETP de Turc
	BHct _u		Bilan hydrique climatique selon ETP de Turc : P -ETP
	ETPha		ETP de Hargreaves
BHcha		Bilan hydrique climatique selon Hargreaves : P-ETP	

Annexe 4 : Données de fructification.

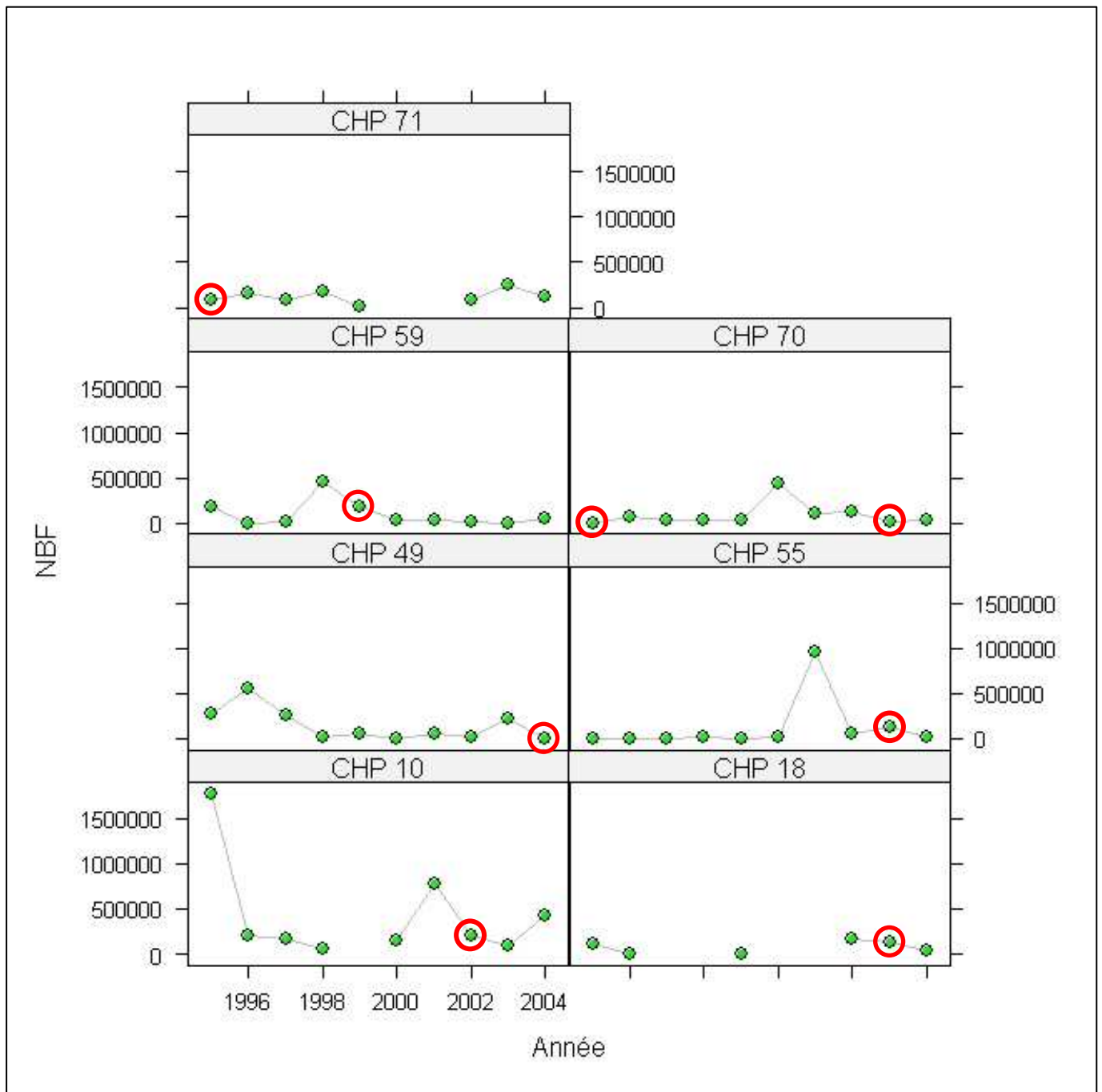
A : Moyennes décennales pour les trois essences feuillues (CHP = chêne pédonculé, CHS = chêne sessile et HET = hêtre) des placettes RENECOFOR pour la période 1995-2004.

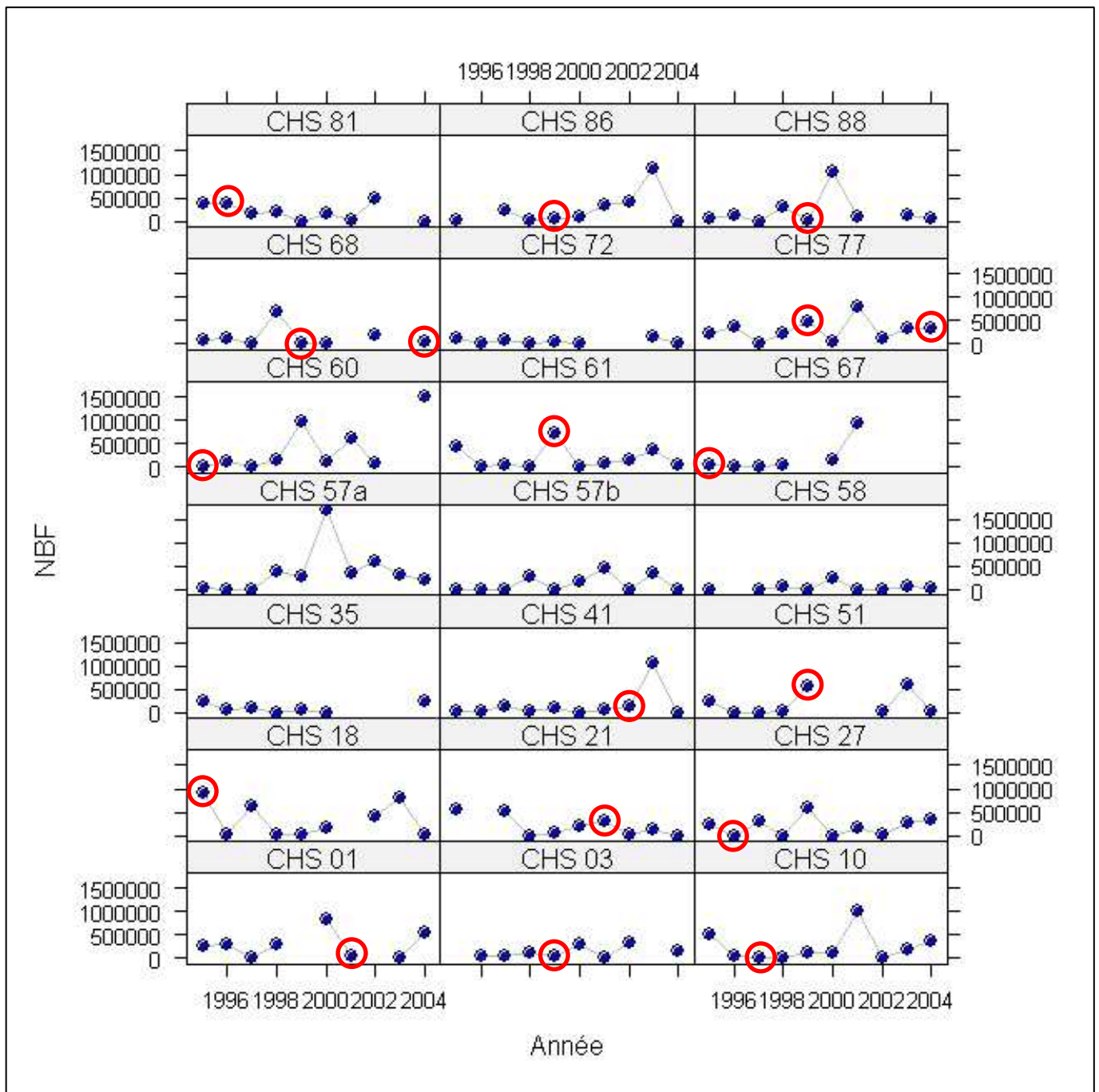
Numéro placette	Nbre d'années	NBF/ha/ an	CV% NBF	Nbre d'années	KGF/ha/ an	CV% KGF	Nbre d'années	GNB/ha/ an	CV% GNB
CHP 10	9	428000	121,9	9	388,2	148,3	9	0,85	54,32
CHP 18	6	77000	81,3	6	68,0	98,3	6	0,60	78,93
CHP 49	10	145800	117,7	10	196,6	139,8	10	0,81	67,37
CHP 55	10	120200	235,8	10	165,0	268,7	10	0,55	81,35
CHP 59	10	93200	144,4	10	125,6	143,3	10	0,94	63,63
CHP 65				7	239,4	126,2			
CHP 70	10	88000	139,5	10	106,4	197,6	10	0,68	64,45
CHP 71	8	123000	53,0	9	195,3	157,9	8	0,81	58,77
Numéro placette	Nbre d'années	NBF/ha/ an	CV% NBF	Nbre d'années	KGF/ha/ an	CV% KGF	Nbre d'années	GNB/ha/ an	CV% GNB
CHS 01	8	289250	92,7	9	270,4	110,2	8	0,90	42,61
CHS 03	8	135750	88,3	8	108,5	89,1	8	0,79	26,64
CHS 10	10	243311,1	123,4	8	220,7	111,2	8	0,67	36,55
CHS 18	9	333555,6	102,3	10	352,8	123,4	9	0,87	39,16
CHS 21	9	198888,9	103,6	9	208,4	119,3	9	0,77	62,07
CHS 27	10	197400	93,3	10	186,2	103,6	10	0,60	75,92
CHS 35	7	101714,3	91,0	7	65,7	92,0	7	0,47	65,55
CHS 41	10	157200	195,1	10	229,0	228,5	10	0,75	74,23
CHS 51	8	185500	128,9	8	208,3	143,8	8	0,71	73,24
CHS 57a	10	396600	119,0	10	422,8	139,5	10	0,76	59,43
CHS 57b	10	125800	132,5	10	101,8	133,1	10	0,46	89,57
CHS 58	9	50444,4	147,5	9	59,4	195,7	8	0,59	86,63
CHS 60	9	399555,5	125,2	8	520,3	115,7	8	0,93	41,56
CHS 61	10	185000	127,6	9	235,1	132,8	9	0,66	78,73
CHS 67	6	196666,7	166,7	7	321,4	149,2	6	0,69	83,89
CHS 68	8	145125	148,6	10	90,9	158,7	8	0,60	61,32
CHS 72	8	52750	114,3	9	46,4	131,6	8	0,54	75,88
CHS 77	10	297500	72,2	10	382,9	78,8	10	1,13	30,13
CHS 81	9	203111,1	85,5	10	267,2	92,6	9	0,87	68,58
CHS 86	9	258888,9	132,4	9	367,1	147,9	9	0,95	51,79
CHS 88	9	204666,7	153,7	10	163,2	186,0	9	0,54	48,06

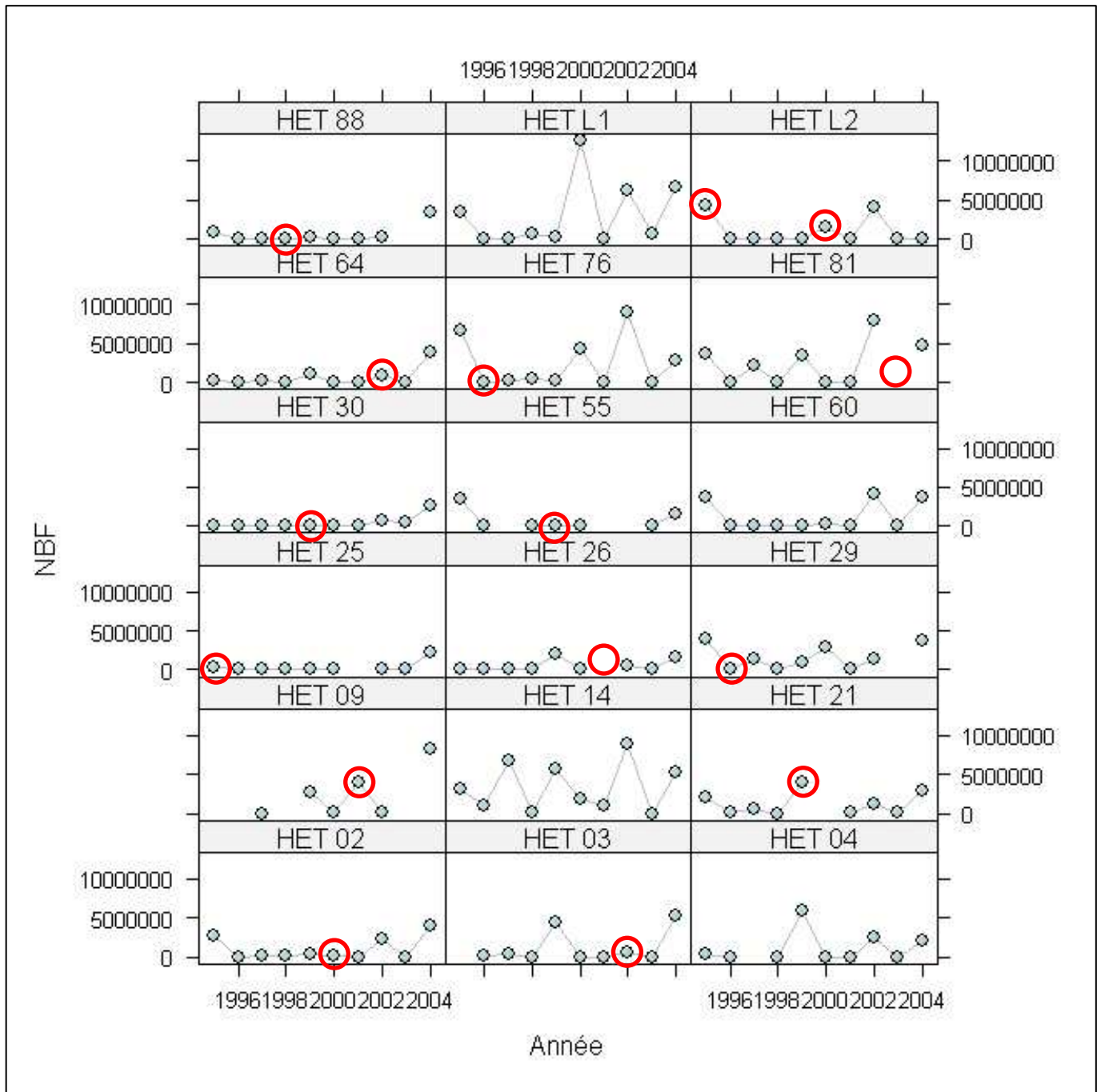
Numéro placette	Nbre d'années	NBF/ha/ an	CV% NBF	Nbre d'années	KGF/ha/ an	CV% KGF	Nbre d'années	GNB/ha/ an	CV% GNB
HET 02	10	1004000	138,6	9	212,9	136,0	9	0,13	46,50
HET 03	9	1187777,8	164,7	8	169,8	153,1	8	0,07	81,06
HET 04	9	1207333,3	155,7	9	233,3	161,9	9	0,12	58,58
HET 09	6	2506666,7	119,3						
HET 14	10	3331600	88,0	9	561,6	84,7	9	0,13	31,26
HET 21	9	1213012,4	113,9	7	210,6	116,3	7	0,11	70,68
HET 25	9	349111,11	197,8	8	55,3	211,0	8	0,10	96,83
HET 26	9	445777,8	157,3	8	76,0	152,9	8	0,09	85,66
HET 29	9	1588444,4	92,4	8	286,3	111,9	8	0,12	80,27
HET 30	10	400800	201,2	7	64,9	170,1	7	0,07	66,27
HET 55	7	748285,7	169,2	6	144,0	166,9	6	0,14	84,97
HET 60	10	1215800	146,0	9	299,3	138,1	9	0,13	65,77
HET 64	10	681000	167,8	8	73,3	154,2	6	0,11	50,32
HET 76	10	2389200	130,4	10	426,4	133,2	10	0,11	68,21
HET 81	9	2492222,2	104,6	6	487,3	74,1	6	0,11	46,89
HET 88	9	541111,1	202,3	7	98,0	180,3	7	0,08	88,14
HET L1	10	3058800	130,1	10	423,8	135,2	10	0,11	31,92
HET L2	10	1628600	137,4	9	304,4	144,3	10	0,11	105,94

B : Données de fructification par placette pour les 10 années d'étude (1995-2004). Les cercles rouges représentent les années connues de perturbation (éclaircie ou tempête).

- Nombre de fruits/ha (NBF) pour les trois essences : Chêne pédonculé (CHP), Chêne sessile (CHS) et Hêtre (HET).

