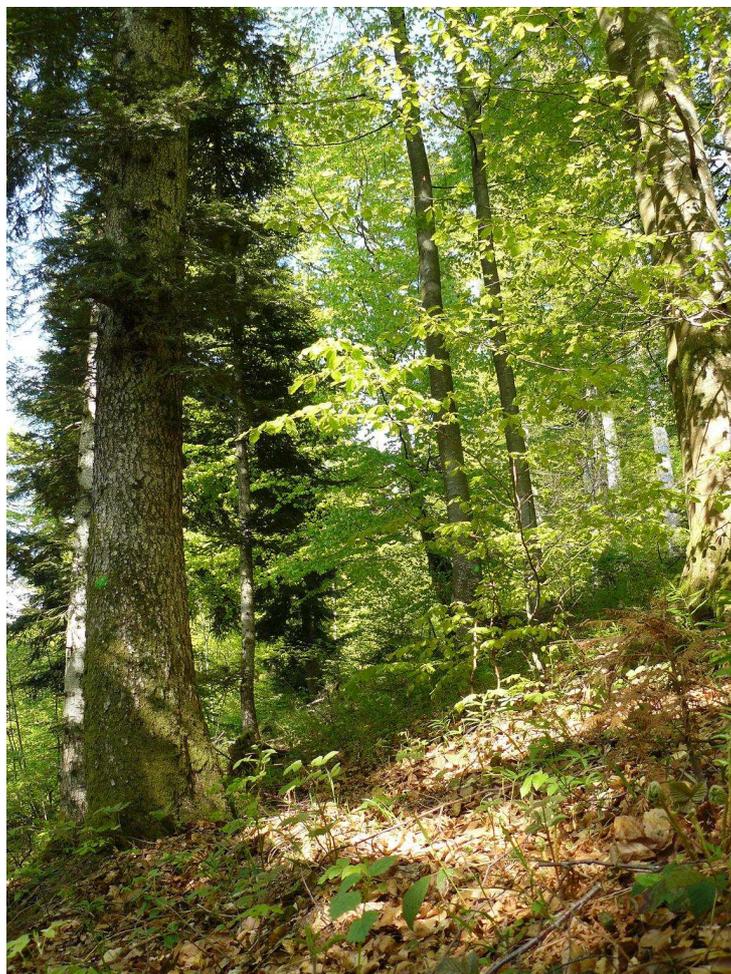


Impact des sécheresses estivales sur la croissance radiale : une étude comparée du hêtre commun et du sapin pectiné dans le Bugey



Mémoire de fin d'études

Anne PIERANGELO

Cursus agronome – 183^e promotion (2008-2011)

Novembre 2011

Photo de couverture : Hêtraie-sapinière en forêt communale de Cormaranche-en-Bugey (01)

En l'absence de mention contraire, les illustrations sont de l'auteur de ce mémoire.

Impact des sécheresses estivales
sur la croissance radiale :
une étude comparée du hêtre commun et du
sapin pectiné dans le Bugey

Mémoire de fin d'études

Anne PIERANGELO

Cursus agronome – 183^e promotion (2008-2011)

Novembre 2011

FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN TRAVAIL D'ÉLÈVE DE LA FIF

Formation des ingénieurs forestiers de l'ENGREF Agro Paris Tech	TRAVAUX D'ÉLÈVES
TITRE : Impact des sécheresses estivales sur la croissance radiale : une étude comparée du hêtre commun et du sapin pectiné dans le Bugey	Mots clés : sécheresse, dendrochronologie, hêtre, sapin pectiné
AUTEUR(S) : Anne PIERANGELO	Promotion : Coursus agronome, 183e promotion
Caractéristiques : 1 volume ; 94 pages ; 47 figures ; 12 annexes ; bibliographie.	

CADRE DU TRAVAIL

ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT : Office national des forêts - Agence Ain-Loire-Rhône		
Nom du responsable : Christian DEMOLIS Fonction : Directeur d'agence		
Nom du correspondant ENGREF (pour un stage long) : François LEBOURGEOIS		
Tronc commun <input type="checkbox"/>	Stage en entreprise <input type="checkbox"/>	Autre <input type="checkbox"/>
Option <input type="checkbox"/>	Stage à l'étranger <input type="checkbox"/>	
D. d'approfondissement <input type="checkbox"/>	Stage fin d'études <input checked="" type="checkbox"/>	
Date de remise :		
Contrat avec Gref Services Nancy <input type="checkbox"/> OUI <input checked="" type="checkbox"/> NON		

SUITE À DONNER (réservé au service des études)

- Consultable et diffusable
- Confidentiel de façon permanente
- Confidentiel jusqu'au / / , puis diffusable

Résumé

L'étude vise à comparer les croissances du hêtre et du sapin pectiné lors des sécheresses estivales, dans le Bugey, pour différentes conditions de réserve utile. Pour ce faire, une analyse dendrochronologique est réalisée. Les données liées au dépérissement ne suffisent pas à faire le lien entre la perte de croissance et l'état sanitaire. Cependant, les fonctions de corrélation mettent en évidence le rôle du bilan hydrique climatique estival dans la croissance du hêtre, et celui des températures de la fin de l'été précédent dans la croissance du sapin. L'étude de la croissance en année sèche (1976, 1989 et 2003) ne permet pas de considérer le hêtre comme une essence de substitution adaptée.

Abstract

The study aims at comparing beech and silver fir growth responses to summer droughts, in the Bugey, for different conditions of water storage capacity. Therefore, a dendrochronological analysis is realised in mixed stands. Data related to decline are not sufficient to establish a link between loss of radial growth and health status. However, response functions highlight the role of water balance in the radial growth of beech, and of previous late summer temperatures in the radial growth of silver fir. Drought years analysis shows that beech cannot be considered as an interesting alternative to silver fir.

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement Stéphane DUMAS (ONF Ain-Loire-Rhône) pour avoir su me guider tout au long de ce stage et m'apporter les éléments nécessaires à la réflexion autour du sujet de l'étude.

Je remercie également François LEBOURGEOIS (AgroParisTch Nancy) pour avoir pris le temps de m'orienter lors de la préparation du stage et pour avoir mis à ma disposition tous les moyens de mesure et d'analyse nécessaires, Sébastien DAVILLER (INRA Champenoux) pour m'avoir encadrée lors des mesures, sur le terrain et en laboratoire, et Pierre MERIAN (ENGREF Nancy) pour m'avoir initiée à l'analyse dendrochronologique.

J'adresse également mes plus vifs remerciements à André PROCHASSON (ONF R&D Avignon), pour son soutien et ses bons conseils lors de la mise en place du protocole.

Enfin, je remercie tout ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de cette étude : Myriam LEGAY (ONF R&D Nancy), Jean LADIER (ONF R&D Avignon), Bruno ROLLAND (CRPF Rhône-Alpes), Jacques BECQUEY (CRPF Auvergne), Éric LUCOT (université de Franche-Comté), Christian PIEDALLU (ENGREF Nancy), Vincent PEREZ (ENGREF Nancy), et tout le personnel de l'ONF Ain-Loire-Rhône pour son accueil et sa bonne humeur.

Table des matières

Remerciements	1
Table des matières	2
Table des figures	4
Table des tableaux	5
Aides à la lecture	5
Introduction	6
Problématique	7
1. Contexte de l'étude	7
1.1. Géographie du Bugey	7
1.2. Les peuplements forestiers du Bugey	9
1.3. Typologie des stations forestières	10
1.4. Problématique de gestion	10
2. Hêtre et sapin : synthèse des données bibliographiques	11
2.1. Exigences topographiques	11
2.2. Rôle des facteurs climatiques	11
2.3. Rôle des paramètres édaphiques	13
2.4. Éléments de physiologie	13
2.5. Conclusion	14
3. La sécheresse estivale : événement fondamental du climat de demain	15
3.1. Définition	15
3.2. Données climatiques de l'année 2003	17
3.3. Symptômes observés, impacts sur la croissance et mortalités	18
3.4. D'autres exemples de sécheresses	19
4. Conclusion	20
Matériel et Méthodes	21
1. Plan d'échantillonnage	21
1.1. Principe	21
1.2. Méthode	22
2. Mesures	23
2.1. Mesures de terrain	23
2.2. Mesure des largeurs de cernes	23
3. Caractérisation des placettes et répartition de l'échantillon	25
3.1. Distribution géographique des placettes	25
3.2. Répartition de l'échantillon en compartiments écologiques	25
4. Schéma bilan	29
Résultats	30
1. Étude des chronologies moyennes brutes	30
1.1. Tendances observées sur le long terme	30
1.2. Écarts relatifs de croissance	33
1.3. Années caractéristiques	35

2.	Standardisation des séries	37
2.1.	Principe	37
2.2.	Comparaison des essences	38
2.3.	Paramètres dendrochronologiques sur séries standardisées	39
3.	Corrélations avec les facteurs climatiques	40
3.1.	Corrélations simples	40
3.2.	Fonctions de corrélation	42
3.3.	Apport du bilan hydrique climatique.....	43
4.	Analyse autour des années de sécheresse	45
4.1.	Effet des sécheresses sur la croissance	45
4.2.	Étude du dépérissement.....	49
5.	Influence des paramètres individuels et de peuplement	50
5.1.	Étude du lien entre perte de croissance et paramètres dendrométriques.....	51
5.2.	Comparaison de la croissance des sapins sains et des sapins gâtés.....	51
6.	Conclusion	52
Discussion		53
1.	Limites de l'étude	53
1.1.	Limites liées aux données initiales	53
1.2.	Limites liées à la méthode d'analyse	54
2.	Variabilité des résultats	54
3.	Interprétation physiologique et écologique	55
3.1.	Comparaison du comportement du hêtre et du sapin pectiné.....	55
3.2.	Influence de la station et de la profondeur de sol sur la croissance.....	56
4.	Conséquences sur la gestion	57
4.1.	Mise en garde	57
4.2.	Rappel du rôle de la sylviculture dans la résistance à la sécheresse	57
4.3.	Préconisations	58
5.	Perspectives	60
Conclusion		62
Références bibliographiques		63
Liste des contacts		66
Glossaire		67
Table des annexes		69
Annexe 1 : Données climatiques disponibles sur le Bugey.....		70
Annexe 2 : Inventaire IFN pour la région forestière Bugey central		74
Annexe 3 : Description des stations 5.6 et 5.7 du guide Alpes du Nord et montagne de l'Ain		75
Annexe 4 : Légende et définition des variables mesurées.....		77
Annexe 5 : Distribution des variables mesurées.....		80
Annexe 6 : Caractéristiques des placettes		85
Annexe 7 : Hypothèses testées		86
Annexe 8 : Chronologies moyennes complètes.....		87
Annexe 9 : Paramètres statistiques utilisés en dendrochronologie		90
Annexe 10 : Tableaux de résultats des corrélations simples.....		91
Annexe 11 : Tests statistiques utilisés dans l'analyse.....		94
Annexe 12 : Retour à la croissance initiale par groupe.....		96

Table des figures

Figure 1 : Carte des régions naturelles départementales de l'IFN dans le Bugey	7
Figure 2 : Diagramme des températures et précipitations d'Hautevilles-Lompnes (1990-2010).	9
Figure 3 : Schéma simplifié du bilan hydrique.....	15
Figure 4 : Bilans hydriques climatiques annuels et estivaux d'Ambérieu-en-Bugey.	16
Figure 5 : Températures moyennes annuelles et estivales à Ambérieu-en-Bugey	16
Figure 6 : Diagramme ombrothermique d'Hauteville-Lompnes (moyennes 1990-2010 et 2003).	17
Figure 7 : Récolte de produits accidentels en sapin pectiné dans le Bugey.	18
Figure 8 : Diagramme ombrothermique d'Ambérieu-en-Bugey (moyennes 1971-2000 et 1976).	19
Figure 9 : Diagramme ombrothermique d'Ambérieu-en-Bugey (moyennes 1971-2000 et 1989).	19
Figure 10 : Système de mesure Lintab.....	23
Figure 11 : Carte de localisation des placettes de mesure.....	25
Figure 12 : Résultats de l'ACP pour la répartition des placettes selon les critères édaphiques	26
Figure 13 : Représentation des placettes dans le plan	27
Figure 14 : Schéma récapitulatif du protocole	29
Figure 15 : Chronologies moyennes du sapin.....	30
Figure 16 : Chronologies moyennes du hêtre	31
Figure 17 : Chronologies moyennes du sapin et du hêtre pour trois profondeurs de sol.	32
Figure 18 : Chronologies moyennes du sapin et du hêtre pour deux types de station.	32
Figure 19 : Écarts relatifs de croissance	33
Figure 20 : Rapport entre les écarts relatifs de croissance du sapin et du hêtre	34
Figure 21 : Séries individuelles de placettes de type « peuplement âgé » et « peuplement jeune »	37
Figure 22 : Exemple de série avant et après standardisation par une spline.	37
Figure 23 : Chronologies maîtresses du sapin et du hêtre en fonction du type de peuplement.	38
Figure 24 : Chronologies maîtresses du sapin et du hêtre.....	38
Figure 25 : Régression linéaire entre l'indice de croissance d'une année n et celui de l'année $n-1$	40
Figure 26 : Corrélations significatives entre l'indice de croissance et les paramètres climatiques	41
Figure 27 : Fonctions de corrélation établies pour les indices de croissance du sapin et du hêtre.	42
Figure 28 : Fonction de corrélation établie pour le rapport entre les écarts relatifs de croissance	42
Figure 29 : Réponses de l'indice de croissance du hêtre au bilan hydrique climatique de juin et juillet.....	44
Figure 30 : Carte de sensibilité du hêtre à la diminution du bilan hydrique climatique estival.	45
Figure 31 : Paramètres climatiques des années sèches intervenant dans les fonctions de corrélation.....	46
Figure 32 : Écarts relatifs de croissance en 2003	46
Figure 33 : Reprise de croissance après la sécheresse de 2003	47
Figure 34 : Écarts relatifs de croissance en 1989	47
Figure 35 : Reprise de croissance après la sécheresse de 1989	48
Figure 36 : Écarts relatifs de croissance en 1976	48
Figure 37 : Reprise de croissance après la sécheresse de 1976	48
Figure 38 : Chronologies moyennes des sapins sains et porteurs de branches mortes	49
Figure 39 : Répartition des arbres porteurs de branches mortes.....	50
Figure 40 : Branches mortes observées sur sapin en 2011 en fonction de la perte de croissance de 2003..	50
Figure 41 : Corrélations significatives avec les paramètres dendrométriques	51
Figure 42 : Répartition des prélèvements d'eau le long d'un profil de sol.....	56
Figure 43 : Conséquences d'une éclaircie sur le bilan hydrique d'un peuplement forestier	58