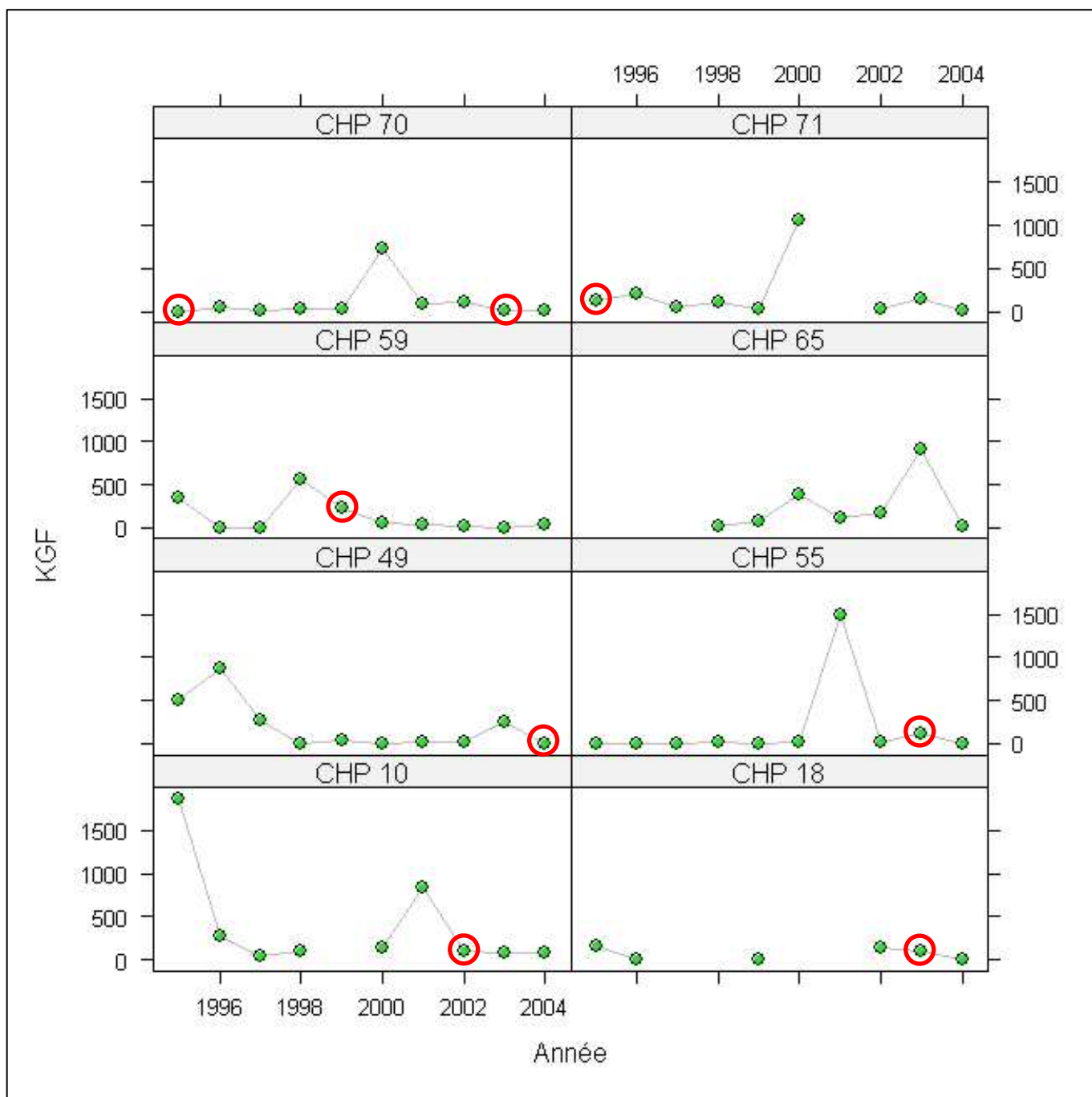


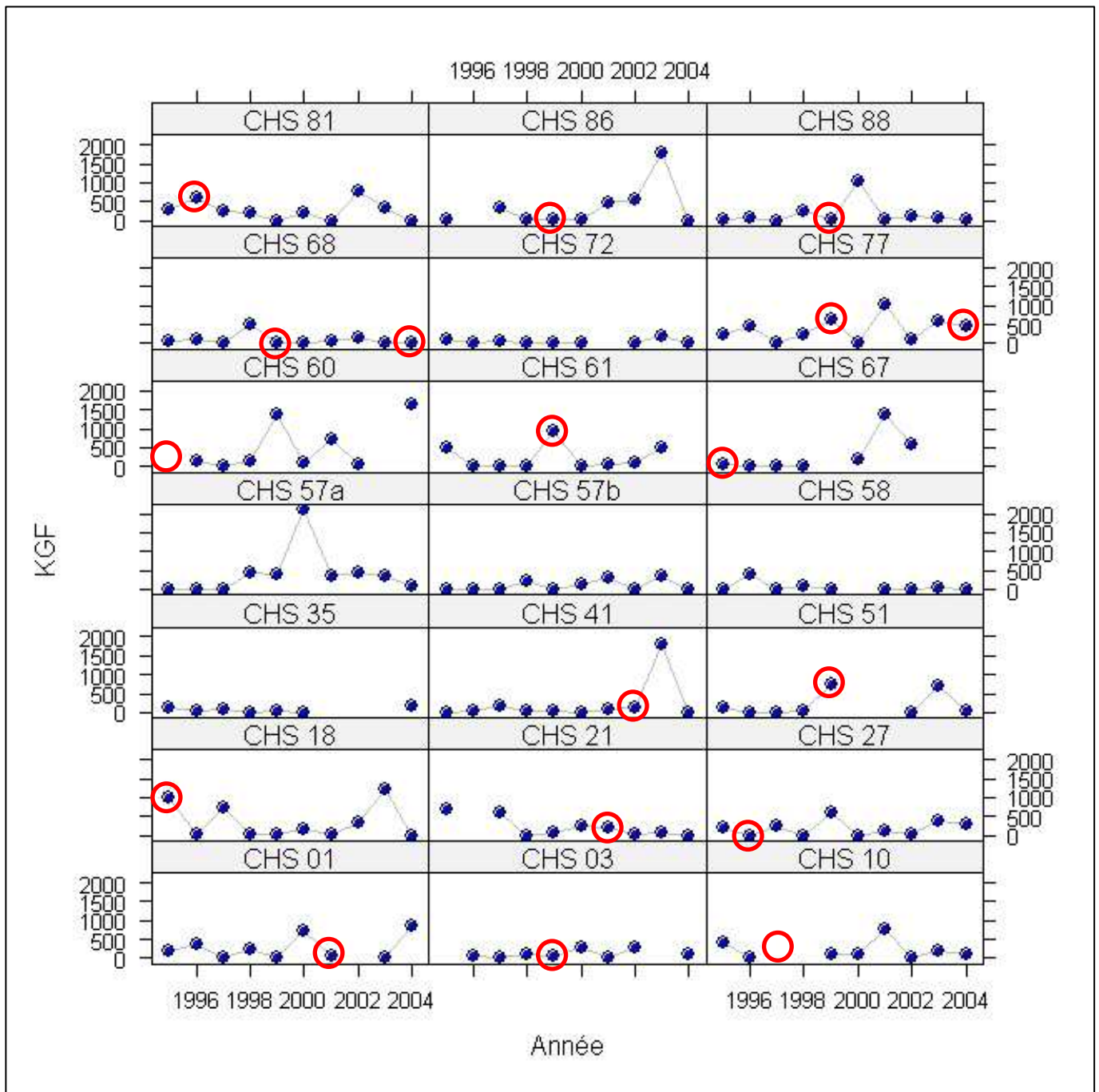


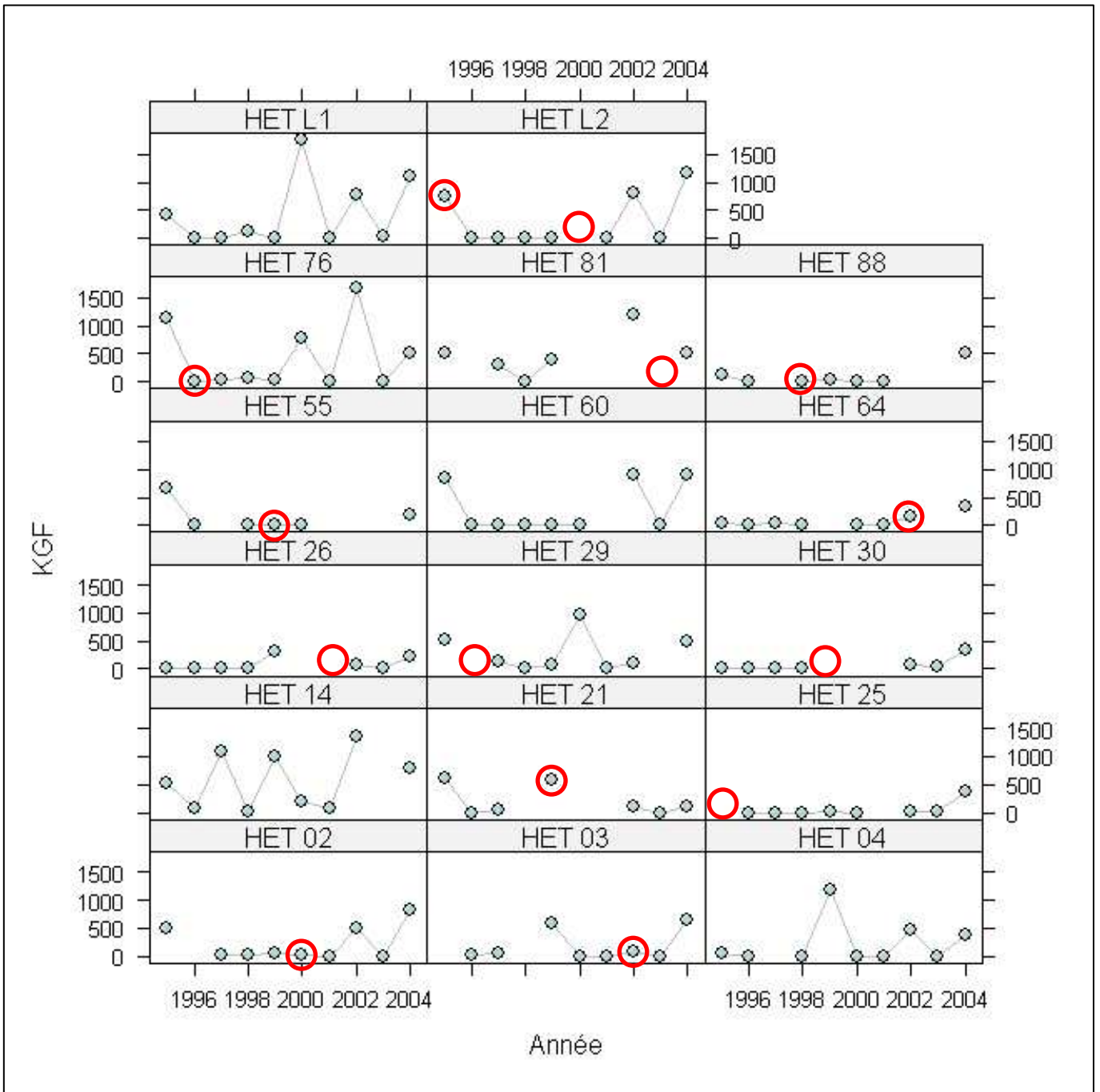


CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

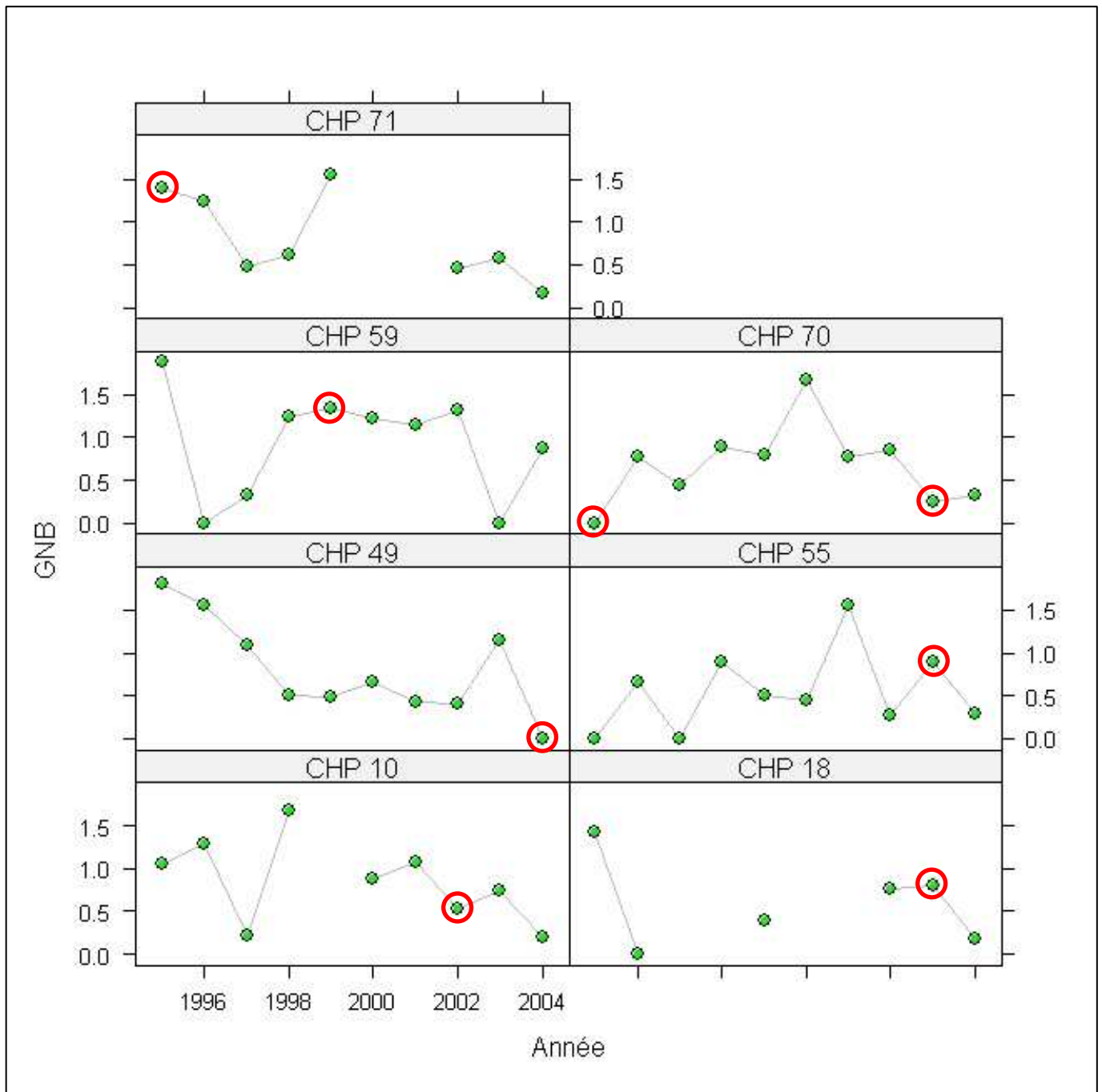
- Poids/ha (KGF) pour les trois essences : Chêne pédonculé (CHP), Chêne sessile (CHS) et Hêtre (HET).

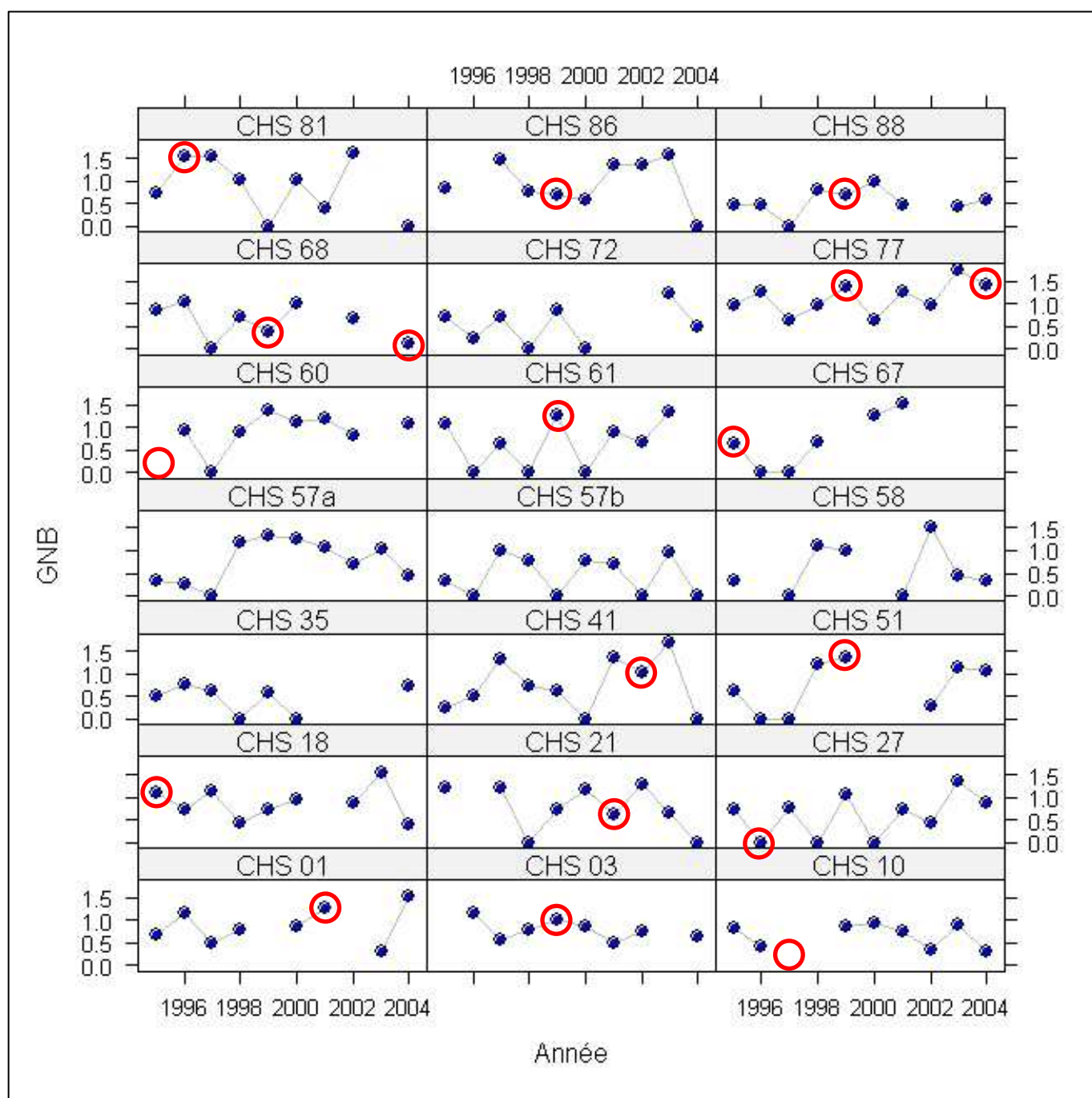


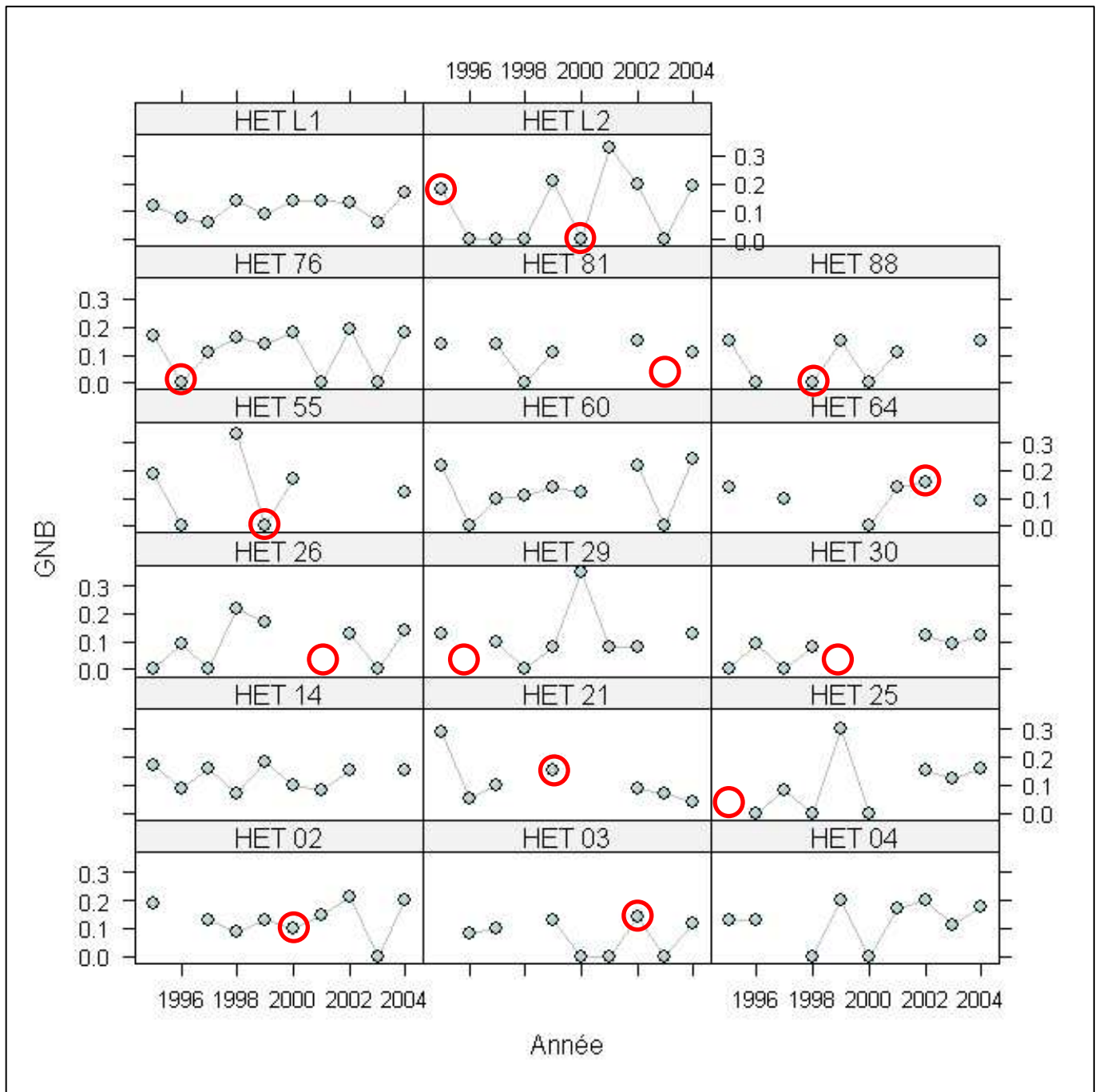




- Poids unitaire (GNB) pour les trois essences : Chêne pédonculé (CHP), Chêne sessile (CHS) et Hêtre (HET).







Annexe 5: Variables explicatives.

A : Nombre de données par essence, par variable à expliquer des variables édaphiques prélevées aux horizons 0-40 cm et 40-100 cm. Les chiffres entre crochets indiquent le nombre de placette et le chiffre entre parenthèses présente le pourcentage de données manquantes. Les variables précédées d'un astérisque ne présentent qu'une donnée par placette.