Table des tableaux

Tableau 1 : Principaux peuplements forestiers du Bugey central.....	9
Tableau 2 : Synthèse des facteurs climatiques déterminant la croissance radiale du sapin et du hêtre	12
Tableau 3 : Plan d'échantillonnage théorique minimal.	22
Tableau 4 : Bilan des variables mesurées.	24
Tableau 5 : Valeurs moyennes et extrêmes des variables mesurées pour chaque groupe.....	28
Tableau 6 : Années caractéristiques.....	36
Tableau 7 : Bilan des facteurs climatiques corrélés aux variables de croissance du sapin et du hêtre.....	40
Tableau 8 : Bilan des facteurs climatiques intervenant dans les fonctions de corrélation.	43
Tableau 9 : Bilan des bilans hydriques climatiques intervenant dans les fonctions de corrélation	44
Tableau 10 : Aide au choix des essences objectif	59
Tableau 11 : Aide au choix de l'itinéraire sylvicole.....	60

Aides à la lecture

* : terme défini dans le glossaire (p. 67)

❓ : formulation de la problématique et des hypothèses testées dans l'étude. Les hypothèses sont numérotées de 1 à 7 et sont groupées en annexe 7.

➡ : éléments de réponse à la problématique et aux hypothèses

Introduction

Les modèles de changement climatique actuels prévoient à l'horizon 2100, en parallèle avec une augmentation de la température moyenne annuelle de 2,2 à 5,1 °C dans la moitié sud de l'Europe, une diminution des précipitations, en particulier pendant l'été, de 4 à 27 % selon les modèles (Christensen *et al.*, 2007). Dans ce contexte, les sécheresses estivales seront amenées à se répéter de plus en plus fréquemment. De tels épisodes, causés généralement par une pluviométrie très faible, peuvent avoir pour conséquence directe une sécheresse édaphique, soit une diminution de la réserve en eau des sols suffisamment importante pour perturber le fonctionnement des arbres (Bréda *et al.*, 2004). L'année 2003 constitue un bon exemple de sécheresse estivale, accompagnée cette année-là par des températures exceptionnellement élevées.

L'Office national des forêts gère dans le Bugey central plus de 30 000 ha de forêts, dont la majeure partie est constituée de futaies mixtes, composées très majoritairement de hêtre (*Fagus sylvatica* L.), de sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) et d'épicéa (*Picea abies* L.). Or, une partie de ces forêts se trouve dans des conditions stationnelles dites « à risque » face au changement climatique, tels certains peuplements de sapin à des altitudes inférieures à 800 m (Lebourgeois, 2010). Par ailleurs, suite à la sécheresse de 2003, des dépérissements* de sapin pectiné ont pu être observés dans le Bugey en situations de combe fraîche.

Face à ces constats, mais aussi face aux enjeux économiques que représente la sylviculture des résineux, la question se pose de savoir quelle essence, du hêtre ou du sapin, doit être favorisée. Faut-il systématiquement abandonner le sapin sur les sols dont la réserve en eau* est la plus faible ? Doit-on, dans certains cas, se tourner vers une substitution des essences ?

Afin d'apporter des éléments de réponse à ces questions et, si possible, de préciser les essences objectif du guide de stations *Synthèse pour les Alpes du Nord et les montagnes de l'Ain*, cette étude cherchera à comparer l'impact des sécheresses estivales sur la croissance radiale du sapin et du hêtre, au travers d'une analyse dendrochronologique.

L'étude sera restreinte à quelques types de stations forestières, de la hêtraie-sapinière drainée (5.6) à la hêtraie-sapinière peu humide (5.7). Elle se concentrera également sur l'étage du montagnard inférieur et les versants sud à ouest, ces deux situations étant parmi les plus représentées dans le Bugey.

Après avoir précisé les termes et enjeux de la problématique à la lumière de la littérature, les résultats d'accroissement seront présentés, d'abord en lien avec le climat de l'année, puis de manière plus précise pour les années de sécheresse. Enfin, ces résultats seront discutés pour tenter d'en expliquer les fondements physiologiques et écologiques, et pour en tirer des recommandations de gestion.

Problématique

1. Contexte de l'étude

1.1. Géographie du Bugey

1.1.1. Topographie

Le site d'étude est celui de la région naturelle du Bugey central, dans le département de l'Ain (fig. 1).

Correspondant à la partie la plus méridionale du Jura, le Bugey en présente les caractéristiques principales (Orientations locales d'aménagement, Office national des forêts) :

- un relief marqué par une **succession de plis** orientés nord-sud alternant avec des zones de plateaux. L'altitude des plateaux peut varier de 850 à 1100 m dans le Bugey central. Plus au sud, les plis atteignent 1234 m d'altitude (Cormaranche-en-Bugey).

- un substrat majoritairement formé de **dalles de calcaires durs et filtrants**. On trouve dans les fonds de certains synclinaux (Aranc et Hauteville) des dépôts glaciaires. Dans la région du haut Bugey, les calcaires compacts plus ou moins fissurés alternent parfois avec des horizons marneux.

- de nombreuses **formations typiques des reliefs karstiques** (dolines, combes, lapiaz, etc.).

Cependant, le site d'étude est marqué par une microtopographie plus forte que celle du Jura septentrional. En effet, les plis, qui résultent de la mise en place du massif alpin, n'ont pu donner naissance à des plateaux aussi étendus, compte tenu de la proximité du Massif central (Inventaire forestier national, 1999). Il en résulte une grande hétérogénéité spatiale des paramètres environnementaux (profondeur de sol, apports en eau, pente et exposition).

1.1.2. Pédologie

Les sols présentent une texture généralement limono-argilo-sableuse, une charge en éléments grossiers importante, et un pH variant de 5 à 7 (Inventaire forestier national). Très superficiels sur les plateaux, en haut et milieu de pente, ils s'épaississent en descendant dans les vallées. On peut ainsi distinguer 4 grands types de sols (Office national des forêts, chambre d'agriculture de l'Ain, 1987) :

- **les lithosols** : ces sols très superficiels sont caractérisés par la présence d'une couche d'humus de type mor, à pH acide, reposant directement sur la roche mère calcaire. Généralement situés sur pente forte,

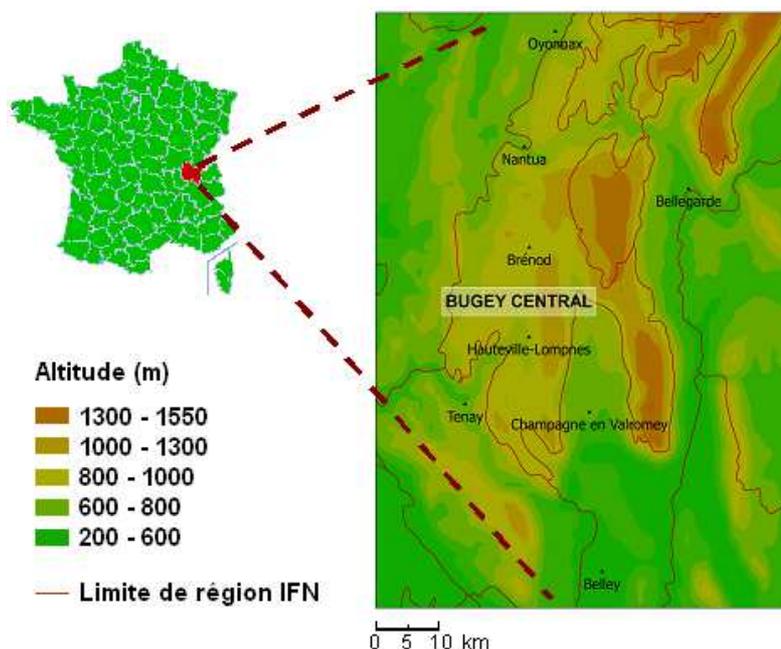


Figure 1 : Carte des régions naturelles départementales de l'IFN dans le Bugey

ils présentent un affleurement important. L'enracinement dans ces sols est très limité (maximum 15 cm), tout comme la réserve utile maximale* qui ne dépasse pas 15 mm.

- **les rendzines** : ces sols, également superficiels, sont issus d'une première altération de la roche calcaire. Ils se caractérisent par un humus très foncé de type mull carbonaté. On les trouve dans des positions de pente forte, souvent en mosaïque avec les sols bruns calcaires. L'enracinement se fait jusqu'à apparition de l'horizon C, à une profondeur variable qui dépend de la fracturation de la roche et de son pendage (Lucot *et al.*, 1995). La réserve utile maximale est généralement comprise entre 25 et 35 mm.

- **les sols humocalcaires et humocalciques** : ces sols se forment en montagne sur éboulis calcaires, sous un climat humide et froid. Ils se caractérisent par un horizon A1 brun épais et très riche en matière organique, reposant sur la roche mère. Le profil type est semblable à celui de la rendzine, mais plus profond et plus riche en matière organique. Les couches supérieures des sols humocalciques, contrairement aux sols humocalcaires, sont décarbonatées.

- **les sols bruns** : cette catégorie regroupe une grande diversité de profils. Elle se caractérise par un processus de brunification (libération de minéraux argileux et d'oxydes de fer) qui aboutit à des sols dits « évolués » (Centre régional de la propriété forestière Rhône-Alpes, 2006), généralement plus profonds que les sols mentionnés précédemment. Les principaux sols bruns sont :

- les **sols bruns calcaires** : ils se caractérisent par un humus de type mull, reposant sur un horizon B de profondeur variable faisant effervescence dès la surface. Ils se rencontrent dans des positions de faible pente, ou de pentes fortes soumises à colluvionnement, et reposent parfois sur des dépôts fluvio-glaciaires. L'enracinement se fait à profondeur variable, jusqu'à la roche mère, et la réserve utile maximale, relativement élevée, peut atteindre 100 mm.
- les **sols bruns calciques** : proches des sols bruns calcaires, ils se distinguent par une décarbonatation des couches les plus superficielles.
- les **sols bruns lessivés** : profonds, ils se caractérisent par un humus de type mull et un horizon Bt enrichi en argiles. Ils se forment en présence de plaquages limoneux importants.

1.1.3.Climat

Dans le cadre de cette étude, les données climatiques sont particulièrement importantes puisque l'objectif est d'**analyser le déterminisme climatique des variations interannuelles de croissance** des arbres, au moyen de corrélations* entre les largeurs de cernes mesurées chaque année et les données de précipitations (P), de températures (T) et de bilans hydriques climatiques* (Bhc) de l'année et des années précédentes.

Sources de données

Trois sources de données climatiques ont été utilisées pour l'étude :

- **poste Météo-France d'Ambérieu-en-Bugey** : T, P et Bhc, sur la période 1941-2005.
- **4 postes Météo-France situés à proximité des placettes** : T et P, sur la période 1990-2010. La carte de localisation et les caractéristiques de chaque poste figurent en annexe1.
- **modèle climatique du Lerfob** : T, P et Bhc, sur la période 1996-2008 (P et Bhc) ou 1961-2008 (T). Les températures sont calculées au pas de 50 m, les précipitations et bilans hydriques climatiques sont calculés au pas de 1 km et rééchantillonnés au pas de 50 m.

Les données climatiques du poste Météo-France d'Ambérieu, couvrant la plus grande période, serviront à l'établissement des corrélations entre les largeurs de cernes mesurées et le climat. Les deux autres sources permettront de valider les données d'Ambérieu sur les périodes communes, de caractériser le climat des années 2006 à 2010 et de cartographier les données et résultats obtenus.

Caractérisation du climat

Le site d'étude connaît un climat de type montagnard du Jura (fig. 2), avec des précipitations relativement élevées (entre 1450 et 1600 mm/an) et réparties de manière homogène sur toute l'année (Office national des forêts). La température moyenne annuelle, proche de 9 °C à 500 m d'altitude, diminue de 0,6 °C en s'élevant de 100 m ; les précipitations cumulées annuelles augmentent en moyenne de 10 mm tous les 100 m (Météo-France).

L'enneigement concerne également une grande partie de l'année, puisqu'il dure de 2 à 5 mois en dessous de 1100 m d'altitude, et jusqu'à 7 mois au-delà (Pays du Bugey, 2005).

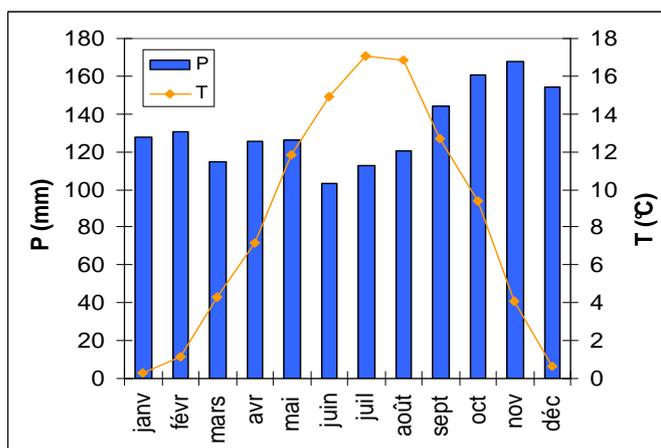


Figure 2 : Diagramme des températures et précipitations d'Hautevilles-Lompnes (1990-2010). Données : Météo-France

Depuis les années 1970, les températures moyennes annuelles comme les températures estivales (températures moyennes des mois de juin, juillet et août) augmentent régulièrement. Cette tendance, peut-être à mettre en lien avec le réchauffement climatique, peut être mesurée au travers de l'évolution des températures normales*.

La station Météo-France d'Ambérieu-en-Bugey a en effet enregistré une **hausse des normales de températures annuelles de 0,5 °C entre les périodes 1941-1970 et 1975-2005**, ainsi qu'une hausse des normales de températures estivales de 0,6 °C entre ces mêmes périodes. En parallèle, on peut observer un changement dans la répartition des précipitations au cours de l'année, au détriment de la période estivale. Cette évolution est plus marquée depuis le début des années 1980. Entre 1941-1970 et 1975-2005, la station Météo-France d'Ambérieu-en-Bugey a enregistré une **diminution des précipitations estivales de 23 mm** d'une part et une augmentation des précipitations automnales de 35 mm d'autre part.