Variables édaphiques (0-40 et 40-100)	Variables à expliquer	Chêne pédonculé	Chêne sessile	Hêtre
Terre fine (PPTT)	Nbre de fruits/ha	14 [7]	40 [21] (4,7%)	32 [18] (11,1%)
	Poids/ha	16 [8]	40 [21] (4,7%)	30 [17] (11,7%)
	Poids unitaire	14 [7]	40 [21] (4,7%)	30 [17] (11,7%)
Carbone organique (CARB)	Nbre de fruits/ha	14 [7]	41 [21] (2,4%)	32 [18] (11,1%)
	Poids/ha	16 [8]	41 [21] (2,4%)	30 [17] (11,7%)
	Poids unitaire	14 [7]	41 [21] (2,4%)	30 [17] (11,7%)
Azote organique (N)	Nbre de fruits/ha	14 [7]	41 [21] (2,4%)	32 [18] (11,1%)
	Poids/ha	16 [8]	41 [21] (2,4%)	30 [17] (11,7%)
	Poids unitaire	14 [7]	41 [21] (2,4%)	30 [17] (11,7%)
Phosphore extractible (P)	Nbre de fruits/ha	14 [7]	41 [21] (2,4%)	32 [18] (11,1%)
	Poids/ha	16 [8]	41 [21] (2,4%)	30 [17] (11,7%)
	Poids unitaire	14 [7]	41 [21] (2,4%)	30 [17] (11,7%)
Ca ²⁺ (CAECH)	Nbre de fruits/ha	14 [7]	41 [21] (2,4%)	32 [18] (11,1%)
	Poids/ha	16 [8]	41 [21] (2,4%)	30 [17] (11,7%)
	Poids unitaire	14 [7]	41 [21] (2,4%)	30 [17] (11,7%)
Mg ²⁺ (MGECH)	Nbre de fruits/ha	14 [7]	41 [21] (2,4%)	32 [18] (11,1%)
	Poids/ha	16 [8]	41 [21] (2,4%)	30 [17] (11,7%)
	Poids unitaire	14 [7]	41 [21] (2,4%)	30 [17] (11,7%)
K ⁺ (KECH)	Nbre de fruits/ha	14 [7]	41 [21] (2,4%)	32 [18] (11,1%)
	Poids/ha	16 [8]	41 [21] (2,4%)	30 [17] (11,7%)
	Poids unitaire	14 [7]	41 [21] (2,4%)	30 [17] (11,7%)
Al ³⁺ (AL)	Nbre de fruits/ha	12 [7] (14,3%)	41 [21] (2,4%)	27 [18] (25%)
	Poids/ha	12 [8] (12,5%)	41 [21] (2,4%)	25 [17] (26,4%)
	Poids unitaire	12 [7] (14,3%)	41 [21] (2,4%)	25 [17] (26,4%)
H ⁺ (H)	Nbre de fruits/ha	12 [7] (14,3%)	41 [21] (2,4%)	27 [18] (25%)
	Poids/ha	12 [8] (12,5%)	41 [21] (2,4%)	25 [17] (26,4%)
	Poids unitaire	12 [7] (14,3%)	41 [21] (2,4%)	25 [17] (26,4%)
Mn ²⁺ (MN)	Nbre de fruits/ha	14 [7]	41 [21] (2,4%)	32 [18] (11,1%)
	Poids/ha	16 [8]	41 [21] (2,4%)	30 [17] (11,7%)
	Poids unitaire	14 [7]	41 [21] (2,4%)	30 [17] (11,7%)

Variables édaphiques (0-40 et 40-100)	Variabes à expliquer	Chêne pédonculé	Chêne sessile	Hêtre
Capacité éch. Cat.(CECE)	Nbre de fruits/ha	14 [7]	41 [21] (2,4%)	32 [18] (11,1%)
	Poids/ha	16 [8]	41 [21] (2,4%)	30 [17] (11,7%)
	Poids unitaire	14 [7]	41 [21] (2,4%)	30 [17] (11,7%)
Rapport carbone/azote (CN)	Nbre de fruits/ha	14 [7]	41 [21] (2,4%)	32 [18] (11,1%)
	Poids/ha	16 [8]	41 [21] (2,4%)	30 [17] (11,7%)
	Poids unitaire	14 [7]	41 [21] (2,4%)	30 [17] (11,7%)
* C/N Humus (CNhumus)	Nbre de fruits/ha	7 [7]	21 [21]	16 [18] (11,1%)
	Poids/ha	8 [8]	21 [21]	15 [17] (11,7%)
	Poids unitaire	7 [7]	21 [21]	15 [17] (11,7%)
* Tx de saturation (S/T0-40)	Nbre de fruits/ha	7 [7]	21 [21]	16 [18] (11,1%)
	Poids/ha	8 [8]	21 [21]	15 [17] (11,7%)
	Poids unitaire	7 [7]	21 [21]	15 [17] (11,7%)
* pHca 0-40	Nbre de fruits/ha	7 [7]	21 [21]	16 [18] (11,1%)
	Poids/ha	8 [8]	21 [21]	15 [17] (11,7%)
	Poids unitaire	7 [7]	21 [21]	15 [17] (11,7%)
* Humus (TypHumus)	Nbre de fruits/ha	7 [7]	21 [21]	16 [18] (11,1%)
	Poids/ha	8 [8]	21 [21]	15 [17] (11,7%)
	Poids unitaire	7 [7]	21 [21]	15 [17] (11,7%)
* Réserve utile (RUM)	Nbre de fruits/ha	7 [7]	21 [21]	16 [18] (11,1%)
	Poids/ha	8 [8]	21 [21]	15 [17] (11,7%)
	Poids unitaire	7 [7]	21 [21]	15 [17] (11,7%)

B : Nombre de données par essence, par variable à expliquer pour le débourrement et de jaunissement. Les chiffres entre crochets indiquent le nombre théorique maximum de valeurs par placettes et le chiffre entre parenthèses présente le pourcentage de données manquantes. NBF=nbre de fruits/ha, KGF=poids/ha, GNB=poids unitaire.

Essence	Variables à expliquer	Nbre de placette	Nbre d'années prises en compte	Nbre de données DD1	Nbre de données DD9	Nbre de données JJ1	Nbre de données JJ9
Chêne pédonculé	NBF	7	8	42 [56] (25%)	43 [56] (23,2%)	41 [56] (26,7%)	42 [56] (25%)
	KGF	8	8	49 [64] (10,9%)	50 [64] (21,8%)	48 [64] (25%)	48 [64] (25%)
	GNB	7	8	42 [56] (25%)	43 [56] (23,2%)	41 [56] (26,7%)	42 [56] (25%)
Chêne sessile	NBF	21	8	149 [168] (11,3%)	149 [168] (11,3%)	151 [168] (10,1%)	136 [168] (19%)
	KGF	21	8	149 [168] (11,3%)	149 [168] (11,3%)	151 [168] (10,1%)	136 [168] (19%)
	GNB	21	8	149 [168] (11,3%)	149 [168] (11,3%)	151 [168] (10,1%)	136 [168] (19%)
Hêtre	NBF	18	8	128 [144] (11,1%)	131 [144] (9%)	129 [144] (10,4%)	128 [144] (11,1%)
	KGF	17	8	123 [136] (9,5%)	126 [136] (7,3%)	123 [136] (9,5%)	122 [136] (10,2%)
	GNB	17	8	123 [136] (9,5%)	126 [136] (7,3%)	123 [136] (9,5%)	122 [136] (10,2%)

C : Nombre de données par essence, par variable à expliquer pour les durées de saison de végétation. Les chiffres entre crochets indiquent le nombre théorique maximum de valeurs par placettes et le chiffre entre parenthèses présente le pourcentage de données manquantes. NBF=nbre de fruits/ha, KGF=poids/ha, GNB=poids unitaire.

Essence	Variables à expliquer	Nbre de placette	Nbre d'années prises en compte	Nbre de données SV11	Nbre de données SV19	Nbre de données SV91	Nbre de données SV99
Chêne pédonculé	NBF	7	8	42 [56] (25%)	43 [56] (23,2%)	41 [56] (26,7%)	42 [56] (25%)
	KGF	8	8	46 [64] (28,1%)	46 [64] (28,1%)	46 [64] (28,1%)	47 [64] (26,5%)
	GNB	7	8	42 [56] (25%)	43 [56] (23,2%)	41 [56] (26,7%)	42 [56] (25%)
Chêne sessile	NBF	21	8	136 [168] (19%)	137 [168] (18,5%)	142 [168] (15,5%)	143 [168] (14,8%)
	KGF	21	8	136 [168] (19%)	137 [168] (18,5%)	142 [168] (15,5%)	143 [168] (14,8%)
	GNB	21	8	136 [168] (19%)	137 [168] (18,5%)	142 [168] (15,5%)	143 [168] (14,8%)
Hêtre	NBF	18	8	123 [144] (14,6%)	122 [144] (15,3%)	126 [144] (12,5%)	125 [144] (13,2%)
	KGF	17	8	119 [136] (12,5%)	118 [136] (13,2%)	122 [136] (10,3%)	121 [136] (11%)
	GNB	17	8	119 [136] (12,5%)	118 [136] (13,2%)	122 [136] (10,3%)	121 [136] (11%)

D : Nombre de données par essence, par variable à expliquer, pour les variables dendrométriques. Les chiffres entre crochets indiquent le nombre de placette et le chiffre entre parenthèses présente le pourcentage de données manquantes.

Variabes dendrométriques	Variabes à expliquer	Chêne pédonculé	Chêne sessile	Hêtre
Age	Nbre de fruits/ha	7 [7]	21 [21]	16 [18] (11,1%)
	Poids/ha	8 [8]	21 [21]	15 [17] (11,8%)
	Poids unitaire	7 [7]	21 [21]	15 [17] (11,8%)
dep	Nbre de fruits/ha	7 [7]	21 [21]	16 [18] (11,1%)
	Poids/ha	8 [8]	21 [21]	15 [17] (11,8%)
	Poids unitaire	7 [7]	21 [21]	15 [17] (11,8%)
Ho	Nbre de fruits/ha	7 [7]	21 [21]	16 [18] (11,1%)
	Poids/ha	8 [8]	21 [21]	15 [17] (11,8%)
	Poids unitaire	7 [7]	21 [21]	15 [17] (11,8%)
Gep	Nbre de fruits/ha	7 [7]	21 [21]	16 [18] (11,1%)
	Poids/ha	8 [8]	21 [21]	15 [17] (11,8%)
	Poids unitaire	7 [7]	21 [21]	15 [17] (11,8%)
Nep	Nbre de fruits/ha	7 [7]	21 [21]	16 [18] (11,1%)
	Poids/ha	8 [8]	21 [21]	15 [17] (11,8%)
	Poids unitaire	7 [7]	21 [21]	15 [17] (11,8%)
H_d	Nbre de fruits/ha	7 [7]	21 [21]	16 [18] (11,1%)
	Poids/ha	8 [8]	21 [21]	15 [17] (11,8%)
	Poids unitaire	7 [7]	21 [21]	15 [17] (11,8%)
Hbh	Nbre de fruits/ha	7 [7]	21 [21]	16 [18] (11,1%)
	Poids/ha	8 [8]	21 [21]	15 [17] (11,8%)
	Poids unitaire	7 [7]	21 [21]	15 [17] (11,8%)
Lh	Nbre de fruits/ha	7 [7]	21 [21]	16 [18] (11,1%)
	Poids/ha	8 [8]	21 [21]	15 [17] (11,8%)
	Poids unitaire	7 [7]	21 [21]	15 [17] (11,8%)
Sh	Nbre de fruits/ha	7 [7]	21 [21]	16 [18] (11,1%)
	Poids/ha	8 [8]	21 [21]	15 [17] (11,8%)
	Poids unitaire	7 [7]	21 [21]	15 [17] (11,8%)
Nb_per	Nbre de fruits/ha	7 [7]	21 [21]	18 [18]
	Poids/ha	8 [8]	21 [21]	17 [17]
	Poids unitaire	7 [7]	21 [21]	17 [17]

E: Nombre de données par essence, par variable à expliquer pour les variables météorologiques. Les chiffres entre crochets indiquent le nombre théorique maximum de valeurs par placettes et le chiffre entre parenthèses présente le pourcentage de données manquantes.

Données météorologiques	Variables à expliquer	Chêne pédonculé	Chêne sessile	Hêtre
P(par mois et année)	Nbre de fruits/ha	840 [840]	2519 [2519] (0,0%)	2160 [2160]
	Poids/ha	960 [960]	2519 [2519] (0,0%)	2040 [2040]
	Poids unitaire	840 [840]	2519 [2519] (0,0%)	2040 [2040]
Tnab(par mois et année)	Nbre de fruits/ha	672 [672]	2016 [2016]	1536 [1728] (11,1%)
	Poids/ha	768 [768]	2016 [2016]	1440 [1632] (11,7%)
	Poids unitaire	672 [672]	2016 [2016]	1440 [1632] (11,7%)
Tn(par mois et année)	Nbre de fruits/ha	672 [672]	2016 [2016]	1536 [1728] (11,1%)
	Poids/ha	768 [768]	2016 [2016]	1440 [1632] (11,7%)
	Poids unitaire	672 [672]	2016 [2016]	1440 [1632] (11,7%)
Txab(par mois et année)	Nbre de fruits/ha	672 [672]	2016 [2016]	1536 [1728] (11,1%)
	Poids/ha	768 [768]	2016 [2016]	1440 [1632] (11,7%)
	Poids unitaire	672 [672]	2016 [2016]	1440 [1632] (11,7%)
Tx(par mois et année)	Nbre de fruits/ha	672 [672]	2016 [2016]	1536 [1728] (11,1%)
	Poids/ha	768 [768]	2016 [2016]	1440 [1632] (11,7%)
	Poids unitaire	672 [672]	2016 [2016]	1440 [1632] (11,7%)
Tm(par mois et année)	Nbre de fruits/ha	672 [672]	2016 [2016]	1536 [1728] (11,1%)
	Poids/ha	768 [768]	2016 [2016]	1440 [1632] (11,7%)
	Poids unitaire	672 [672]	2016 [2016]	1440 [1632] (11,7%)
Nb1(par mois et année)	Nbre de fruits/ha	672 [672]	2016 [2016]	1536 [1728] (11,1%)
	Poids/ha	768 [768]	2016 [2016]	1440 [1632] (11,7%)
	Poids unitaire	672 [672]	2016 [2016]	1440 [1632] (11,7%)
Nb2(par mois et année)	Nbre de fruits/ha	672 [672]	2016 [2016]	1536 [1728] (11,1%)
	Poids/ha	768 [768]	2016 [2016]	1440 [1632] (11,7%)
	Poids unitaire	672 [672]	2016 [2016]	1440 [1632] (11,7%)
Nb3(par mois et année)	Nbre de fruits/ha	672 [672]	2016 [2016]	1536 [1728] (11,1%)
	Poids/ha	768 [768]	2016 [2016]	1440 [1632] (11,7%)
	Poids unitaire	672 [672]	2016 [2016]	1440 [1632] (11,7%)

F: Nombre de données par essence, par variable à expliquer pour les indices bioclimatiques. Les données pour les placettes du Luxembourg (HET L1 et HET L2) ont été prises sur la station Météo France de Metz. Les chiffres entre crochets indiquent le nombre théorique maximum de valeurs par placettes et le chiffre entre parenthèses présente le pourcentage de données manquantes.

Indices bioclimatiques	Variabiles à expliquer	Chêne pédonculé	Chêne sessile	Hêtre
Ins mens. de 1997-2003	Nbre de fruits/ha	72 [84] (14,3%)	144 [252] (42,8%)	132 [216] (38,8%)
	Poids/ha	84 [96] (12,5%)	144 [252] (42,8%)	120 [204] (41,2%)
	Poids unitaire	72 [84] (14,3%)	144 [252] (42,8%)	120 [204] (41,2%)
Rad (12 mois)	Nbre de fruits/ha	7 [7]	21 [21]	18 [18]
	Poids/ha	8 [8]	21 [21]	17 [17]
	Poids unitaire	7 [7]	21 [21]	17 [17]
ID mens.(93-04)	Nbre de fruits/ha	84 [84]	252 [252]	216 [216]
	Poids/ha	96 [96]	252 [252]	204 [204]
	Poids unitaire	84 [84]	252 [252]	204 [204]
ETPth mens.	Nbre de fruits/ha	84 [84]	252 [252]	216 [216]
	Poids/ha	96 [96]	252 [252]	204 [204]
	Poids unitaire	84 [84]	252 [252]	204 [204]
BHctth mens.	Nbre de fruits/ha	84 [84]	252 [252]	216 [216]
	Poids/ha	96 [96]	252 [252]	204 [204]
	Poids unitaire	84 [84]	252 [252]	204 [204]
ETPtu mens.	Nbre de fruits/ha	84 [84]	252 [252]	216 [216]
	Poids/ha	96 [96]	252 [252]	204 [204]
	Poids unitaire	84 [84]	252 [252]	204 [204]
BHctu mens.	Nbre de fruits/ha	84 [84]	252 [252]	216 [216]
	Poids/ha	96 [96]	252 [252]	204 [204]
	Poids unitaire	84 [84]	252 [252]	204 [204]
ETPha mens.	Nbre de fruits/ha	84 [84]	252 [252]	216 [216]
	Poids/ha	96 [96]	252 [252]	204 [204]
	Poids unitaire	84 [84]	252 [252]	204 [204]

Annexe 6 : Distances des placettes Météo France les plus proches des placettes RENECOFOR.**A** : températures.

Code	LambX(km)	LambY(km)	LambX(km), LambY(km),		Dist (en km)
			Météo F	Météo F	
CHP 10	745,8	2373,8	747,7	2362,3	11,7
CHP 18	618	2202,8	617,2	2211,9	9,1
CHP 40	343,6	1864,7	325,3	1860,4	18,8
CHP 49	421,4	2275,5	426,2	2298,2	23,2
CHP 55	850,9	2452,5	876,9	2459,4	26,9
CHP 59	701,4	2575,9	703,8	2558,8	17,3
CHP 65	406,6	1802,9	409,3	1801,1	3,2
CHP 70	889,6	2326,1	899	2331,6	10,9
CHP 71	821	2222,9	826,6	2224,1	5,7
CHS 01	824	2134,2	809,2	2118,8	21,4
CHS 03	629,8	2185,3	620,6	2178	11,7
CHS 10	757,5	2368,6	747,7	2362,3	11,7
CHS 18	583,9	2250,5	581,2	2257,1	7,1
CHS 21	807,8	2235	815,3	2229,2	9,5
CHS 27	539,4	2485,6	547,8	2478,9	10,7
CHS 35	312,1	2360,2	297,2	2349	18,6
CHS 41	518,9	2286	523,9	2288,7	5,7
CHS 51	791,9	2451,5	805,2	2479,1	30,6
CHS 57a	904,2	2438,2	904,7	2431,7	6,5
CHS 57b	974,8	2458,6	974,3	2455,2	3,4
CHS 58	700,7	2219,7	685,3	2202,7	22,9
CHS 60	597,2	2488,8	584,8	2494,4	13,6
CHS 61	477,5	2392,8	479,4	2408,8	16,1
CHS 68	984,9	2311,7	988,6	2303,3	9,2
CHS 72	453,4	2312,5	440	2329,7	21,8
CHS 81	552,8	1893,9	555,4	1915	21,3
CHS 86	458,9	2182,4	449,1	2181,1	9,9
CHS 88	876,1	2342,8	893,1	2341,5	17,0
CHS 67	994,6	2457	1000,1	2452,8	6,9
CHS 77	628,1	2383,9	625,3	2378,7	5,9
HET 02	657,6	2467,8	651,4	2479,7	13,4
HET 03	651	2132,7	647,4	2146,3	14,1
HET 04	877,3	1909,3	892,9	1902,4	17,1

HET 09	513,7	1770,3	510,1	1767,9	4,3
HET 14	367	2469,6	353,2	2454,6	20,4
HET 21	788,5	2315,6	768	2318,9	20,8
HET 25	898,5	2251	905,6	2244,2	9,8
HET 26	833,6	1995,1	833	2005,2	10,1
HET 29	160,1	2331,7	167,1	2323,6	10,7
HET 30	696,6	1902,1	699,8	1903,2	3,4
HET 52	804,8	2314,2	824,7	2320,5	20,9
HET 55	794,6	2466,9	805,2	2479,1	16,2
HET 60	639,2	2480,8	633,9	2471,6	10,6
HET 64	355,9	1798,7	361,6	1800,8	6,1
HET 65	444,8	1782,2	448,8	1785,7	5,3
HET 76	527	2524,2	529,6	2510,4	14,0
HET 81	587	1823	586,2	1821,3	1,9
HET 88	891,1	2352,3	893,1	2341,5	11,0

B : précipitations.