1.2. Les peuplements forestiers du Bugey

Les données qui suivent sont issues du troisième inventaire forestier départemental de 1995 (Inventaire forestier national, 1999). En annexe 2 figure le détail de cet inventaire.

La région naturelle du Bugey central présente un taux de boisement élevé, de l'ordre de 60 %. La surface totale atteint plus de 30 000 ha et un volume total sur pied de plus de 8 millions de m³. Les principaux types de peuplements (tab. 1) sont les suivants :

- **sapinières-pessières et pessières d'altitude** : le couvert libre relatif des conifères y est supérieur ou égal à 75 % et celui des feuillus est inférieur ou égal à 25 %. Dans la fraction « pessière d'altitude », le couvert libre relatif en épicéa est supérieur ou égal à 75 % et l'altitude est supérieure à 1 100 m. Les essences principales sont le sapin pectiné (52 %), l'épicéa (36 %) et le hêtre (7 %).
- **futaie mixte feuillus-résineux** : le couvert libre relatif des conifères est compris entre 25 et 75 %. Les essences principales sont également le sapin pectiné (39 %), l'épicéa (27 %) et le hêtre (21 %).
- **mélanges futaies-taillis de hêtre** : le couvert libre relatif des feuillus est supérieur ou égal à 75 %. Le hêtre est l'essence principale (66 %). La structure est en général un mélange de futaie et de taillis.

	Surface (ha)	%
Futaie mixte feuillus-résineux	6 811	40
Sapinières-pessières et Pessières d'altitude	6 034	35
Mélanges futaies-taillis de Hêtre	1 907	11
Total	17 018	

Tableau 1 : Principaux peuplements forestiers du Bugey central. Le pourcentage correspond au rapport entre la surface occupée par le peuplement et la surface boisée totale de la région. Les valeurs sont données pour les peuplements soumis au régime forestier. IFN

La caractérisation écologique de ces peuplements montre une bonne homogénéité quant à l'altitude et à la pente, mais une plus grande hétérogénéité au regard de l'exposition. En effet, les sapinières-pessières et pessières d'altitude sont majoritairement exposées à l'ouest, correspondant à des versants plus chauds dans le Bugey (Centre régional de la propriété forestière, 2006), tandis que les futaies mixtes et les mélanges futaies-taillis de hêtre sont surtout exposés à l'est.

La structure majoritairement présente sur le site d'étude est la futaie, résineuse ou feuillue. Les sapinières sont fréquemment conduites en futaie jardinée, mais une évolution vers la futaie feuillue s'observe, au détriment des futaies résineuses et du mélange taillis-futaie.

Du point de vue des essences, les objectifs de production étaient auparavant presque exclusivement centrés sur le sapin et l'épicéa. Depuis 2003, le hêtre est parfois proposé en essence objectif dans les réflexions d'élaboration des aménagements. Malgré l'attachement culturel local pour les résineux, certaines municipalités ont déjà opté pour une production de hêtre de qualité, en réponse au dépérissement de leur sapinière. Cette étude pourra donc permettre de préciser la place à accorder au hêtre en fonction de l'impact des sécheresses estivales.

1.3. Typologie des stations forestières

La typologie des stations forestières s'appuie, pour la zone d'étude, sur le guide de stations *Synthèse pour les Alpes du Nord et les montagnes de l'Ain* (Centre régional de la propriété forestière Rhône-Alpes, 2006). Au sein de cette typologie, deux unités stationnelles sont très représentées, et largement majoritaires en peuplement mélangé hêtre et sapin. Il s'agit des unités :

5.6 : hêtraie-sapinière drainée

5.7 : hêtraie-sapinière peu humide

Ces deux types de stations sont décrits en annexe 3.

La typologie présente cependant des limites pour l'étude. En effet, les deux unités stationnelles citées regroupent des situations proches du point de vue des facteurs climatiques (et notamment thermiques) mais très différentes du point de vue des facteurs édaphiques. En particulier, en cas de sécheresse prolongée, il semblerait que l'évolution de la réserve utile du sol pendant la saison de végétation soit très variable au sein de ces deux unités. L'étude présentée ici nécessitant des données stationnelles précises, en particulier concernant la réserve utile maximale (profondeur de sol, pierrosité), cette typologie n'est pas utilisée. Une description précise de la station est réalisée par ailleurs.

1.4. Problématique de gestion

La sapinière du Bugey est une **sapinière en déclin**. Les dépérissements, souvent accompagnés d'une infestation par le gui, concernent la quasi-totalité des peuplements. Cette situation est le résultat d'une histoire sylvicole particulière, qui conjugue l'effet des peuplements purs et l'effet de la surcapitalisation.

Au contraire, la **hêtraie** du Bugey présente un **dynamisme fort**, du fait de la colonisation naturelle des sapinières dépérissantes et de la mise en valeur récente des feuillus par la sylviculture. Cette hêtraie est de plus susceptible de produire du bois de qualité. Pourtant, la demande de la filière bois locale est majoritairement tournée vers le résineux (communication personnelle de M. Dumas, agence Ain-Loire-Rhône de l'ONF).



Dans ce contexte, et face aux prévisions du changement climatique, deux questions se posent :

- **le sapin est-il réellement condamné dans le Bugey ?**
- **le hêtre peut-il être considéré comme une alternative au sapin ?**

2. Hêtre et sapin : synthèse des données bibliographiques

Le hêtre est une essence en progression dans le Bugey, aussi bien en termes de surface que de volume sur pied. Dans l'Ain, il constitue une essence dominante sur 25 201 ha de forêts.

Le sapin pectiné est la première essence du département, avec 20 % du volume sur pied en 1995. Cependant, au contraire du hêtre, ses surfaces sont en régression, en particulier en forêts relevant du régime forestier (Inventaire forestier national, 1999).

2.1. Exigences topographiques

Étage bioclimatique	
La sapin pectiné et le hêtre commun sont deux essences caractéristiques de l' étage montagnard . On les trouve également dans le subalpin inférieur, jusqu'à 1700 m d'altitude (Jacamon, 2004 ; Rameau, 1993). Pour la région de provenance* « Jura 501 », les deux essences présentent la même distribution altitudinale, de 185 à 1700 m d'altitude , avec une moyenne de 680 m (CEMAGREF, 2003a et 2003b).	
Hêtre Le hêtre est également présent en plaine et dans le collinéen.	Sapin Dans le Jura, l'altitude est le principal facteur qui détermine le type de sapinière (Jacamon, 2001). L'optimum de production s'y situe entre 800 et 950 m. En dessous de 800 m, les stations forestières sont considérées « à risque » pour le sapin pectiné (Lebourgeois, 2010). Le schéma régional d'aménagement Rhône-Alpes considère quant à lui que le sapin est hors station à l'étage collinéen.
Exposition	
Le hêtre et le sapin craignent les expositions les plus chaudes (S, S-O, O) tandis qu'ils s'accommodent des expositions les plus froides (N, N-O, N-E) (Jacamon, 2004 ; Rameau <i>et al.</i> , 1993).	
Hêtre Le hêtre craint les échauffements au rayonnement solaire.	Sapin Seuls les semis de sapin sont sensibles* aux fortes insulations.

→ Les altitudes couvertes par le Bugey central correspondent donc aux optimums de distribution du sapin comme du hêtre. Cependant, l'orientation des reliefs est telle que de nombreux peuplements sont situés en exposition chaude.