Code	LambX(km)	LambY(km)	LambX(km), LambY(km),		Dist (en km)
			Météo F	Météo F	
CHP 10	745,8	2373,8	747	2375	1,7
CHP 18	618	2202,8	617	2208	5,3
CHP 40	343,6	1864,7	350	1865	6,4
CHP 49	421,4	2275,5	424	2269	7,0
CHP 55	850,9	2452,5	846	2447	7,4
CHP 59	701,4	2575,9	721	2 577	19,6
CHP 65	406,6	1802,9	409	1801	3,1
CHP 70	889,6	2326,1	889	2321	5,1
CHP 71	821	2222,9	823	2213	10,1
CHS 01	824	2134,2	837	2133	13,1
CHS 03	629,8	2185,3	630	2184	1,3
CHS 10	757,5	2368,6	758	2375	6,4
CHS 18	583,9	2250,5	575	2 246	10,0
CHS 21	807,8	2235	808	2239	4,0
CHS 27	539,4	2485,6	537	2489	4,2
CHS 35	312,1	2360,2	322	2 369	13,2
CHS 41	518,9	2286	515	2298	12,6
CHS 51	791,9	2451,5	793	2459	7,6
CHS 57a	904,2	2438,2	896	2440	8,4
CHS 57b	974,8	2458,6	974	2455	3,7
CHS 58	700,7	2219,7	699	2227	7,5
CHS 60	597,2	2488,8	600	2498	9,6
CHS 61	477,5	2392,8	486	2393	8,5
CHS 68	984,9	2311,7	989	2302	10,5
CHS 72	453,4	2312,5	458	2319	8,0
CHS 81	552,8	1893,9	556	1904	10,6
CHS 86	458,9	2182,4	464	2188	7,6
CHS 88	876,1	2342,8	871	2343	5,1
CHS 67	994,6	2457	1000	2452	7,4
CHS 77	628,1	2383,9	635	2376	10,5
HET 02	657,6	2467,8	661	2457	11,3
HET 03	651	2132,7	647	2132	4,1
HET 04	877,3	1909,3	871	1912	6,9
HET 09	513,7	1770,3	506	1 763	10,6

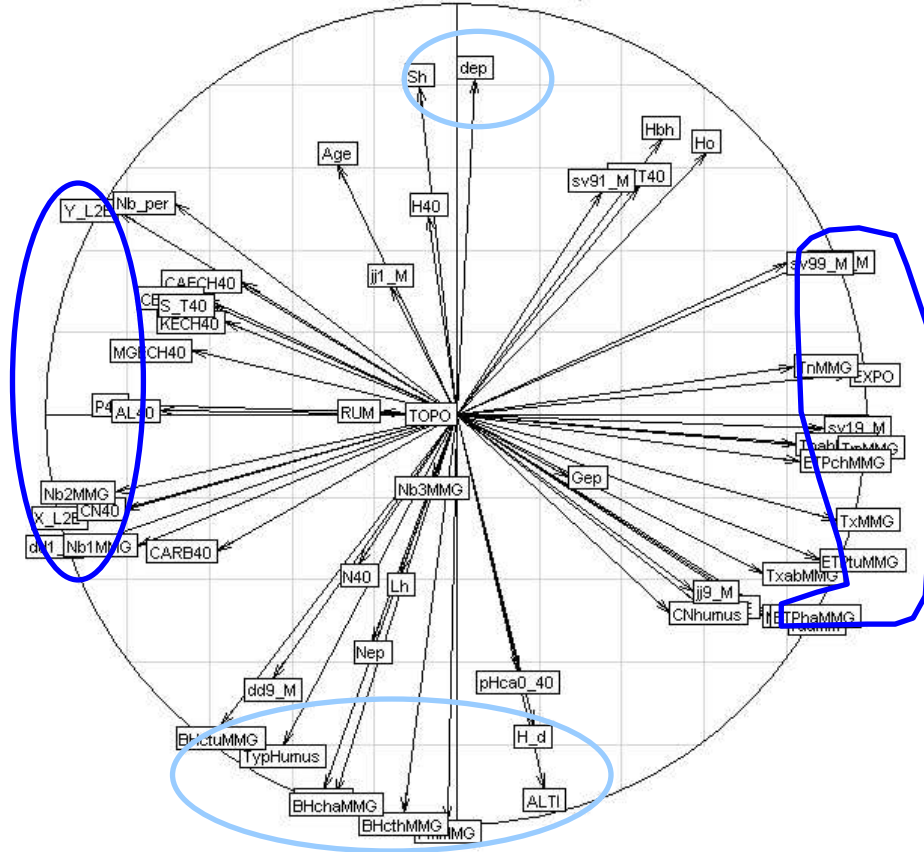
HET 14	367	2469,6	378	2480	15,1
HET 21	788,5	2315,6	789	2312	3,6
HET 25	898,5	2251	884	2251	14,5
HET 26	833,6	1995,1	835	1999	4,1
HET 29	160,1	2331,7	158	2335	3,9
HET 30	696,6	1902,1	699	1903	2,6
HET 52	804,8	2314,2	801	2300	14,7
HET 55	794,6	2466,9	796	2473	6,3
HET 60	639,2	2480,8	633	2 471	11,6
HET 64	355,9	1798,7	361	1800	5,3
HET 65	444,8	1782,2	448	1785	4,3
HET 76	527	2524,2	529	2510	14,3
HET 81	587	1823	586	1821	2,2
HET 88	891,1	2352,3	883	2356	8,9
HET L1	865,8	2561,2	849	2505	58,7
HET L2	878,9	2524,2	892	2502	25,8

Annexe 7 : Résultats ACP (coordonnées sur les axes, graphiques et matrices de corrélation).

- Chêne pédonculé

Chêne pédonculé	F1 (37,1%)	F2 (62,3%)
Exposition (EXPO)	0,96	0,10
Températures moyennes (TmMMG)	0,93	-0,08
Températures maximales (TxMMG)	0,92	-0,26
Saison de végétation, DD1-JJ9 (sv19_M)	0,89	-0,03
Evapotranspiration de Turc (ETPtMMG)	0,88	-0,35
Saison de végétation, DD1-JJ1 (sv11_M)	0,85	0,37
Evapotranspiration de Thornwaite (ETPchMMG)	0,83	-0,11
Températures minimales absolues (TnabMMG)	0,82	-0,07
Températures minimales (TnMMG)	0,82	0,12
Radiations solaires mensuelles (radMM)	0,80	-0,51
Saison de végétation, DD9-JJ9 (sv99_M)	0,80	0,37
Evapotranspiration de Hargreaves (ETPhaMMG)	0,76	-0,49
Altitude (ALTI)	0,21	-0,91
Rapport hauteur/diamètre (H_d)	0,19	-0,75
Diamètre à 1,30 m (dep)	0,04	0,82
Précipitations (PMMM)	-0,02	-0,98
Surface du houppier (Sh)	-0,09	0,80
Bilan climatique de Thornthwaite (BHcthMMG)	-0,13	-0,97
Bilan climatique de Hargreaves (BHchaMMG)	-0,29	-0,92
Indice de De Martonne (IDMMG)	-0,32	-0,91
Type d'humus (TypHumus)	-0,42	-0,80
Bilan climatique de Turc (BHctuMMG)	-0,57	-0,76
Nbre de jours : la température minimale est ≤ 5°C (Nb1MMG)	-0,78	-0,32
Phosphore (P40)	-0,80	0,02
Rapport carbone/azote (CN40)	-0,81	-0,23
Latitude (Y_L2E)	-0,82	0,50
Nbre de jours : -5°C < température minimale ≤ 0°C (Nb2MMG)	-0,83	-0,19
Longitude (X_L2E)	-0,90	-0,25
Date de début de débourrement, 10% du peuplement (dd1_M)	-0,91	-0,32

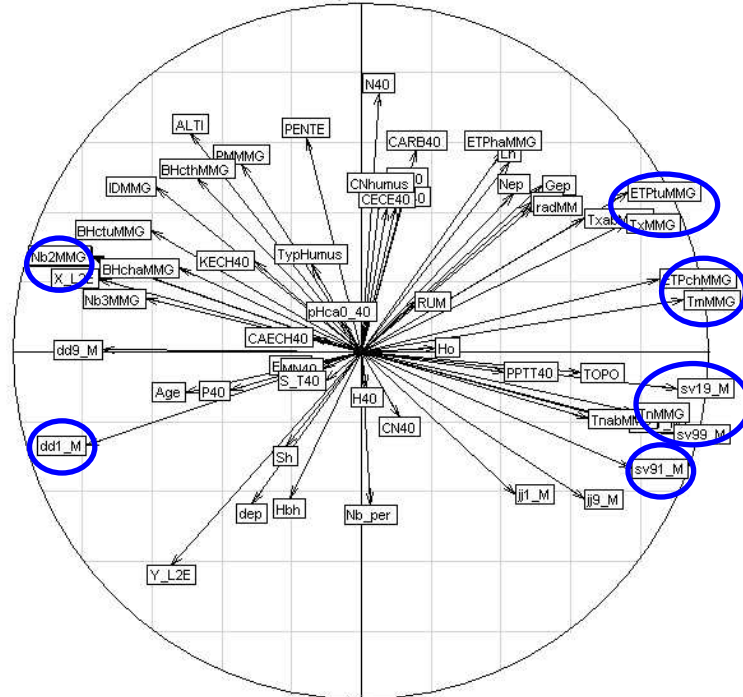
Axe 1 et 2 pour le chêne pédonculé



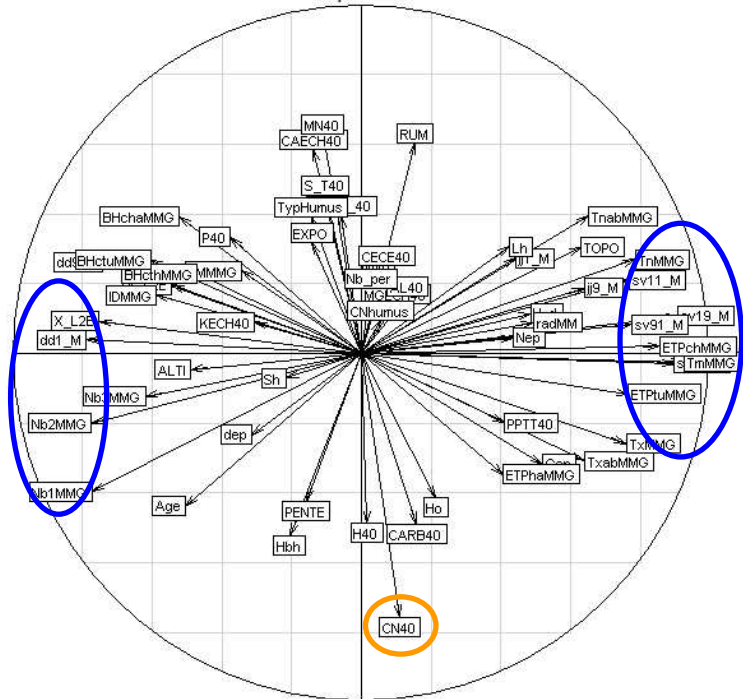
- Chêne sessile

Chêne sessile	F1 (29,9%)	F2 (39,9%)	F3 (49,8%)	F4 (59,7%)
Date de début de débourrement, 10% du peuplement (dd1_M)	-0,79	-0,27	0,22	0,04
Nbre de jours : -5°C < température minimale ≤ 0°C (Nb2MMG)	-0,77	0,28	0,09	-0,20
Nbre de jours : la température minimale est ≤ 5°C (Nb1MMG)	-0,77	0,27	0,12	-0,40
Longitude (X_L2E)	-0,75	0,21	0,12	0,09
Rapport carbone/azote (CN40)	0,11	-0,19	-0,14	-0,76
Températures maximales (TxMMG)	0,76	0,37	0,33	-0,26
Evapotranspiration de Turc (ETPtMMG)	0,77	0,46	0,24	-0,12
Saison de végétation, DD1-JJ1 (sv11_M)	0,77	-0,20	0,25	0,21
Saison de végétation, DD9-JJ1 (sv91_M)	0,78	-0,33	0,14	0,08
Températures minimales (TnMMG)	0,79	-0,17	-0,03	0,27
Evapotranspiration de Thornwaite (ETPchMMG)	0,86	0,21	0,25	0,02
Saison de végétation, DD9-JJ9 (sv99_M)	0,90	-0,24	-0,04	-0,03
Saison de végétation, DD1-JJ9 (sv19_M)	0,91	-0,10	0,08	0,11
Températures moyennes (TmMMG)	0,92	0,15	0,20	-0,02

A: axe 1 et 2 pour le chêne sessile



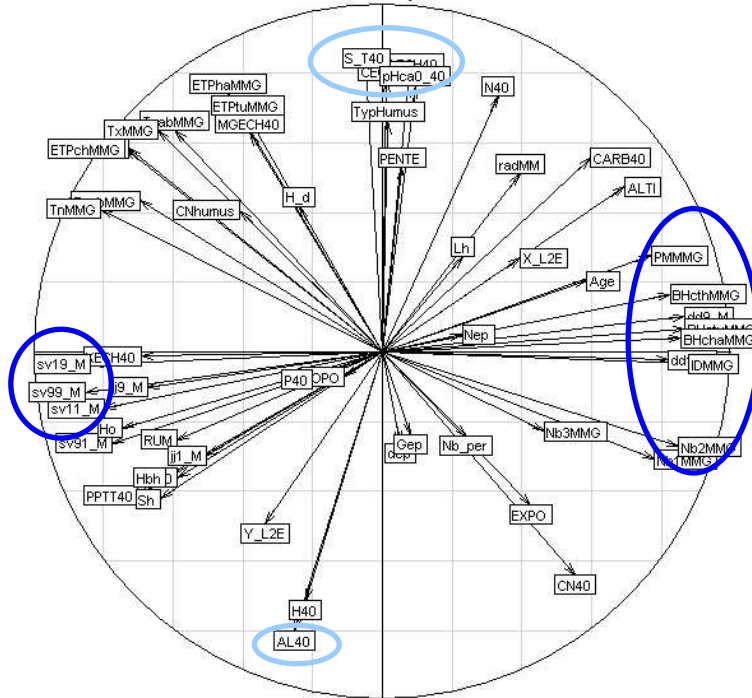
B: axe 1 et 4 pour le chêne sessile



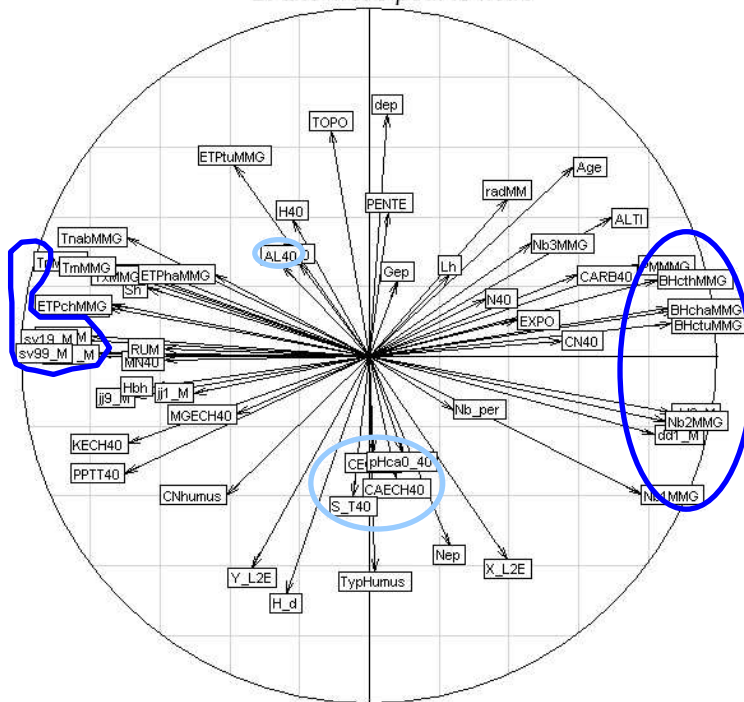
- Hêtre

HET	F1 (33,1%)	F2 (53,4%)
Saison de végétation, DD9-JJ9 (sv99_M)	-0,85	-0,12
Saison de végétation, DD1-JJ9 (sv19_M)	-0,84	-0,04
Températures minimales (TnMMG)	-0,81	0,41
Saison de végétation, DD1-JJ1 (sv11_M)	-0,80	-0,16
Saison de végétation, DD9-JJ1 (sv91_M)	-0,78	-0,26
Hauteur dominante (Ho)	-0,75	-0,22
Al ³⁺ (AL40)	-0,25	-0,80
Taux de saturation (S_T40)	-0,05	0,82
Capacité d'échange cationique (CECE40)	0,01	0,78
Ca ²⁺ (CAECH40)	0,08	0,80
pH (pHca0_40)	0,09	0,76
Précipitations (PMMM)	0,77	0,28
Nbre de jours : la température minimale est ≤ 5°C (Nb1MMG)	0,78	-0,31
Date de début de débourrement, 10% du peuplement (dd1_M)	0,82	-0,02
Bilan climatique de Thornthwaite (BHcthMMG)	0,83	0,17
Nbre de jours : -5°C < température minimale ≤ 0°C (Nb2MMG)	0,85	-0,27
Bilan climatique de Hargreaves (BHchaMMG)	0,86	0,04
Bilan climatique de Turc (BHctuMMG)	0,87	0,07
Date de début de débourrement, 90% du peuplement (dd9_M)	0,87	0,10
Indice de De Martonne (IDMMG)	0,88	-0,03

A: axe 1 et 2 pour le hêtre



B: axe 1 et 3 pour le hêtre



Annexe 8 : Corrélations entre les variables des modèles calculés sur les moyennes décennales des variables explicatives.

- Chêne pédonculé et sessile, nombre de fruits/ha (NBFMM)

Le stepAIC sélectionne la surface du houppier en 1995 (Sh), la surface terrière de l'étage principal en 1995 (Gep) et le nombre de tige en 1995 (Nep):

Step: AIC=620.93

NBFMM ~ Sh + Gep + Nep

```
Anova type="III"
Anova Table (Type III tests)
Response: NBFMM
```

	Sum Sq	Df	F value	Pr(>F)
(Intercept)	1.0903e+09	1	0.1285	0.72323
Sh	1.0857e+10	1	1.2799	0.26957
Gep	4.3856e+10	1	5.1700	0.03263 *
Nep	1.8015e+10	1	2.1237	0.15855
Residuals	1.9511e+11	23		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

La seule variable significative du modèle est la deuxième alors que l'on s'attend à ce que la première variable sélectionnée soit significative. On regarde une simple Anova avec la surface du houppier (Sh) et la surface terrière (Gep).

```
lm(NBFMM~Gep)
Anova
Analysis of Variance Table
Response: NBFMM
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Gep	1	1.1151e+10	1.1151e+10	1.0412	0.3173
Residuals	25	2.6775e+11	1.0710e+10		

```
lm(NBFMM~Sh)
Anova
Analysis of Variance Table
Response: NBFMM
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Sh	1	3.6204e+10	3.6204e+10	3.7294	0.06488 .
Residuals	25	2.4269e+11	9.7078e+09		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Aucune variable prise individuellement n'est significative au moins au seuil de 5%. On ne peut pas

conclure. Ce résultat vaut également pour la démarche exploratoire.

- Chêne pédonculé et sessile, poids/ha (KGFMM)

Le stepAIC sélectionne le stock de terre fine (PPTT40):

Step: AIC=269.33

KGFMM ~ PPTT40

```
lm(KGFMM~PPTT40)
Analysis of Variance Table
Response: KGFMM
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
PPTT40     1  29109   29109   2.0724 0.1619
Residuals 26 365185   14046
```

La variable sélectionnée n'est pas significative, on ne peut conclure. Ce résultat est également similaire à la démarche exploratoire.