2.2. Rôle des facteurs climatiques

2.2.1. Exigences climatiques

Températures	
Le hêtre et le sapin sont des essences de climat relativement froid, qui cependant craignent les gelées tardives (Jacamon, 2004 ; Rameau, 1993).	
Hêtre Le hêtre présente un optimum de température compris entre 7 et 9 °C (Lebourgeois, 2007). Les hêtraies de la région de provenance « Jura 501 » bénéficient d'une température moyenne annuelle de 8,7 °C (CEMAGREF, 2003b).	Sapin Les sapinières de la région de provenance « Jura 501 » bénéficient d'une température moyenne annuelle de 8,3 °C (CEMAGREF, 2003a).

Précipitations

Le hêtre et le sapin ont des besoins particuliers en humidité atmosphérique et nécessitent des précipitations annuelles supérieures à 800 mm. Ils sont considérés comme étant peu tolérants à la sécheresse. Pour la région de provenance « Jura 501 », les deux essences connaissent des précipitations moyennes annuelles de 1440 mm/an (CEMAGREF, 2003a et 2003b).

Hêtre	Sapin
Le hêtre s'accommode très bien de précipitations comprises entre 600 et 1500 mm/an, et présente un optimum d'ETP* compris entre 500 et 600 mm/an (Lebourgeois, 2007). Il nécessite en particulier une pluviométrie importante au printemps et en été, d'au moins 250 mm entre les mois de mai et septembre (Otto, 1998).	-

Vent

Hêtre	Sapin
Le hêtre est considéré comme étant sensible au vent.	Le sapin résiste relativement bien au vent, sauf sur les stations à sol superficiel.

→ Les températures du Bugey central correspondent aux exigences des deux essences, avec une température moyenne annuelle de 7,6 °C (Pays du Bugey, 2005). Les gelées tardives y sont cependant assez fréquentes. Pour la période de référence 1977-2001, la station de Bénonces située à 950 m d'altitude a enregistré en moyenne 14 jours de gel entre avril et juin (température minimale inférieure à 0°C) (Meteo01.fr, 2011).

→ Les précipitations sont *a priori* suffisantes pour répondre aux besoins en eau du hêtre et du sapin.

2.2.2. Influence du climat sur la croissance radiale du Hêtre et du Sapin

Le tableau suivant (tab. 2) donne une synthèse des résultats des différentes études dendroécologiques qui ont pu être réalisées sur le hêtre et le sapin pectiné, en France et en Suisse (Bigler, 2004 ; Breda, Badeau, 2008 ; Buntgen *et al.*, 2008 ; Cailleret, 2007 ; Graf Pannatier *et al.*, 2006 ; Lebourgeois, 2005 ; Lebourgeois *et al.*, 2010).

Parmi les facteurs climatiques mis en évidence, les plus déterminants pour la mise en place du cerne sont dans les deux cas le déficit hydrique estival, en particulier pour le hêtre dont le fonctionnement du cambium ne débute

qu'après la mise en place des feuilles, au début de l'été. Dans le cas du sapin, le bilan hydrique* des mois de juillet et août joue un rôle particulier dans les zones de plus faible altitude. Sa croissance radiale est contrôlée également par le déficit hydrique de l'automne précédent ainsi que par les températures de l'hiver qui jouent directement sur la capacité photosynthétique de l'essence. Un froid intense en février peut de plus conduire à l'embolie des vaisseaux (Lebourgeois *et al.*, 2010).

Facteurs climatiques croissants	Effet sur la croissance radiale du hêtre	Effet sur la croissance radiale du sapin pectiné
Températures	T juillet (n-1) } ↑ T automne (n-1) } ↑ T juillet-août (n)	T avril (n) } ↑ T hiver } ↓ T juillet-août (n-1) } ↓
Précipitations	P juin-juillet (n-1) } ↑ P mai-juillet (n) } ↑	P juin-juillet (n) } ↑
Déficit hydrique	Dh automne (n-1) } ↓ Dh été (n) } ↓	Dh août-octobre (n-1) } ↓ Dh été (n) } ↓

Tableau 2 : Synthèse des facteurs climatiques déterminant la croissance radiale du hêtre et du sapin. n : année de mise en place du cerne. ↑ : effet positif des valeurs élevées du paramètre climatique. ↓ : effet négatif des valeurs élevées du paramètre climatique.

2.3. Rôle des paramètres édaphiques

2.3.1. Exigences édaphiques

Sol et substrat	
Le hêtre comme le sapin tolèrent une grande variété de substrats et une large gamme de pH. Ils craignent les sols à engorgement et les sols trop superficiels, en particulier pour le sapin.	
Hêtre Le hêtre est peu compétitif sur sols acides, et craint les pH inférieurs à 4,5 (Lebourgeois, 2007). Il présente un optimum de production sur limon ou lœss épais, et un optimum technologique sur sol brun calcique. Il craint les argiles lourdes, les sols tourbeux et à dominance sableuse (Centre de développement agroforestier de Chimay). Le hêtre tolère des niveaux de réserve utile maximale* (RUM) compris entre 80 et 100 mm.	Sapin Le sapin tolère les sols acides. Il est plus rare sur les sols carbonatés pauvres en argile. Dans le Jura, il réagit positivement aux sols riches. Le sol doit toujours être frais. Les stations dont la RUM est inférieure à 100 mm sont considérées « à risque » pour le Sapin (Lebourgeois, 2010).
Humus	
Hêtre Le hêtre se rencontre sur des humus de type mull carbonaté à dysmoder. Sa régénération est difficile sur les humus de type moder (Rameau <i>et al.</i> , 1993).	Sapin La régénération du sapin est difficile sur les stations riches à mull, plus aisée sur les stations acides à moder ou mor (Rameau <i>et al.</i> , 1993).

→ Les conditions édaphiques du Bugey, largement calcaires, avec un pH compris entre 5 et 7, sont favorables au hêtre comme au sapin. Les sols y sont cependant généralement superficiels, en particulier en plateau, haut et milieu de pente (Chambre d'agriculture de l'Ain, 1987 ; Inventaire forestier national *et al.*). Le substrat peut également intervenir de manière directe sur l'eau disponible pour les arbres. En effet, certaines roches, et notamment les calcaires marneux, sont capables de retenir entre 4 et 20 g d'eau pour 100 g de poids sec.

2.3.2. Influence du sol sur la production du hêtre et du sapin

Le rôle des facteurs nutritionnels sur la croissance des arbres a principalement été étudié au travers d'**essais de fertilisation ou de modélisation** (Frochot *et al.*, 1980 ; Hoffman, 1994 ; Lebourgeois, 1993, Van der Werf *et al.*, 2007). Cailleret (2011) a récemment montré que dans les Alpes du Sud, le sol est le premier facteur intervenant dans la croissance du sapin, avant l'altitude ou le climat. Ainsi, la croissance est la plus faible sur calcaire, intermédiaire sur calcaire marneux, et la plus forte sur grès schisteux.

Par ailleurs, l'influence de la **réserve utile maximale** sur la croissance dépend de deux caractères :

- la capacité à limiter les pertes en eau : la régulation stomatique (Granier *et al.*, 1995).
- la capacité à aller chercher l'eau dans les horizons les plus profonds : l'enracinement.

Ces caractères sont développés dans le paragraphe suivant.

2.4. Éléments de physiologie

Le sapin pectiné possède une longévité élevée, de 200 à 300 ans. Il peut atteindre 40 à 50 m de hauteur, mais sa croissance initiale est très lente. Le hêtre possède une longévité un peu plus faible, de 150 à 200 ans. Dans les stations les plus favorables, il peut atteindre des hauteurs comparables à celle du sapin pectiné (Jacamon, 2001 ; Rameau *et al.*, 1993).

Deux éléments peuvent également avoir un rôle important dans cette étude :

- la **longévité des organes de la photosynthèse** : contrairement au hêtre dont les feuilles sont caduques, le sapin possède des aiguilles qui peuvent persister de 7 à 9 ans. Les conséquences pour l'analyse dendrochronologique sont les suivantes (Cailleret, 2007) :

- Les **arrière-effets*** d'un événement climatique tel que la sécheresse de 2003 se feront ressentir également sur la croissance des années qui suivent. Becker (1995) a par exemple montré que le bilan hydrique du mois d'août jouait un rôle dans la formation du cerne jusqu'à 6 années plus tard.
- Le sapin a la capacité de **réaliser la photosynthèse en hiver**, période pendant laquelle il peut donc constituer des stocks carbonés mobilisables pour la croissance du cerne de l'année. Au printemps, l'activité cambiale pourra débuter plus tôt que pour le hêtre, dont la première mobilisation des réserves est destinée à la formation des feuilles.

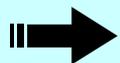
- la **morphologie de l'appareil racinaire** :

- Le **hêtre** possède un **appareil racinaire dit « en cœur »**. En forêt de Hesse (Moselle), Bréda *et al.* (2002) ont mesuré que seulement 15 % de ses racines se trouvaient dans le compartiment de sol le plus profond, tandis que ces mêmes racines apportent à l'arbre 23 % de ses besoins en eau. Par ailleurs, il a été montré que sur des sols à forte contrainte mécanique (dalle horizontale), le hêtre a une grande capacité à développer ses racines de manière latérale, augmentant ainsi sa réserve en eau (Lebourgeois *et al.*, 2002). En cas de sécheresse, le hêtre n'a que peu accès à la réserve en eau des horizons les plus profonds.
- Le **sapin pectiné** possède au contraire un **appareil racinaire pivotant**, capable de puiser en profondeur en l'absence de contraintes. Comme pour le hêtre, l'enracinement du sapin est modifié en présence de contraintes physiques. En effet, Lucot *et al.* (1995) ont montré que la réaction de l'arbre dépendait en particulier de la forme des obstacles rencontrés. C'est en présence de cailloux présentant une face horizontale que la contrainte est la plus forte. Dans ce cas, le sapin colonise majoritairement les 20 premiers centimètres du sol, et son pivot ne descend pas au-delà de 50 cm contre 1 m dans une situation non contraignante. Dans le contexte du Bugey, où de nombreuses stations présentent une teneur en éléments grossiers très forte, la profondeur de sol disponible pour les racines est particulièrement difficile à mesurer.

2.5. Conclusion

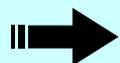
Cette synthèse bibliographique permet d'apporter les premiers éléments de réponse à la problématique.

L'avenir du sapin dans le Bugey reste préoccupant.



Les situations de sol superficiel, qui présentent des risques importants vis-à-vis de l'alimentation en eau, sont fréquentes sur le site. En année climatique moyenne, les précipitations élevées de la région pourraient compenser la quasi-absence de réserve en eau du sol. Cependant, en année de sécheresse, le comportement du sapin reste méconnu. En particulier, les réserves en eau présentes dans les horizons les plus profonds du sol, accessibles uniquement en présence d'une roche fissurée, suffisent-elles à maintenir l'état hydrique de l'arbre ?

Le rôle de substitution du hêtre est encore à définir.



La production du hêtre est, comme celle du sapin, défavorisée par un été sec et chaud. De plus, les éléments physiologiques semblent pencher en faveur du sapin, capable de lisser les effets du climat et de puiser l'eau dans les horizons les plus profonds.

L'étude aura pour objectif de tester les deux hypothèses suivantes :



Hypothèse 1 :

Le sapin est fortement affecté par les sécheresses estivales sur sol superficiel.



Hypothèse 2 :

Le hêtre, moins affecté que le sapin, est une bonne essence de substitution.

3. La sécheresse estivale : événement fondamental du climat de demain

Comme mentionné en introduction, les sécheresses estivales sont amenées, en Europe, à se répéter de plus en plus fréquemment. Ce changement est lié à la fois à une augmentation des températures et une diminution des précipitations estivales.

Or, les sécheresses ont un impact fort sur la croissance et la survie des arbres forestiers, dans la mesure où elles perturbent le fonctionnement hydrique et l'assimilation carbonée (Bréda *et al.*, 2006). Plus que la dérive générale du climat, elles peuvent modifier en un temps court la dynamique et la structure des peuplements. C'est pourquoi l'étude est centrée sur l'impact de ce type d'événement climatique sur la croissance du hêtre et du sapin.

3.1. Définition

Avant de définir le terme de sécheresse, il est nécessaire d'aborder la notion de **bilan hydrique*** (Granier *et al.*, 1995). Celui-ci correspond à l'évolution temporelle de la réserve en eau du sol (fig. 3). Pour l'estimer, il est nécessaire de considérer :

- les entrées : précipitations, écoulements latéraux ;
- les sorties : transpiration, évaporation de la surface, drainage, ruissellement ;
- les réservoirs : la réserve utile du sol.

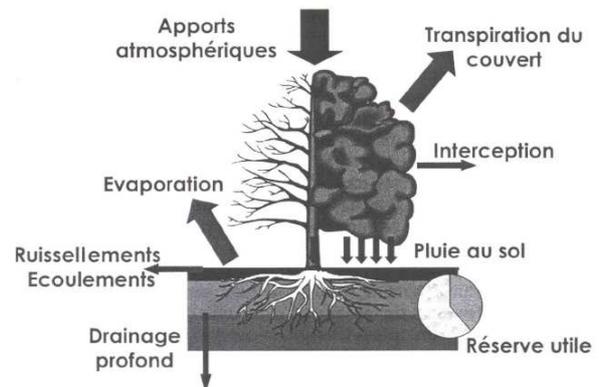


Figure 3 : Schéma simplifié du bilan hydrique. RDV technique ONF 2008

La sécheresse peut se définir de trois manières différentes :

- La **sécheresse météorologique** : seules les entrées sont prises en compte. Elle correspond à une période prolongée pendant laquelle les précipitations sont inférieures aux normales.
- La **sécheresse hydrologique** : elle ne prend pas en compte la réserve utile du sol. Elle est définie à partir du bilan hydrique climatique :

$$Bhc = \text{Précipitations (P)} - \text{Évapotranspiration potentielle (ETP)}$$

Elle correspond à une période prolongée pendant laquelle les apports en eau (P) sont inférieurs aux départs (ETP). On considère alors qu'il y a sécheresse si $Bhc < 0$.

- La **sécheresse édaphique** : cette dernière définition est la plus rigoureuse. Elle prend en compte tous les éléments du bilan hydrique. On peut alors considérer qu'il y a sécheresse si la réserve en eau relative, qui correspond à la quantité d'eau réellement disponible pour les plantes à un instant t ramenée à la quantité d'eau maximale que peut contenir le sol, est inférieure à 0,4. Il est possible à partir de cette définition de quantifier la durée de la sécheresse et son intensité.