- Chêne pédonculé et sessile, poids unitaire (GNBMM)

Le stepAIC retient le stock de terre fine (PPTT40), la moyenne décennale de nombre de jour où la température est comprise entre 0 et 5°C (Nb3MMG) et la moyenne des radiations solaires (radMM) :

Step: AIC=-107.23

GNBMM ~ PPTT40 + Nb3MMG + radMM

```
lm(GNBMM~PPTT40 + Nb3MMG + radMM)
Analysis of Variance Table
Response: GNBMM
          Sum Sq Df F value    Pr(>F)
(Intercept) 0.12735  1  7.7407 0.010594 *
PPTT40       0.16145  1  9.8139 0.004671 **
Nb3MMG       0.13034  1  7.9227 0.009831 **
radMM        0.11411  1  6.9364 0.014844 *
Residuals    0.37839 23
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Les variables retenues sont significatives. On regarde à présent si les moyennes décennales

mensuelles du nombre de jour où la température est comprise entre 0 et 5°C ainsi que les moyennes mensuelles des radiations solaires peuvent améliorer le l'AIC.

L'outil de sélection retient les moyennes des mois de janvier et d'octobre (Nb3MM10).

Step: AIC=-107.46

GNBMM ~ PPTT40 + Nb3MM1 + Nb3MM10

```
lm(GNBMM~PPTT40 + Nb3MM1 + Nb3MM10)
Anova type="III"
Anova Table (Type III tests)
Response: GNBMM
```

	Sum Sq	Df	F value	Pr(>F)	
(Intercept)	0.07572	1	4.6420	0.041908	*
PPTT40	0.16849	1	10.3290	0.003849	**
Nb3MM1	0.14710	1	9.0176	0.006347	**
Nb3MM10	0.07873	1	4.8263	0.038370	*
Residuals	0.37518	23			

```
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

L'Anova de type III montre une significativité des 3 variables. On regarde variable par variable.

```
lm (GNBMM~PPTT40)
Analysis of Variance Table
Response: GNBMM
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
PPTT40     1  0.14577  0.14577   6.5025 0.01728 *
Residuals 25  0.56043  0.02242

lm (GNBMM~Nb3MM1)
Analysis of Variance Table
Response: GNBMM
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Nb3MM1     1  0.10910  0.10910   4.5678 0.04255 *
Residuals 25  0.59710  0.02388

lm (GNBMM~Nb3MM10)
Analysis of Variance Table
Response: GNBMM
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Nb3MM10    1  0.02149  0.02149   0.7847 0.3842
Residuals 25  0.68471  0.02739
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

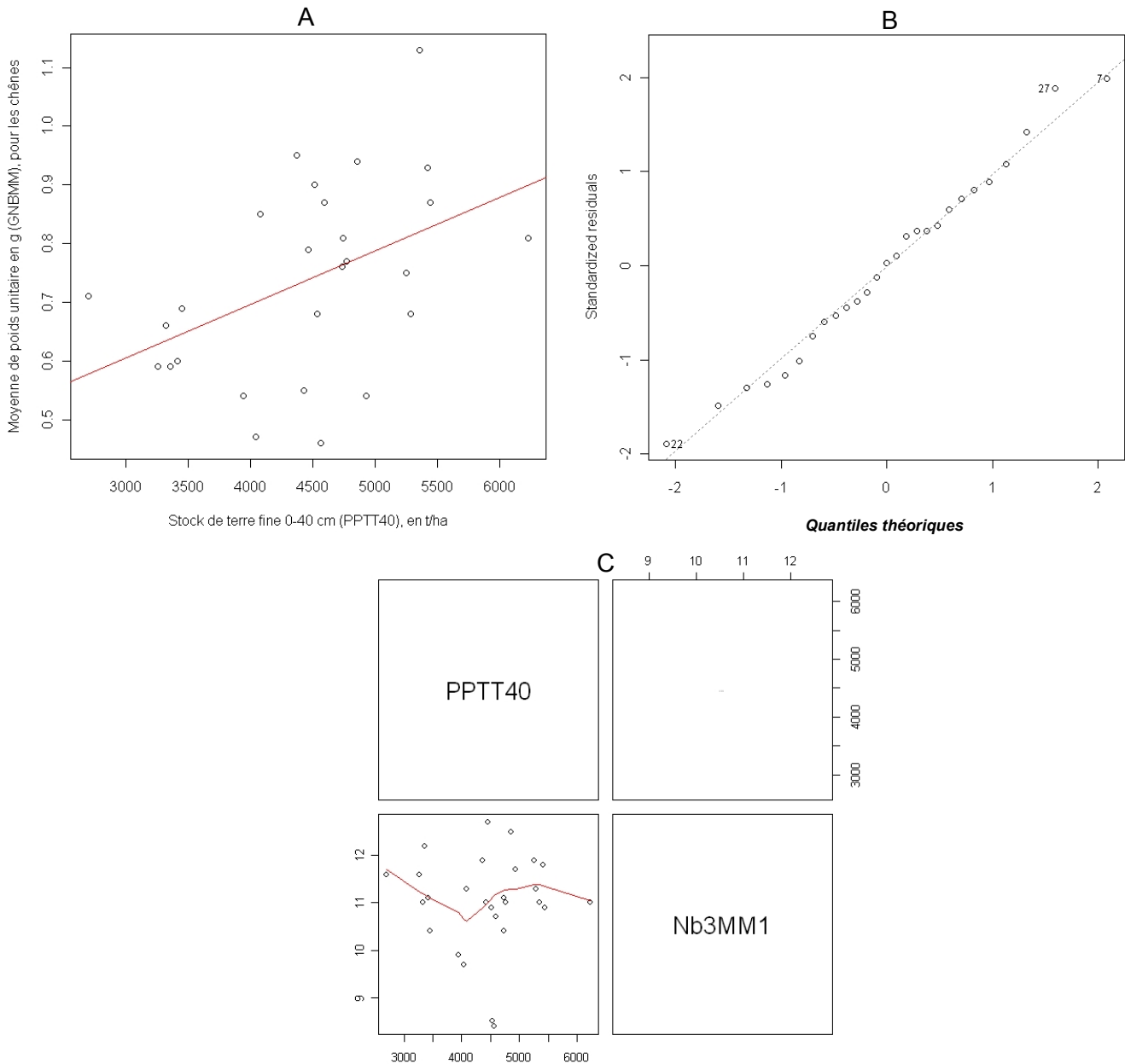
Seules les deux premières variables prises individuellement sont significatives. On refait une Anova de type III avec ces deux variables.

```
lm (GNBMM~PPTT40 + Nb3MM1)
Anova (l3, type="III")
Anova Table (Type III tests)
Response: GNBMM
          Sum Sq Df F value Pr(>F)
(Intercept) 0.02274 1  1.2024 0.28372
PPTT40       0.14319 1  7.5712 0.01111 *
Nb3MM1       0.10652 1  5.6323 0.02598 *
Residuals    0.45391 24
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Le stock de terre fine (PPTT40) et la moyenne décennale du mois de janvier pour le nombre de jour où la température est comprise entre 0 et 5°C (Nb3M M1) sont significatifs au seuil de 5% pour un AIC

de -104,31. Les résultats sont similaires en prenant le jeu de données de la démarche exploratoire.

Les graphes suivants montrent, le nuage de point (A) entre le poids unitaire et le stock de terre fine (PPTT40), la droite de Henri des résidus (B) et la corrélation entre les deux variables (C).



- Chêne pédonculé, nombre de fruits/ha (NBFMM)

En premier lieu le stepAIC retient l'âge du peuplement :

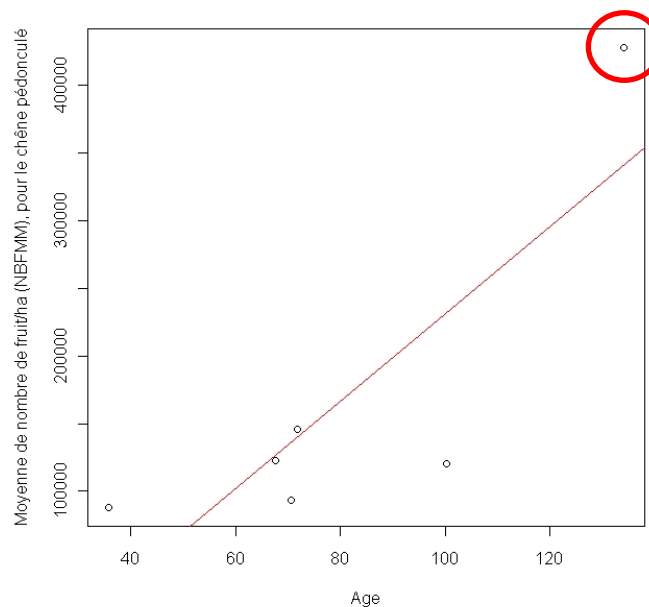
Step: AIC=137.15

NBFMM ~ Age

L'Anova indique que la variable est significative au seuil de 5%.

Anova (lm(NBFMM~Age))					
Analysis of Variance Table					
Response: NBFMM					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Age	1	5.8338e+10	5.8338e+10	8.9602	0.04020 *
Residuals	4	2.6043e+10	6.5108e+09		
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

Le nuage de point fait quant à lui apparaître un point aberrant.



On contraint le jeu de données sans ce point aberrant et refait tourner le stepAIC. Il ressort de cette nouvelle sélection que ce sont les moyennes décennales des températures minimales quotidiennes (TnMMG). Au regard de l'Anova, cette variable n'est pas significative et on ne peut donc conclure. Ce constat est également le même avec les données de la démarche exploratoire.

Step: AIC=88.2

NBFMM ~ TnMMG

```
Anova (lm(NBFMM~TnMMG) , data=CHP [CHP$NBFMM<400000,])
Analysis of Variance Table
Response: NBFMM
          Df      Sum Sq   Mean Sq F value Pr(>F)
TnMMG      1 9.3004e+09 9.3004e+09  0.4955 0.5203
Residuals  4 7.5081e+10 1.8770e+10
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

- Chêne pédonculé, poids/ha (KGFMM)

La sélection conserve le réservoir utilisable maximal du sol (RUM) :

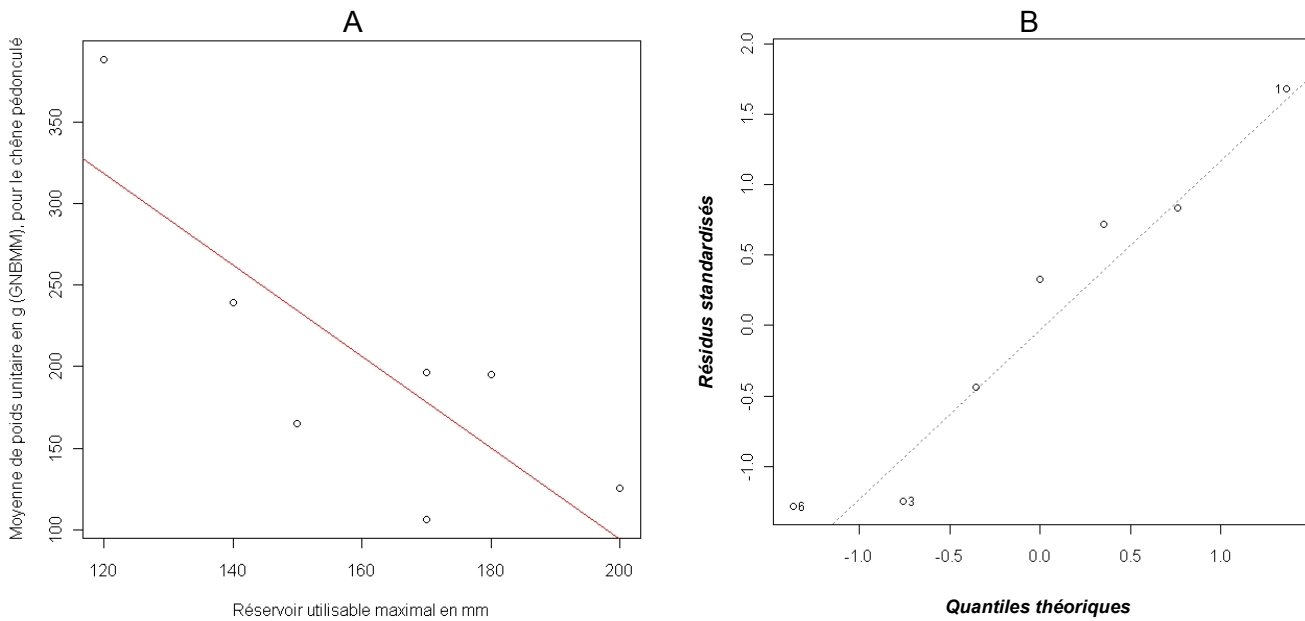
Step: AIC=59.24

KGFMM ~ RUM

Cette variable est de plus significative et la distribution du nuage de point est acceptable. Il convient de rappeler qu'il ne s'agit ici que d'une tendance.

```
Anova (lm(KGFMM~RUM))
Analysis of Variance Table
Response: KGFMM
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
RUM        1  33771   33771   9.0171   0.03 *
Residuals  5  18726    3745
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Les illustrations suivantes montrent, le nuage de point (A) entre le poids/ha et la réserve utile du sol (RUM) et la droite de Henri des résidus (B).



- Chêne pédonculé, poids unitaire (GNBMM)

Le stepAIC retient le pH du sol:

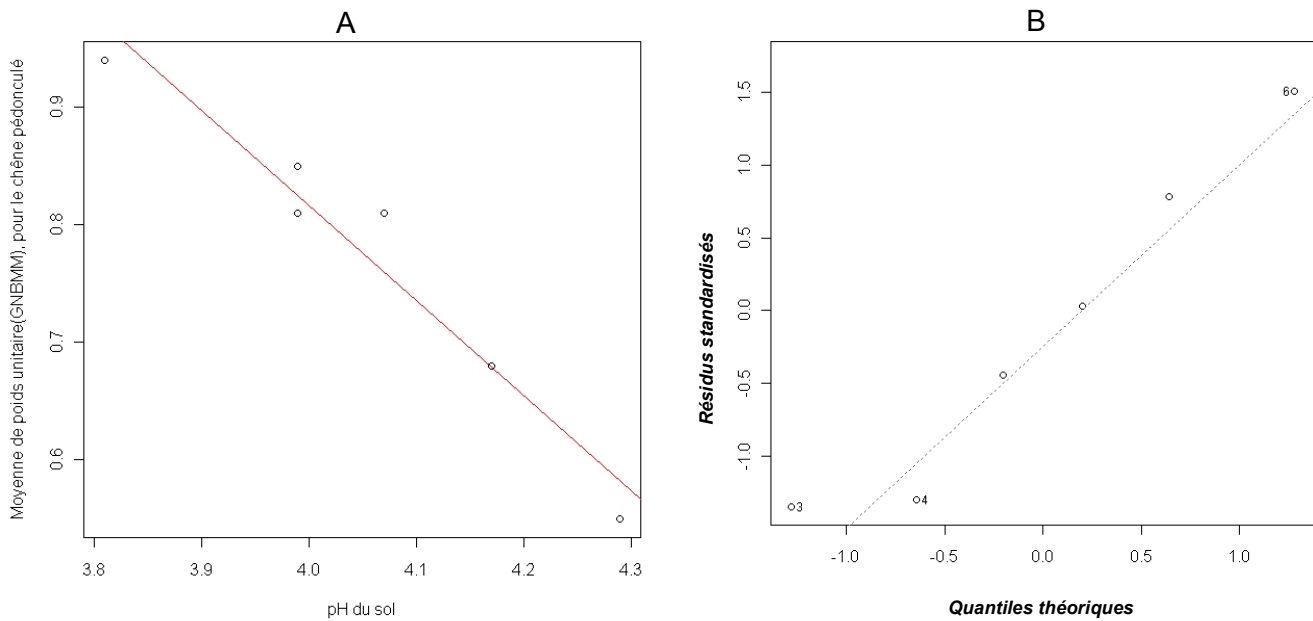
Step: AIC=-38.19

GNBMM ~ pHca0_40

Cette variable est de plus significative et la distribution du nuage de point est acceptable. Tout comme précédemment, il est important de rappeler qu'il ne s'agit que d'une tendance.

```
Anova(lm(GNB~pHca0_40))
Analysis of Variance Table
Response: GNB
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
pHca0_40  1 0.089631 0.089631  67.618 0.001192 **
Residuals  4 0.005302 0.001326
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Les graphiques suivants retracent le nuage de point (A) entre le poids unitaire et le pH du sol et la droite de Henri des résidus (B).



- Chêne sessile, nombre de fruits/ha (NBFMM)

Le stepAIC sélectionne le stock de terre fine (PPTT40) et le rapport C/N (CN40).

Step: AIC=477.54

NBFMM ~ PPTT40 + CN40

L'Anova de type III montre que les deux variables sont significatives au seuil de 5%.

```

Anova type="III"
Anova Table (Type III tests)
Response: NBFMM

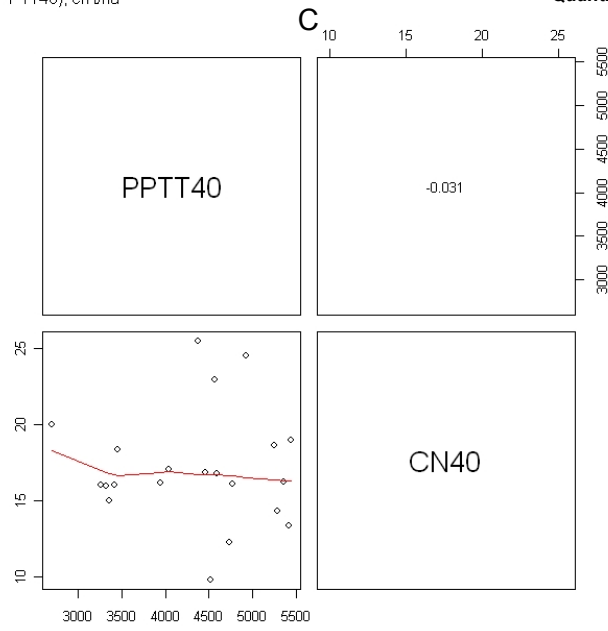
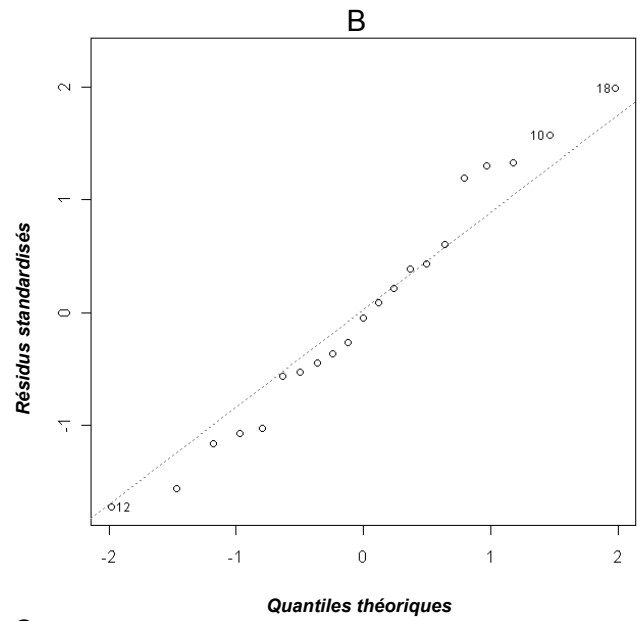
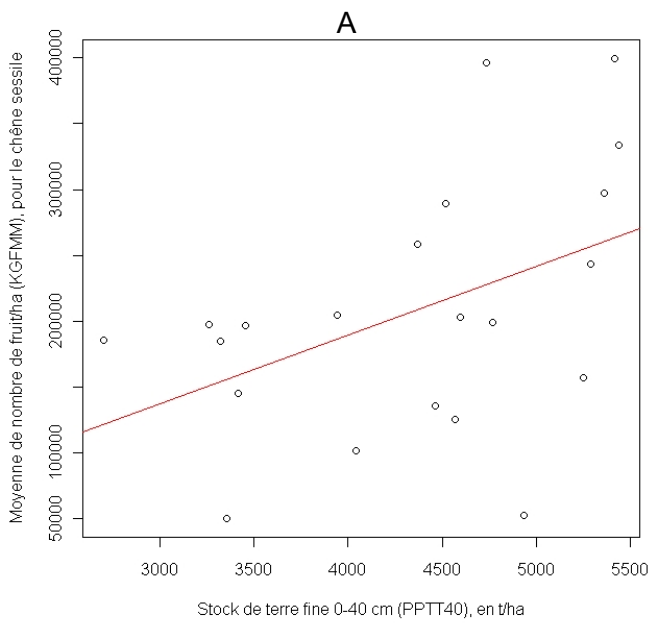
```

	Sum Sq	Df	F value	Pr(>F)
(Intercept)	1.0841e+10	1	1.6456	0.21584
PPTT40	3.5302e+10	1	5.3586	0.03263 *
CN40	3.0642e+10	1	4.6512	0.04480 *
Residuals	1.1858e+11	18		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Les figures suivantes montrent, le nuage de point (A) entre le nombre de fruit/ha et le rapport C/N, la droite de Henri des résidus (B) et la corrélation entre les deux variables (C).

Les résultats sont identiques pour le jeu de données issu de la démarche exploratoire.



- Chêne sessile, poids unitaire (GNBMM)

Pour le poids unitaire l'outil de sélection de variables explicatives retient le stock de terre fine (PPTT40) et le taux de saturation (S_T40) :

Step: AIC=-79.26

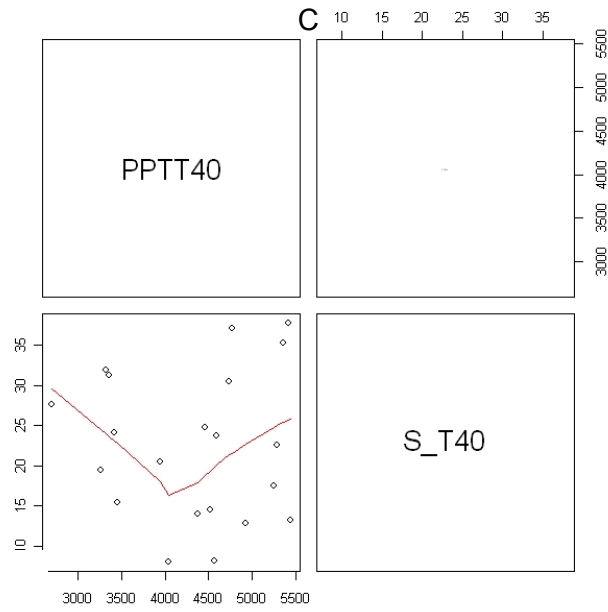
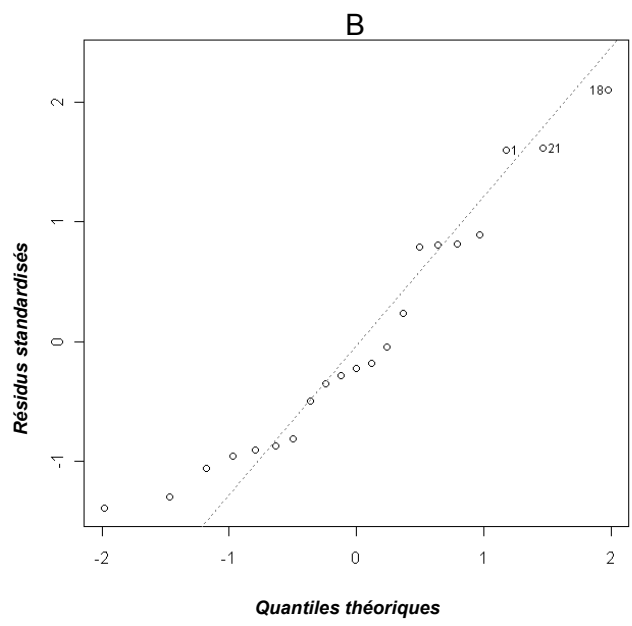
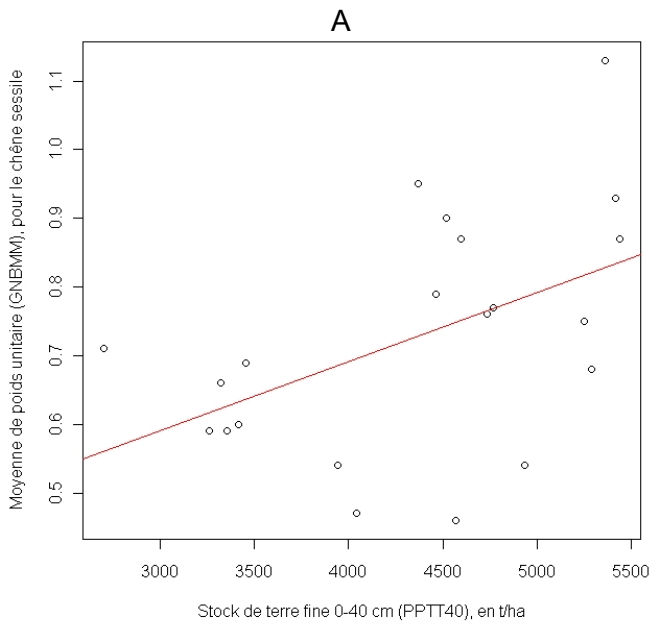
GNBMM ~ PPTT40 + S_T40

Ces deux variables sont significatives au seuil de 5%.

```
lm(GNBMM~PPTT40 + S_T40)
Anova type="III"
Anova Table (Type III tests)
Response: GNBMM
      Sum Sq Df F value  Pr(>F)
(Intercept) 0.00826  1  0.4102  0.52993
PPTT40      0.13850  1  6.8812  0.01724 *
S_T40      0.09908  1  4.9227  0.03960 *
Residuals   0.36229 18
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Les graphes suivants présentent, le nuage de point (A) entre le poids unitaire et le taux de saturation, la droite de Henri des résidus (B) et la corrélation entre les deux variables (C).

Les résultats sont identiques pour le jeu de données issu de la démarche exploratoire.



- Hêtre, nombre de fruits/ha (NBFMM)

La variable sélectionnée est la longitude (X_L2E) :

Step: AIC=406.89

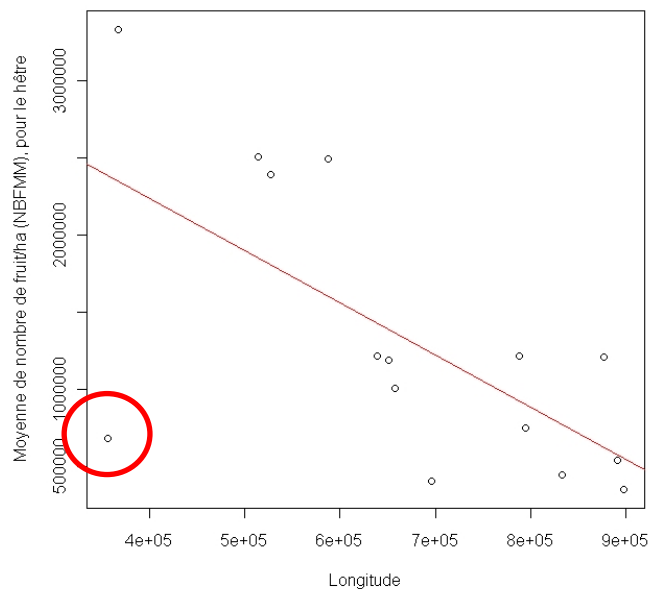
NBFMM ~ X_L2E

Au regard de l'Anova, cette variable est très significative. Le nuage de point laisse apparaître une valeur aberrante.

```
Anova (lm(NBFMM~X_L2E))
Analysis of Variance Table
Response: NBFMM
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
X_L2E	1	5.0824e+12	5.0824e+12	9.527	0.008668 **
Residuals	13	6.9351e+12	5.3347e+11		

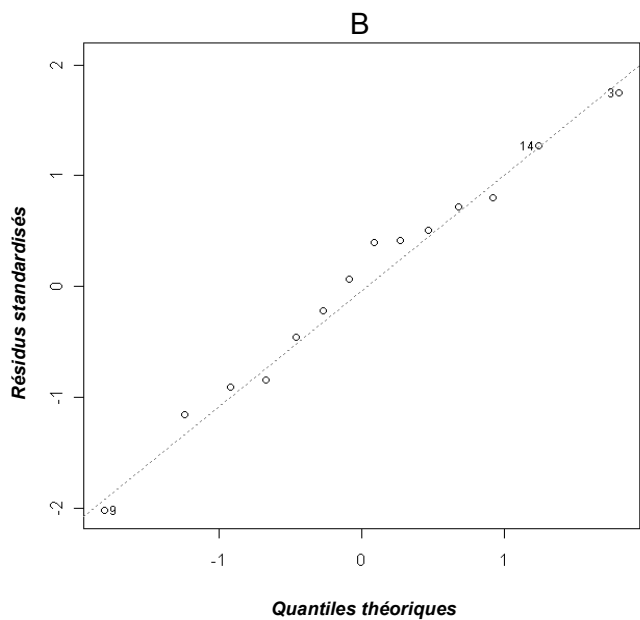
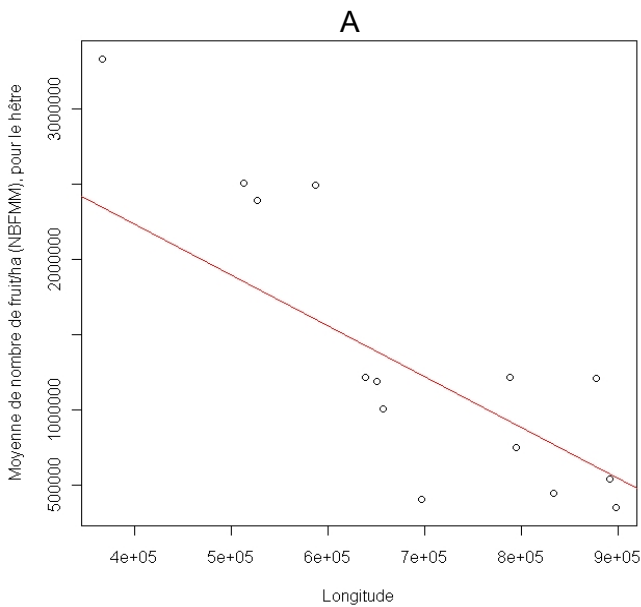
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1



Le stepAIC retient de nouveau la longitude sans la valeur aberrante. Cette dernière est renforcée au niveau de sa significativité puisqu'elle est inférieure à 1 pour 1000. L'encadré ci-après souligne ce constat également remarqué avec la démarche exploratoire.

```
Anova(lm(NBFMM~X_L2E,data=HET[HET$X_L2E>360000,]))
Analysis of Variance Table
Response: NBFMM
          Df      Sum Sq   Mean Sq F value    Pr(>F)
X_L2E      1 8.7372e+12  8.7372e+12   36.779 5.632e-05 ***
Residuals 12 2.8507e+12  2.3756e+11
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Les graphiques suivants montrent le nuage de point (A) entre le nombre de fruit/ha et la longitude et la droite de Henri des résidus (B), sans la valeur aberrante.



- Hêtre, poids/ha (KGFMM)

La surface du houppier de 1995 (Sh) est retenue par le stepAIC :

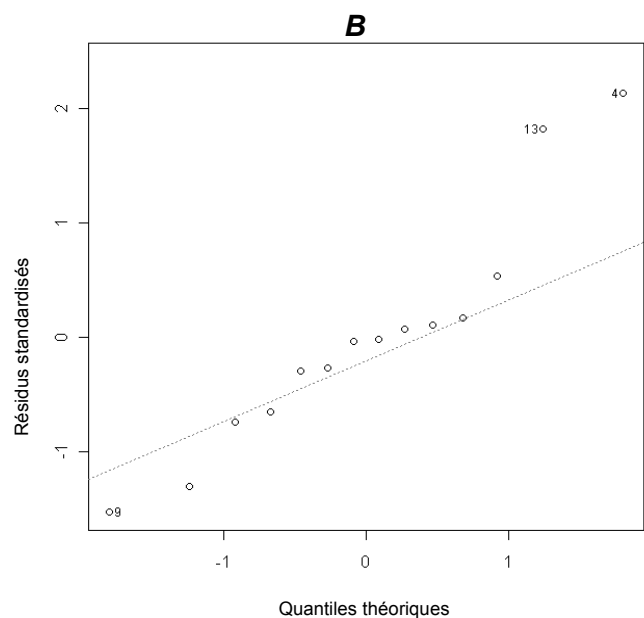
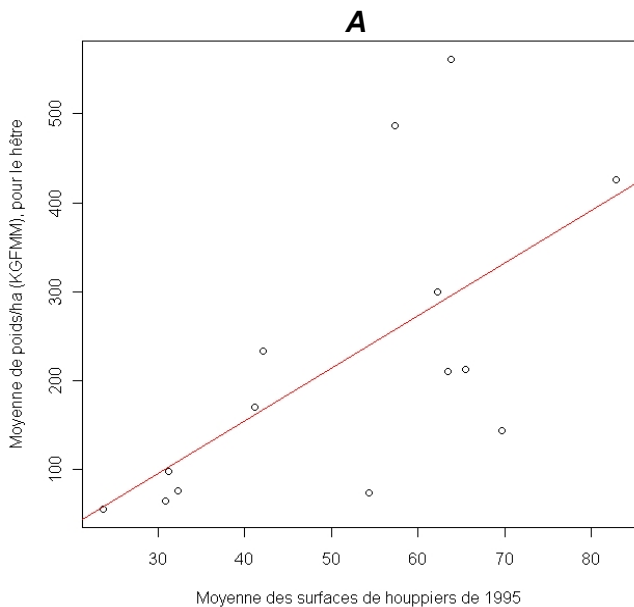
Step: AIC=138.56

KGFMM ~ Sh

Cette variable est significative au seuil de 5% comme en témoigne les résultats de l'Anova de l'encart suivant.


```
Anova (lm(KGFMM~Sh)
Analysis of Variance Table
Response: KGFMM
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Sh          1 144850  144850   8.3135 0.01375 *
Residuals 12 209081   17423
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Enfin, les illustrations suivantes exposent le nuage de point entre le poids/ha et la surface de houppier en 1995 (A) et la droite de Henri (B) des résidus.



Le graphique des résidus n'est vraiment pas satisfaisant et ne nous permet pas de conclure. Ce résultat s'applique également pour la démarche exploratoire.

- Hêtre, poids unitaire (GNBMM)

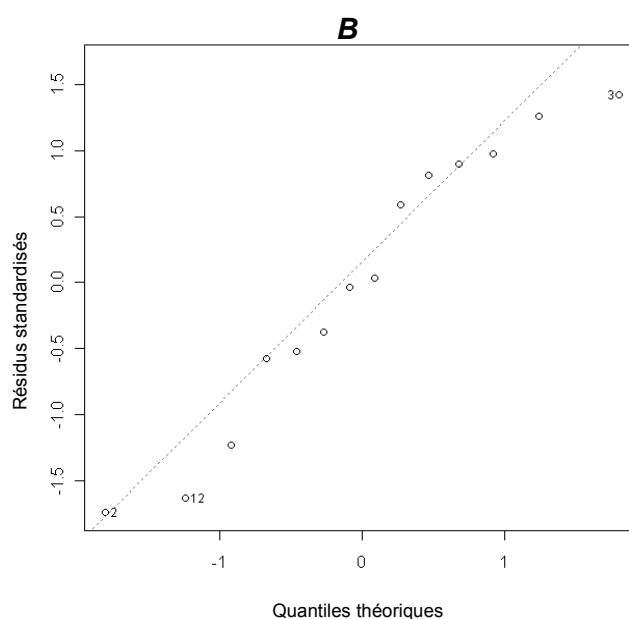
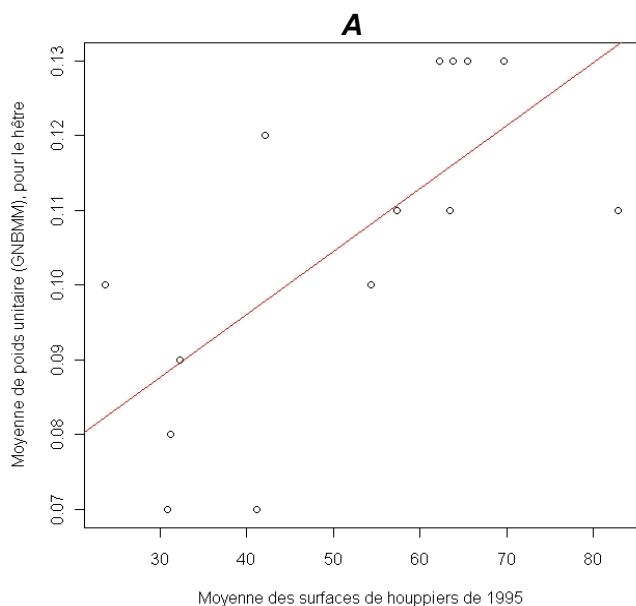
Là encore durant la phase de sélection, la surface de houppier de 1995 (Sh) ressort :

```
Step:  AIC=-113.37
GNBMM ~ Sh
```

L'encadré suivant met en avant les résultats de l'Anova qui situe le seuil de significativité de cette variable en dessous de 1%.

```
Anova (lm (GNBMM~Sh)
Analysis of Variance Table
Response: GNBMM
      Df    Sum Sq   Mean Sq F value    Pr(>F)
Sh      1 0.0029419 0.0029419  11.029 0.006099 **
Residuals 12 0.0032010 0.0002667
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Les graphes suivants montrent le nuage de point entre le poids unitaire et la surface de houppier en 1995 (A) et la droite de Henri (B) des résidus. Bien que la distribution des résidus autour de la droite de Henri ne soit pas tout à fait pertinente, je conserve la surface de houppier qui ressort également avec la démarche exploratoire.



Annexe 9 : Résultats des tests de Shapiro-Wilk vérifiant la normalité des variables à expliquer.

Placettes	Variables	Shapiro- Wilk	p-value	H0	Variables	Shapiro- Wilk	p-value	H0
	Initiales				Transformées			
CHP10	Nbre fruits/m ²	0,686	0,000	N	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2 \wedge 0,5)+1)$	0,941	0,592	O
	Poids/m ²	0,630	0,000	N	$\log((\text{poids/m}^2 \wedge 0,5)+1)$	0,866	0,113	O
	Poids unitaire	0,960	0,806	O				
CHP18	Nbre fruits/m ²	0,911	0,443	O	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2 \wedge 0,5)+1)$	0,869	0,224	O
	Poids/m ²	0,842	0,136	O	$\log((\text{poids/m}^2 \wedge 0,5)+1)$	0,887	0,302	O
	Poids unitaire	0,952	0,759	O				
CHP49	Nbre fruits/m ²	0,801	0,015	N	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2 \wedge 0,5)+1)$	0,952	0,7	O
	Poids/m ²	0,741	0,002	N	$\log((\text{poids/m}^2 \wedge 0,5)+1)$	0,926	0,409	O
	Poids unitaire	0,931	0,454	O				
CHP55	Nbre fruits/m ²	0,456	1,12 ^e -06	N	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2 \wedge 0,5)+1)$	0,929	0,440	O
	Poids/m ²	0,408	3,113 ^e -07	N	$\log((\text{poids/m}^2 \wedge 0,5)+1)$	0,837	0,041	N
	Poids unitaire	0,925	0,405	O				
CHP59	Nbre fruits/m ²	0,705	0,001	N	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2 \wedge 0,5)+1)$	0,951	0,686	O
	Poids/m ²	0,722	0,001	N	$\log((\text{poids/m}^2 \wedge 0,5)+1)$	0,937	0,523	O
	Poids unitaire	0,894	0,190	O				
CHP65	Nbre fruits/m ²	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Poids/m ²	0,752	0,013	N	$\log((\text{poids/m}^2 \wedge 0,5)+1)$	0,960	0,825	O
	Poids unitaire	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CHP70	Nbre fruits/m ²	0,654	0,000	N	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2 \wedge 0,5)+1)$	0,965	0,844	O
	Poids/m ²	0,513	5,191 ^e -06	N	$\log((\text{poids/m}^2 \wedge 0,5)+1)$	0,982	0,977	O
	Poids unitaire	0,921	0,366	O				
CHP71	Nbre fruits/m ²	0,966	0,870	O	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2 \wedge 0,5)+1)$	0,893	0,251	O
	Poids/m ²	0,559	3,17 ^e -05	N	$\log((\text{poids/m}^2 \wedge 0,5)+1)$	0,900	0,255	O
	Poids unitaire	0,888	0,226	O				

Placettes	Variables Initiales	Shapiro- Wilk	p-value	H0	Variables Transformées	Shapiro- Wilk	p-value	H0
CHS01	Nbre fruits/m ²	0,892	0,247	O	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2)+1)$	0,872	0,159	O
	Poids/m ²	0,823	0,037	N	$\log((\text{poids/m}^2)^{0,5}+1)$	0,910	0,321	O
	Poids unitaire	0,977	0,950	O				
CHS03	Nbre fruits/m ²	0,857	0,112	O	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2)+1)$	0,953	0,738	O
	Poids/m ²	0,810	0,037	N	$\log((\text{poids/m}^2)^{0,5}+1)$	0,912	0,368	O
	Poids unitaire	0,967	0,880	O				
CHS10	Nbre fruits/m ²	0,772	0,006	N	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2)+1)$	0,976	0,944	O
	Poids/m ²	0,783	0,018	N	$\log((\text{poids/m}^2)^{0,5}+1)$	0,978	0,953	O
	Poids unitaire	0,821	0,048	N				
CHS18	Nbre fruits/m ²	0,828	0,043	N	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2)+1)$	0,850	0,075	O
	Poids/m ²	0,781	0,008	N	$\log((\text{poids/m}^2)^{0,5}+1)$	0,870	0,101	O
	Poids unitaire	0,964	0,839	O				
CHS21	Nbre fruits/m ²	0,850	0,076	O	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2)+1)$	0,896	0,228	O
	Poids/m ²	0,777	0,011	N	$\log((\text{poids/m}^2)^{0,5}+1)$	0,904	0,281	O
	Poids unitaire	0,849	0,074	O				
CHS27	Nbre fruits/m ²	0,882	0,139	O	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2)+1)$	0,804	0,016	N
	Poids/m ²	0,874	0,111	O	$\log((\text{poids/m}^2)^{0,5}+1)$	0,821	0,026	N
	Poids unitaire	0,908	0,273	O				
CHS35	Nbre fruits/m ²	0,864	0,164	O	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2)+1)$	0,853	0,131	O
	Poids/m ²	0,917	0,449	O	$\log((\text{poids/m}^2)^{0,5}+1)$	0,829	0,078	O
	Poids unitaire	0,800	0,041	N				
CHS41	Nbre fruits/m ²	0,498	3,486 ^e -06	N	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2)+1)$	0,934	0,493	O
	Poids/m ²	0,457	1,150 ^e -06	N	$\log((\text{poids/m}^2)^{0,5}+1)$	0,947	0,637	O
	Poids unitaire	0,943	0,589	O				
CHS51	Nbre fruits/m ²	0,730	0,005	N	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2)+1)$	0,882	0,197	O
	Poids/m ²	0,683	0,001	N	$\log((\text{poids/m}^2)^{0,5}+1)$	0,914	0,386	O
	Poids unitaire	0,878	0,180	O				
CHS57a	Nbre fruits/m ²	0,715	0,001	N	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2)+1)$	0,895	0,193	O
	Poids/m ²	0,632	0,000	N	$\log((\text{poids/m}^2)^{0,5}+1)$	0,893	0,184	O
	Poids unitaire	0,913	0,304	O				
CHS57b	Nbre fruits/m ²	0,750	0,003	N	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2)+1)$	0,741	0,002	N
	Poids/m ²	0,732	0,002	N	$\log((\text{poids/m}^2)^{0,5}+1)$	0,770	0,006	N
	Poids unitaire	0,811	0,020	N				

CHS58	Nbre fruits/m ²	0,698	0,001	N	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2)+1)$	0,917	0,370	O
	Poids/m ²	0,554	2,781 ^e -05	N	$\log((\text{poids/m}^2)^{0,5}+1)$	0,932	0,505	O
	Poids unitaire	0,905	0,325	O				
CHS60	Nbre fruits/m ²	0,770	0,009	N	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2)+1)$	0,945	0,636	O
	Poids/m ²	0,776	0,015	N	$\log((\text{poids/m}^2)^{0,5}+1)$	0,899	0,286	O
	Poids unitaire	0,816	0,042	N				
CHS61	Nbre fruits/m ²	0,779	0,008	N	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2)+1)$	0,902	0,233	O
	Poids/m ²	0,756	0,006	N	$\log((\text{poids/m}^2)^{0,5}+1)$	0,870	0,123	O
	Poids unitaire	0,873	0,134	O				
CHS67	Nbre fruits/m ²	0,629	0,001	N	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2)+1)$	0,919	0,502	O
	Poids/m ²	0,712	0,005	N	$\log((\text{poids/m}^2)^{0,5}+1)$	0,922	0,489	O
	Poids unitaire	0,899	0,371	O				
CHS68	Nbre fruits/m ²	0,665	0,000	N	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2)+1)$	0,990	0,994	O
	Poids/m ²	0,638	0,000	N	$\log((\text{poids/m}^2)^{0,5}+1)$	0,983	0,981	O
	Poids unitaire	0,918	0,414	O				
CHS72	Nbre fruits/m ²	0,807	0,034	N	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2)+1)$	0,868	0,143	O
	Poids/m ²	0,768	0,008	N	$\log((\text{poids/m}^2)^{0,5}+1)$	0,918	0,376	O
	Poids unitaire	0,942	0,636	O				
CHS77	Nbre fruits/m ²	0,919	0,351	O	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2)+1)$	0,920	0,358	O
	Poids/m ²	0,930	0,453	O	$\log((\text{poids/m}^2)^{0,5}+1)$	0,909	0,275	O
	Poids unitaire	0,947	0,634	O				
CHS81	Nbre fruits/m ²	0,899	0,247	O	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2)+1)$	0,807	0,025	N
	Poids/m ²	0,887	0,159	O	$\log((\text{poids/m}^2)^{0,5}+1)$	0,803	0,015	N
	Poids unitaire	0,893	0,215	O				
CHS86	Nbre fruits/m ²	0,731	0,003	N	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2)+1)$	0,978	0,910	O
	Poids/m ²	0,686	0,000	N	$\log((\text{poids/m}^2)^{0,5}+1)$	0,949	0,684	O
	Poids unitaire	0,915	0,359	O				
CHS88	Nbre fruits/m ²	0,611	0,000	N	$\log((\text{Nbre fruits/m}^2)+1)$	0,971	0,905	O
	Poids/m ²	0,532	8,705 ^e -06	N	$\log((\text{poids/m}^2)^{0,5}+1)$	0,936	0,516	O
	Poids unitaire	0,932	0,503	O				

Placettes	Variables Initiales				Variables Transformées			
	Initiales var/ha	Shapiro- Wilk	p-value	H0	Transformées	Shapiro- Wilk	p-value	H0
HET02	Nbre fruits/m ²	0,719	0,001	N	log((Nbre fruits/m ² ^{0,5})+1)	0,944	0,602	O
	Poids/m ²	0,724	0,002	N	log((Poids/m ² ^{0,5})+1)	0,920	0,398	O
	Poids unitaire	0,926	0,447	O				
HET03	Nbre fruits/m ²	0,626	0,000	N	log((Nbre fruits/m ² ^{0,5})+1)	0,858	0,09	O
	Poids/m ²	0,651	0,000	N	log((Poids/m ² ^{0,5})+1)	0,864	0,132	O
	Poids unitaire	0,820	0,047	N				
HET04	Nbre fruits/m ²	0,691	0,001	N	log((Nbre fruits/m ² ^{0,5})+1)	0,908	0,305	O
	Poids/m ²	0,674	0,000	N	log((Poids/m ² ^{0,5})+1)	0,874	0,135	O
	Poids unitaire	0,839	0,056	O				
HET09	Nbre fruits/m ²	0,825	0,097	O	log((Poids/m ² ^{0,5})+1)	0,920	0,503	O
	Poids/m ²	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Poids unitaire	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
HET14	Nbre fruits/m ²	0,907	0,262	O	log((Nbre fruits/m ² ^{0,5})+1)	0,873	0,108	O
	Poids/m ²	0,896	0,230	O	log((Poids/m ² ^{0,5})+1)	0,895	0,227	O
	Poids unitaire	0,882	0,167	O				
HET21	Nbre fruits/m ²	0,832	0,047	N	log((Nbre fruits/m ² ^{0,5})+1)	0,901	0,228	O
	Poids/m ²	0,741	0,01	N	log((Poids/m ² ^{0,5})+1)	0,878	0,219	O
	Poids unitaire	0,813	0,055	O				
HET25	Nbre fruits/m ²	0,533	1,582 ^e -05	N	log((Nbre fruits/m ² ^{0,5})+1)	0,902	0,268	O
	Poids/m ²	0,503	1,144 ^e -05	N	log((Poids/m ² ^{0,5})+1)	0,862	0,127	O
	Poids unitaire	0,883	0,204	O				
HET26	Nbre fruits/m ²	0,671	0,000	N	log((Nbre fruits/m ² ^{0,5})+1)	0,865	0,108	O
	Poids/m ²	0,698	0,002	N	log((Poids/m ² ^{0,5})+1)	0,855	0,108	O
	Poids unitaire	0,884	0,209	O				
HET29	Nbre fruits/m ²	0,870	0,125	O	log((Nbre fruits/m ² ^{0,5})+1)	0,847	0,070	O
	Poids/m ²	0,819	0,046	N	log((Poids/m ² ^{0,5})+1)	0,924	0,469	O
	Poids unitaire	0,775	0,015	N				
HET30	Nbre fruits/m ²	0,544	1,220 ^e -05	N	log((Nbre fruits/m ² ^{0,5})+1)	0,950	0,667	O
	Poids/m ²	0,628	0,000	N	log((Poids/m ² ^{0,5})+1)	0,940	0,638	O
	Poids unitaire	0,807	0,048	N				
HET55	Nbre fruits/m ²	0,653	0,001	N	log((Nbre fruits/m ² ^{0,5})+1)	0,859	0,149	O
	Poids/m ²	0,658	0,002	N	log((Poids/m ² ^{0,5})+1)	0,893	0,333	O
	Poids unitaire	0,922	0,526	O				

HET60	Nbre fruits/m ²	0,634	0,000	N	$\log((\text{Nbre fruits}/\text{m}^2)^{0,5}+1)$	0,882	0,137	O
	Poids/m ²	0,645	0,000	N	$\log((\text{Poids}/\text{m}^2)^{0,5}+1)$	0,819	0,034	N
	Poids unitaire	0,900	0,255	O				
HET64	Nbre fruits/m ²	0,622	0,000	N	$\log((\text{Nbre fruits}/\text{m}^2)^{0,5}+1)$	0,976	0,941	O
	Poids/m ²	0,684	0,001	N	$\log((\text{Poids}/\text{m}^2)^{0,5}+1)$	0,909	0,310	O
	Poids unitaire	0,866	0,210	O				
HET76	Nbre fruits/m ²	0,771	0,006	N	$\log((\text{Nbre fruits}/\text{m}^2)^{0,5}+1)$	0,852	0,061	O
	Poids/m ²	0,767	0,005	N	$\log((\text{Poids}/\text{m}^2)^{0,5}+1)$	0,877	0,121	O
	Poids unitaire	0,777	0,007	N				
HET81	Nbre fruits/m ²	0,86	0,095	O	$\log((\text{Nbre fruits}/\text{m}^2)^{0,5}+1)$	0,882	0,165	O
	Poids/m ²	0,901	0,385	O	$\log((\text{Poids}/\text{m}^2)^{0,5}+1)$	0,713	0,008	N
	Poids unitaire	0,746	0,018	N				
HET88	Nbre fruits/m ²	0,546	2,31 ^e -05	N	$\log((\text{Nbre fruits}/\text{m}^2)^{0,5}+1)$	0,882	0,165	O
	Poids/m ²	0,612	0,000	N	$\log((\text{Poids}/\text{m}^2)^{0,5}+1)$	0,875	0,207	O
	Poids unitaire	0,736	0,009	N				

Pour les chênes analysés conjointement, seule la variable transformée du nombre de fruit/ha diffère entre les deux espèces. Pour le chêne sessile il s'agit de $\log((\text{Nbre fruits}/\text{m}^2)^{0,5}+1)$ et pour le chêne pédonculé, nous avons la transformation suivante : $\log((\text{Nbre fruits}/\text{m}^2)+1)$. Nous appliquons donc la même transformation de la variable du chêne pédonculé. Le tableau suivant présente les résultats pour la variable transformée en $\log((\text{Nbre fruits}/\text{m}^2)^{0,5}+1)$ pour le chêne pédonculé.

Placettes	Variables Initiales	Shapiro- Wilk	p-value	H0	Variables Transformées	Shapiro- Wilk	p-value	H0
CHP10	Nbre fruits/m ²	0,686	0,000	N	$\log((\text{Nbre fruits}/\text{m}^2)+1)$	0,948	0,675	O
CHP18	Nbre fruits/m ²	0,911	0,443	O	$\log((\text{Nbre fruits}/\text{m}^2)+1)$	0,891	0,328	O
CHP49	Nbre fruits/m ²	0,801	0,015	N	$\log((\text{Nbre fruits}/\text{m}^2)+1)$	0,927	0,423	O
CHP55	Nbre fruits/m ²	0,456	1,12 ^e -06	N	$\log((\text{Nbre fruits}/\text{m}^2)+1)$	0,842	0,046	N
CHP59	Nbre fruits/m ²	0,705	0,001	N	$\log((\text{Nbre fruits}/\text{m}^2)+1)$	0,931	0,464	O
CHP70	Nbre fruits/m ²	0,654	0,000	N	$\log((\text{Nbre fruits}/\text{m}^2)+1)$	0,980	0,961	O
CHP71	Nbre fruits/m ²	0,966	0,870	O	$\log((\text{Nbre fruits}/\text{m}^2)+1)$	0,892	0,244	O

Annexe 10 : Détails des modèles linéaires mixtes des fructifications annuelles.

- Chêne sessile, poids/m² (Log((poids/m²)^{0,5} + 1))

summary

Linear mixed-effects model fit by maximum likelihood

AIC	BIC	logLik
258.2286	274.9536	-123.1143

Random effects:

Formula: ~1 | CODE

(Intercept) Residual

StdDev: 5.078671e-05 0.6750383

Fixed effects: log((GM2^{0.5}) + 1) ~ log((GM2_2^{0.5}) + 1) + ETPthete_1 + SV91

	Value	Std.Error	DF	t-value	p-value
(Intercept)	2.9120119	0.9815211	96	2.966836	0.0038
log((GM2_2 ^{0.5}) + 1)	0.1993778	0.0567630	96	3.512459	0.0007
ETPthete_1	-0.0302440	0.0067816	96	-4.459690	0.0000
SV91	0.0087413	0.0033953	96	2.574550	0.0116

Correlation:

	(Intr)	1((G+1	ETPt_1
log((GM2_2 ^{0.5}) + 1)	0.040		
ETPthete_1	-0.804	-0.102	
SV91	-0.584	-0.111	0.003

Standardized Within-Group Residuals:

Min	Q1	Med	Q3	Max
-1.9780724	-0.6549837	-0.0928691	0.8271906	1.9239456

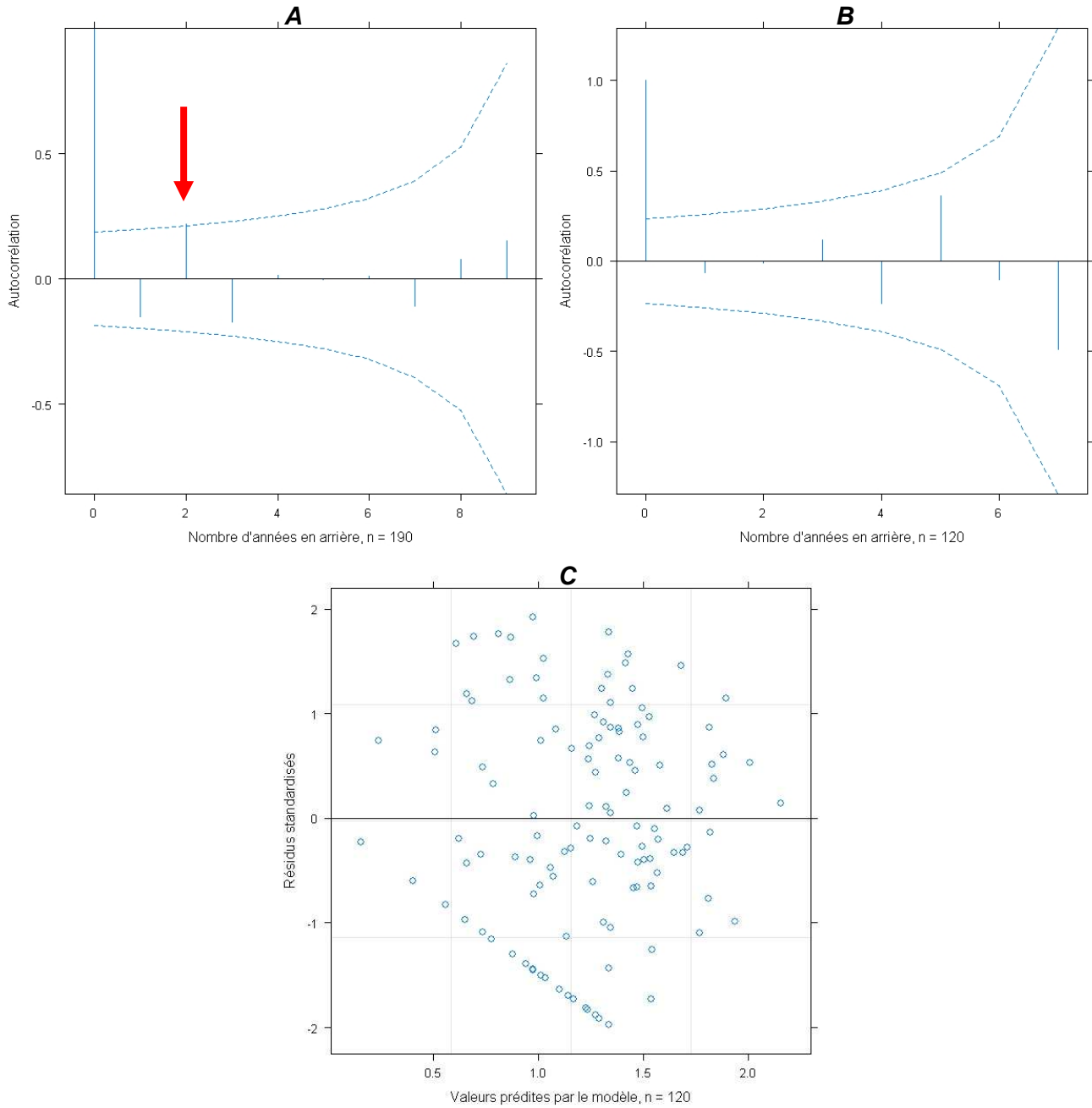
Number of Observations: 120

Number of Groups: 21

Anova

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	96	385.8356	<.0001
log((GM2_2 ^{0.5}) + 1)	1	96	11.4486	0.0010
ETPthete_1	1	96	19.9660	<.0001
SV91	1	96	6.6283	0.0116

Les graphiques suivants montrent les caractéristiques du modèle de poids de fruit/ha (logarithme de la racine carrée de la masse de fruit/m²) du chêne sessile : en (A) auto corrélation temporelle initiale, en (B) auto corrélation temporelle finale, en (C) distribution des résidus en fonction des valeurs prédites



- Chêne sessile, poids unitaire (GNB)

summary

Linear mixed-effects model fit by maximum likelihood

AIC	BIC	logLik
134.4846	150.5773	-61.24228

Random effects:

Formula: ~1 | CODE

(Intercept) Residual

StdDev: 0.1458637 0.4065703

Fixed effects: GNB ~ GNB_2 + ETPthete_1 + SV91

	Value	Std.Error	DF	t-value	p-value
(Intercept)	2.1054473	0.6590368	84	3.194734	0.0020
GNB_2	0.0971951	0.0927125	84	1.048350	0.2975
ETPthete_1	-0.0204227	0.0046013	84	-4.438438	0.0000
SV91	0.0055282	0.0023143	84	2.388683	0.0191

Correlation:

	(Intr)	GNB_2	ETPt_1
GNB_2		0.127	
ETPthete_1	-0.801		-0.159
SV91	-0.581	-0.159	-0.005

Standardized Within-Group Residuals:

Min	Q1	Med	Q3	Max
-2.02627451	-0.67365252	-0.02157807	0.78729255	1.99867738

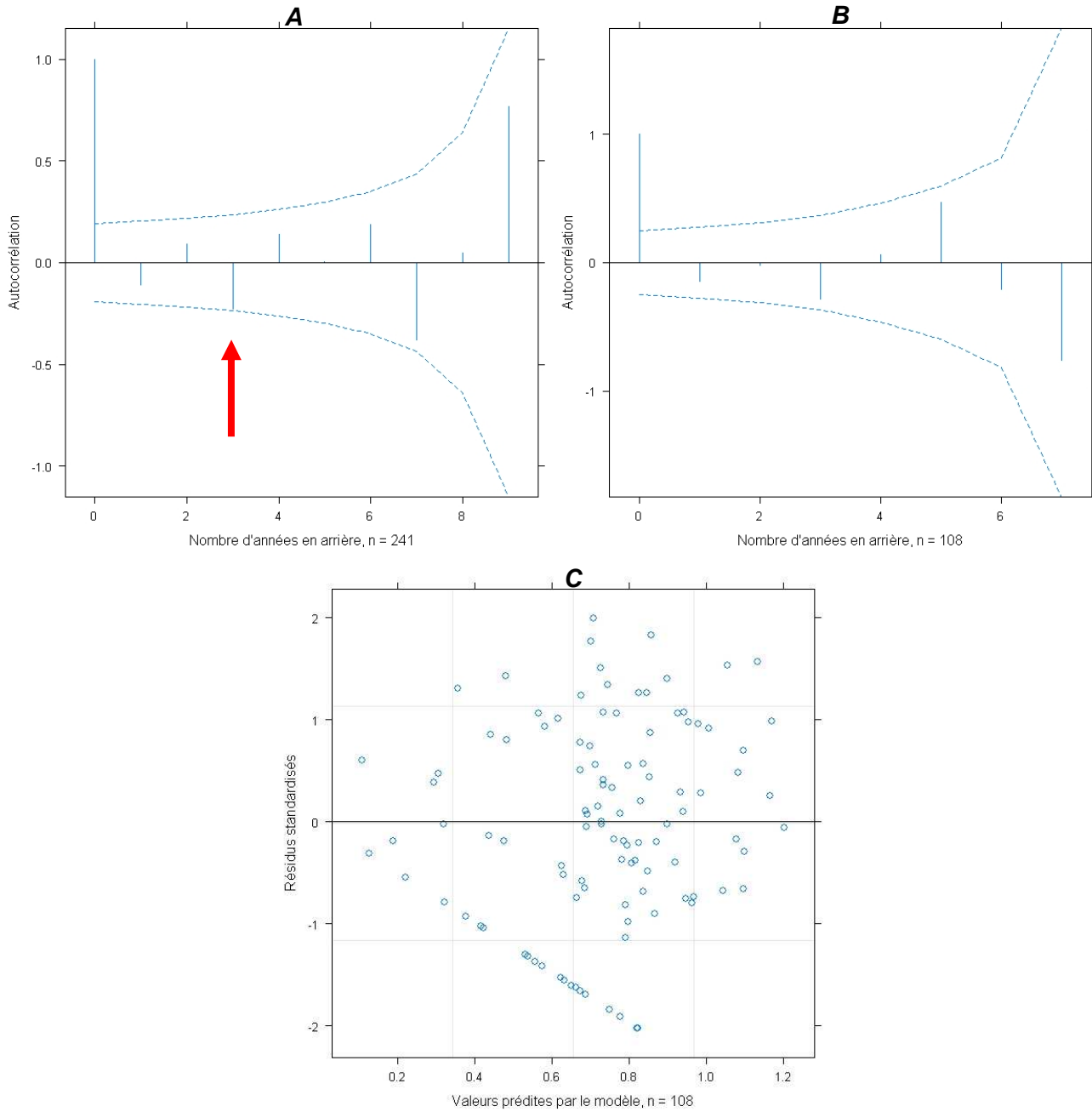
Number of Observations: 108

Number of Groups: 21

Anova

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	84	188.91494	<.0001
GNB_2	1	84	0.54825	0.4611
ETPthete_1	1	84	19.58392	<.0001
SV91	1	84	5.70581	0.0191

Ces trois illustrations présentent les caractéristiques du modèle de poids unitaire du gland chez le chêne sessile : en (A) auto corrélation temporelle initiale, en (B) auto corrélation temporelle finale, en (C) distribution des résidus en fonction des valeurs prédites.



- Hêtre, nombre de fruits/m² ($\log((\text{NBFM2}^{0.5}) + 1)$)

summary

Linear mixed-effects model fit by maximum likelihood

AIC BIC logLik

253.6991 268.8947 -120.8495

Random effects:

Formula: ~1 | CODE

(Intercept) Residual

StdDev: 4.019381e-05 0.8873808

Fixed effects: $\log((\text{NBFM2}^{0.5}) + 1) \sim \log((\text{NBFM2}_2^{0.5}) + 1) + \text{Bhctuete}_1$

+ DD1

	Value	Std.Error	DF	t-value	p-value
(Intercept)	1.9926297	0.8256763	74	2.413330	0.0183
$\log((\text{NBFM2}_2^{0.5}) + 1)$	0.3487232	0.0922204	74	3.781412	0.0003
Bhctuete_1	-0.0126993	0.0033594	74	-3.780250	0.0003
DD1	-0.0123518	0.0068118	74	-1.813294	0.0738

Correlation:

	(Intr)	1((N+1	Bhct_1
$\log((\text{NBFM2}_2^{0.5}) + 1)$	-0.364		
Bhctuete_1	0.122	0.291	
DD1	-0.974	0.258	-0.011

Standardized Within-Group Residuals:

	Min	Q1	Med	Q3	Max
	-2.46091142	-0.61522744	0.01276294	0.77896959	2.10012690

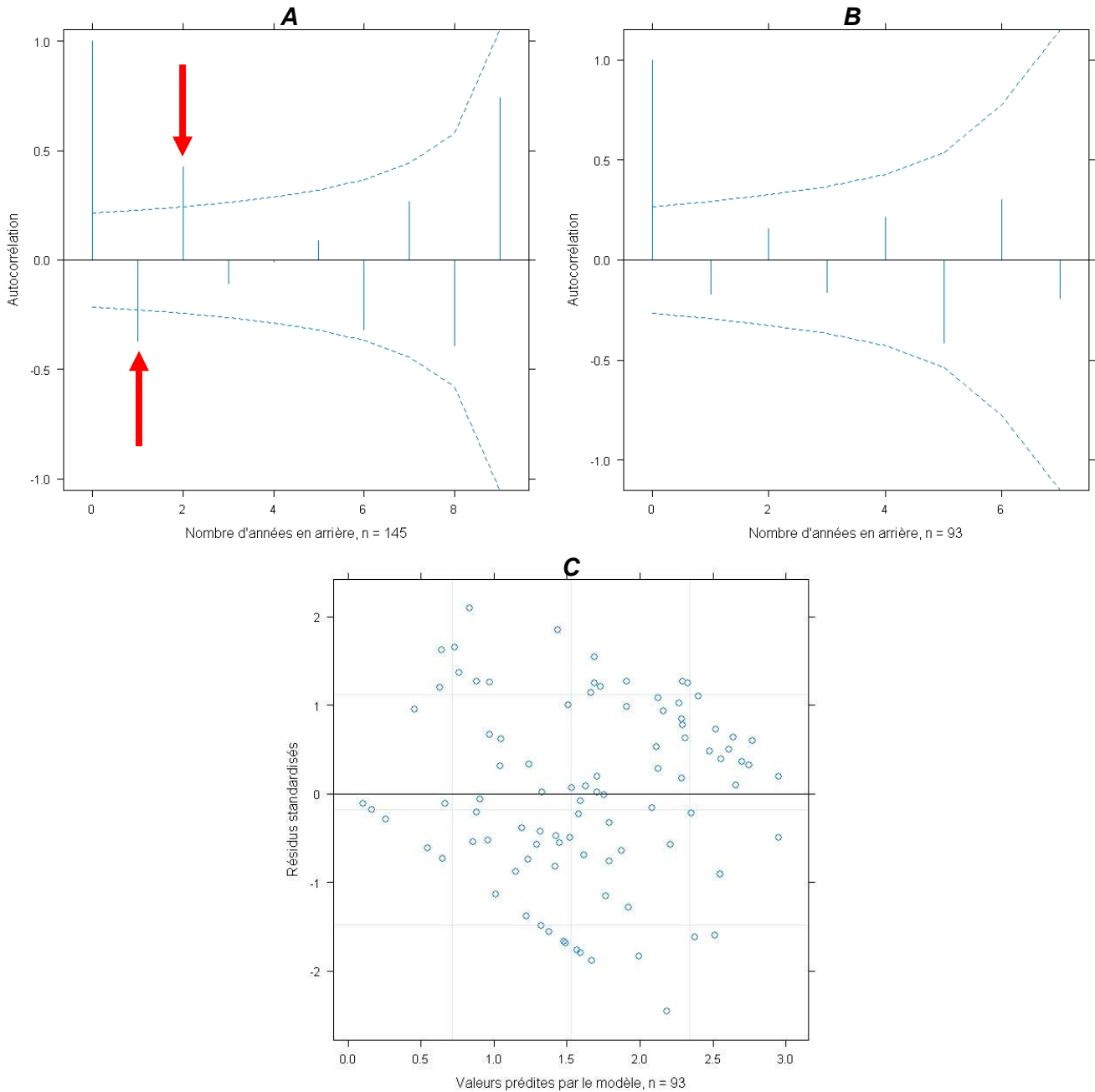
Number of Observations: 93

Number of Groups: 16

Anova

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	74	305.60994	<.0001
$\log((\text{NBFM2}_2^{0.5}) + 1)$	1	74	34.00248	<.0001
Bhctuete_1	1	74	14.44376	0.0003
DD1	1	74	3.28804	0.0738

Graphes des caractéristiques du modèle du nombre de fruit/ha (logarithme de la racine carrée du nombre de fruit/m²) du hêtre : en (A) auto corrélation temporelle initiale, en (B) auto corrélation temporelle finale, en (C) distribution des résidus en fonction des valeurs prédites.



- Hêtre, poids/m² ($\log(\text{GM2}^{0.5}) + 1$)

Summary

Linear mixed-effects model fit by maximum likelihood

Data: hetre.gd

AIC	BIC	logLik
174.5474	186.6416	-82.2737

Random effects:

Formula: ~1 | CODE

(Intercept) Residual

StdDev: 0.3368311 0.5958916

Fixed effects: $\log((\text{GM2}^{0.5}) + 1) \sim \log((\text{GM2_1}^{0.5}) + 1) + \text{Bhcthete_1}$

	Value	Std.Error	DF	t-value	p-value
(Intercept)	0.9696236	0.16264248	66	5.961687	0
$\log((\text{GM2_1}^{0.5}) + 1)$	-0.4750958	0.08651909	66	-5.491225	0
Bhcthete_1	-0.0090104	0.00198511	66	-4.538999	0

Correlation:

	(Intr)	1((G+1
$\log((\text{GM2_1}^{0.5}) + 1)$	-0.527	
Bhcthete_1	0.549	-0.108

Standardized Within-Group Residuals:

Min	Q1	Med	Q3	Max
-1.8197646	-0.6099927	-0.1390813	0.6468809	2.4014241

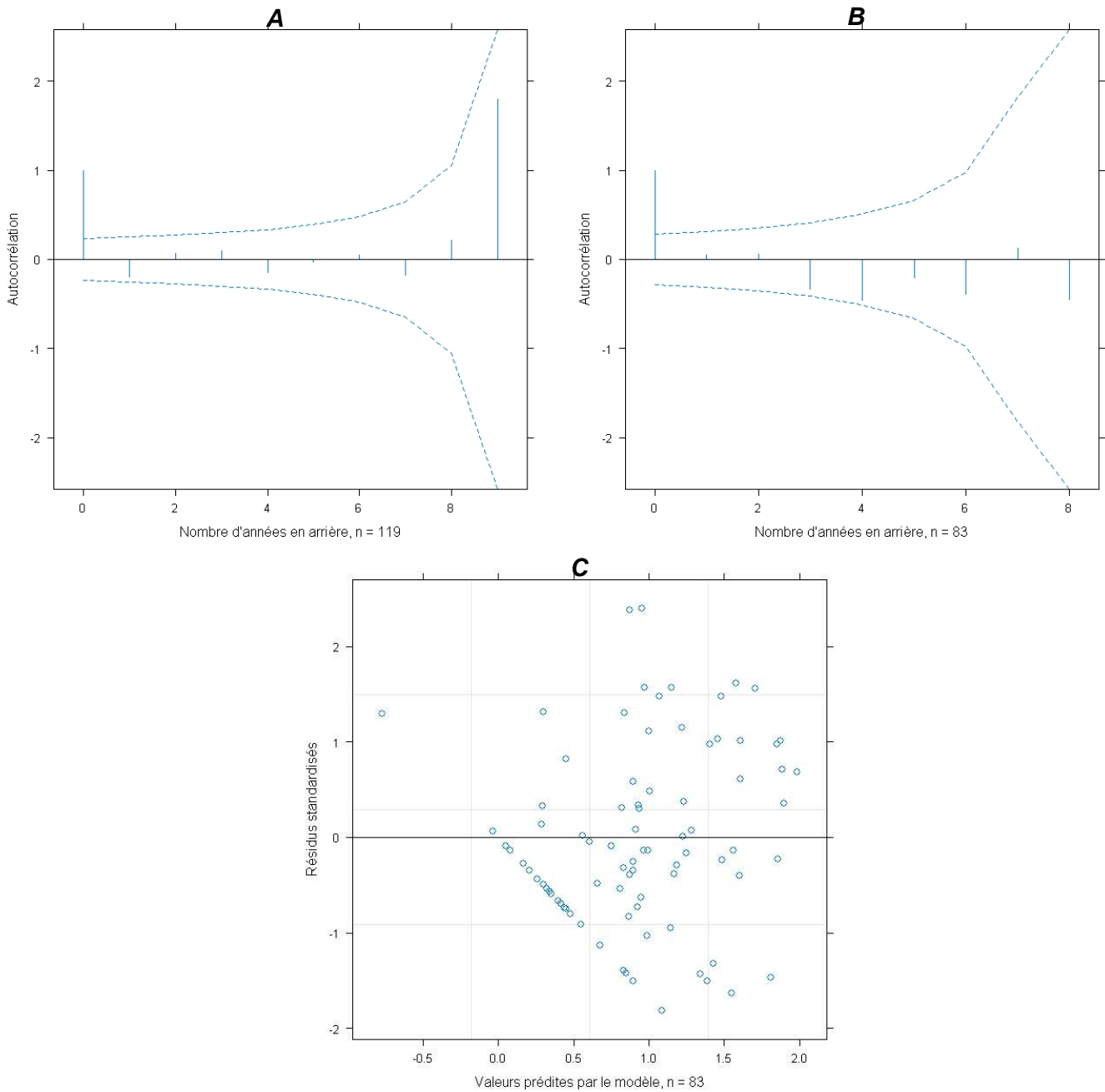
Number of Observations: 83

Number of Groups: 15

Anova

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	66	66.35017	<.0001
$\log((\text{GM2_1}^{0.5}) + 1)$	1	66	36.18193	<.0001
Bhcthete_1	1	66	20.60251	<.0001

Graphes des caractéristiques du modèle du poids de fruit/ha (logarithme de la racine carrée de la masse de fruit/m²) du hêtre : en (A) auto corrélation temporelle initiale, en (B) auto corrélation temporelle finale, en (C) distribution des résidus en fonction des valeurs prédites.



- Hêtre, poids unitaire (GNB)

summary

Linear mixed-effects model fit by maximum likelihood

	AIC	BIC	logLik
	-154.3551	-145.3044	81.17757

Random effects:

Formula: ~1 | CODE

	(Intercept)	Residual
--	-------------	----------

StdDev:	9.53373e-07	0.07712833
---------	-------------	------------

Fixed effects: GNB ~ GNB_2

	Value	Std.Error	DF	t-value	p-value
(Intercept)	0.1036205	0.01560664	55	6.639514	0.0000
GNB_2	0.1490952	0.11418299	55	1.305757	0.1971

Correlation:

(Intr)

GNB_2	-0.804
-------	--------

Standardized Within-Group Residuals:

	Min	Q1	Med	Q3	Max
	-1.6334439995	-0.5535461945	-0.0002722652	0.5376747136	3.1944095580

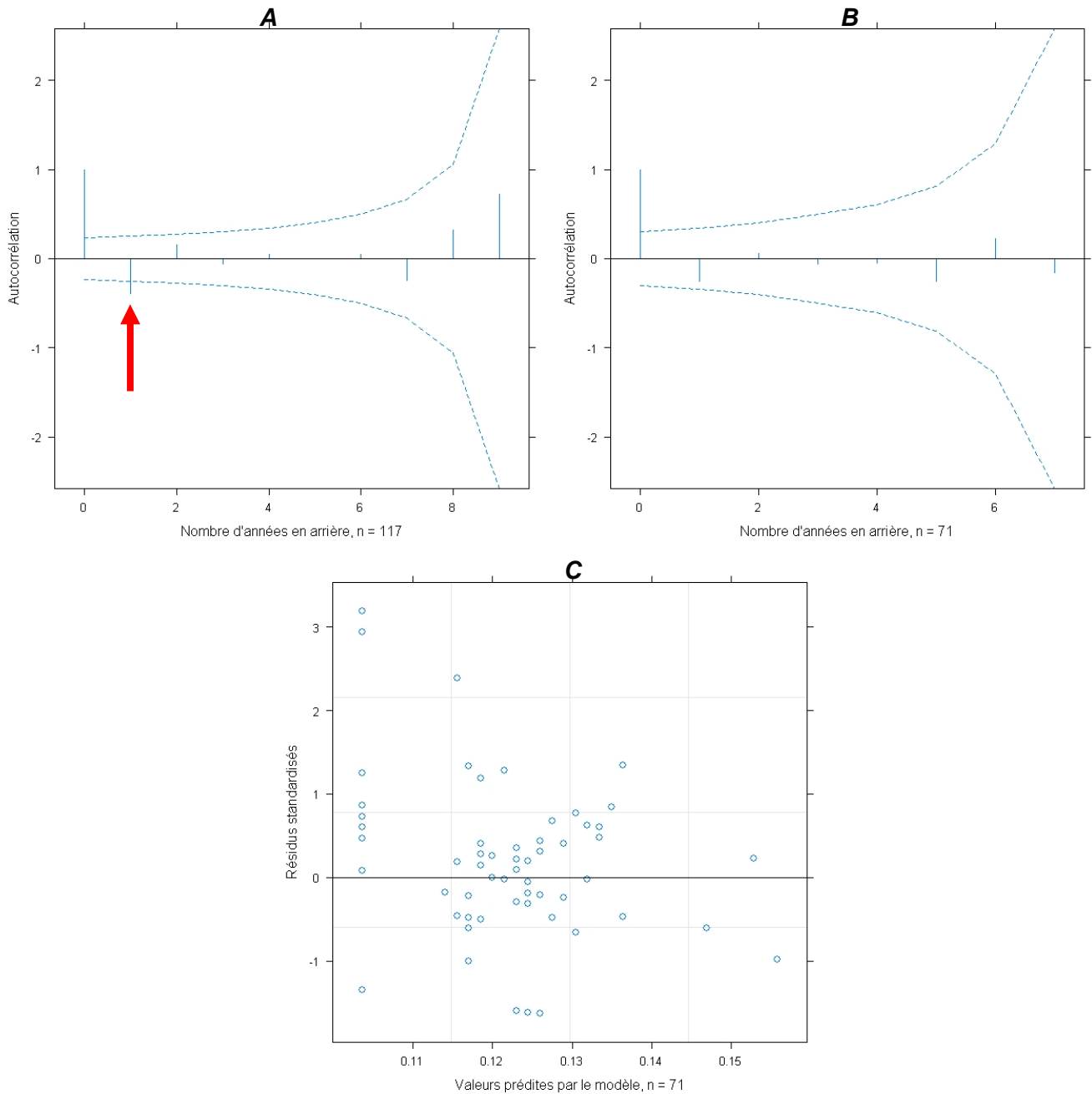
Number of Observations: 71

Number of Groups: 15

Anova

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	55	167.0259	<.0001
GNB_2	1	55	1.7050	0.1971

Graphes des caractéristiques du modèle de poids unitaire de faîne: en (A) auto corrélation temporelle initiale, en (B) auto corrélation temporelle finale, en (C) distribution des résidus en fonction des valeurs prédites.



ÉCOLE PRATIQUE DES HAUTES ÉTUDES
Sciences de la Vie et de la Terre

CARACTÉRISATION DES FRUCTIFICATIONS
DES CHÊNAIES ET HÊTRAIES
DU RÉSEAU RENECOFOR

MARTIN Hilaire

18 novembre 2009

RÉSUMÉ

Du panage des porcs en forêt durant le Moyen Âge jusqu'à la prise en compte à la fin du XVIII^{ième} siècle pour la régénération naturelle des peuplements forestiers, les fructifications ont joué un rôle important dans l'environnement de l'homme. Si de nos jours l'engraissement du bétail en forêt n'est plus d'actualité ; le renouvellement des forêts gérées est quant à lui toujours de rigueur. Ainsi, la compréhension des variations des fructifications s'avère nécessaire pour le gestionnaire forestier. Cette étude tente de décrire et d'expliquer les variations des fructifications de trois espèces majeures en France que sont le hêtre, le chêne sessile et le chêne pédonculé. Ce travail s'appuie sur les placettes du réseau RENECOFOR sur une période de 10 ans, de 1995 à 2004. De nombreuses mesures sont effectuées avec entre autres le comptage et la pesée des fruits récoltés à l'échelle de la placette. Ces informations constituent les données de base de cette étude.

Les analyses sont d'abord effectuées sur les moyennes décennales puis sur les variations interannuelles pour trois variables à expliquer : nombre de fruits/ha, poids/ha et poids unitaire. Deux méthodes statistiques sont utilisées : les sélections automatiques de variables (stepAIC) pour les moyennes décennales et les modèles linéaires mixtes avec auto-corrélation temporelle pour les variations interannuelles. Un résultat intéressant concerne l'absence de différence pour le poids/ha aussi bien entre les deux espèces de chêne qu'entre les genres *Fagus* et *Quercus*. Pour le chêne sessile, le nombre de fruits/ha, le poids/ha et le poids unitaire sont expliqués par la terre fine, la richesse chimique du sol et des hivers cléments. Pour le hêtre, il apparaît que la production de faînes décroît fortement d'Ouest en Est et augmente avec la surface du houppier sans que les variables climatiques, géologiques ou pédologiques sous-jacentes à cette distribution soient identifiées. Concernant les variations interannuelles, la phénologie se révèle comme une variable explicative pertinente. Pour le chêne sessile, on constate l'importance des glandées des années antérieures ainsi que l'impact négatif de la sécheresse estivale de l'année précédente et le rôle stimulant de la saison de végétation de l'année de la fructification. Pour le hêtre, le caractère biennal est confirmé par l'influence des fructifications précédentes, l'effet inhibiteur de la sécheresse estivale de l'année antérieure et la date de débourrement de l'année de la faînée. Les résultats sont concluants pour le hêtre et sont plus discutables pour les chênes en raison de la période d'étude trop courte et du nombre de placettes trop faible. Ces conclusions sont discutées aux regards des contraintes de la période d'étude et des difficultés de la modélisation liées aux valeurs manquantes et aux arrières-effets.

Mots clés : fructification, gland, faîne, chêne, hêtre, forêt.