Afin de déterminer les années sèches pour la zone d'étude, et ne disposant pas des données de réserve utile maximale, nous nous intéresserons à la sécheresse hydrologique. Nous considérerons qu'une année pour laquelle le bilan hydrique climatique moyen des mois de juin, juillet et août est négatif est une année de sécheresse estivale. Au total, sur la période 1941-2005, 24 années peuvent être considérées comme des années de sécheresse estivale, dont 12 entre 1980 et 2005 (fig. 4).

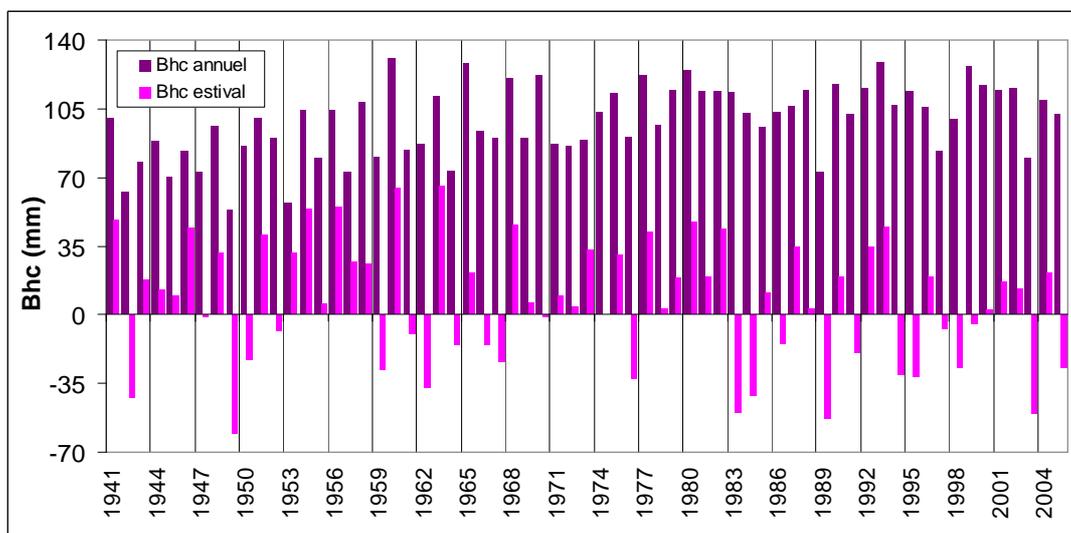


Figure 4 : Bilans hydriques climatiques annuels et estivaux d'Ambérieu-en-Bugey. Données : Météo-France et modèle climatique Lerfob

Le recensement des années de **canicule** est quant à lui plus difficile. En effet, une canicule se définit comme une période de fortes chaleurs durant l'été, caractérisée par (Ministère de la santé et des sports, 2010) :

- une température diurne supérieure à la normale
- une amplitude thermique faible
- une durée minimale de trois jours.

Les seules données dont nous disposons étant des moyennes mensuelles, nous ne pouvons déterminer les années de canicule que sous l'hypothèse qu'une température moyenne estivale élevée reflète la présence d'une période prolongée de fortes chaleurs durant ces trois mois (fig. 5).

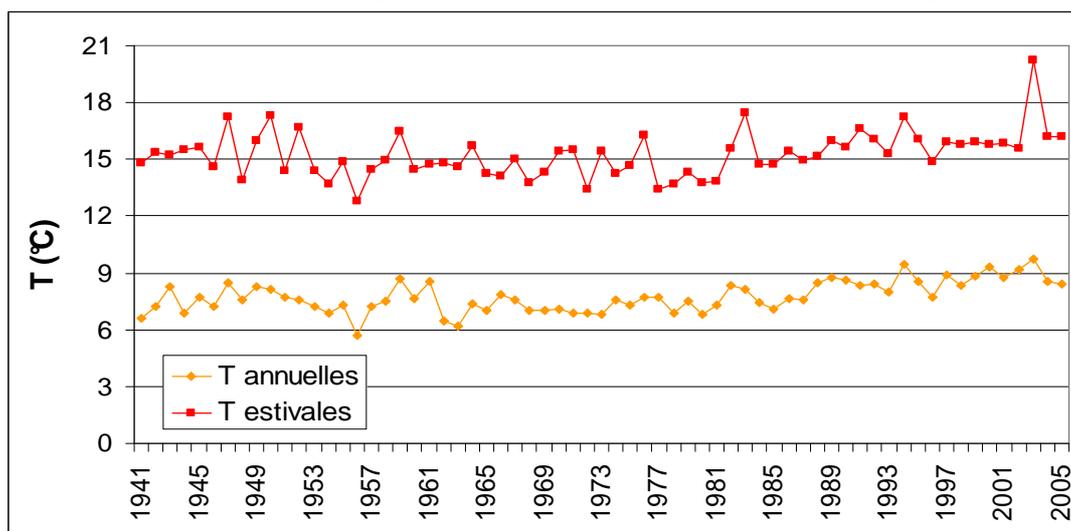


Figure 5 : Températures moyennes annuelles et estivales à Ambérieu-en-Bugey. Données : Météo-France

Dix années semblent correspondre à une canicule : 1947, 1950, 1952, 1959, 1976, 1983, 1994, 2003 et dans une moindre mesure 2004 et 2005. La plupart coïncident avec les 20 années ayant connu les étés les plus chauds depuis 1900 au niveau national (Météo-France).

Dans cette étude, nous nous intéresserons principalement à la sécheresse de l'année **2003**, pour laquelle la littérature est la plus riche. Les sécheresses de **1976** et **1989** seront également abordées car elles figurent parmi les années de sécheresse les plus caractéristiques. Parmi ces trois années, seul l'été 1989 n'a pas été accompagné d'une canicule.

3.2. Données climatiques de l'année 2003

- En Europe

À l'échelle européenne, 2003 apparaît comme une année chaude, particulièrement en Europe centrale et occidentale, avec des anomalies* de températures pour les mois de juillet à septembre allant jusqu'à + 6 °C, notamment sur le Jura français (Ciais *et al.*, 2005). Les valeurs présentant le plus gros écart aux normales sont les températures maximales des mois de juin et août. Au contraire dans la partie orientale et méridionale de l'Europe, les températures de 2003 sont proches des normales, voire inférieures.

Concernant la pluviométrie, les anomalies négatives se généralisent à l'ensemble de l'Europe du Nord et jusqu'en Italie. Les déficits sont particulièrement marqués dans le Sud de la Norvège, en Écosse, en Irlande et dans l'Est de la France, allant jusqu'à - 120 mm/mois par rapport à la période de référence 1998-2002 (Ciais *et al.*, 2005). Le déficit en précipitations, très marqué durant l'été 2003, a duré du mois de février 2003 au mois de juin 2004.

- En France

L'année 2003 est avant tout une année de forte canicule. En effet, elle s'est caractérisée par des températures supérieures à la normale dès le mois de mars, et ce jusqu'en septembre. À l'échelle du territoire national, les deux tiers des stations météorologiques ont enregistré pendant l'été 2003 des températures supérieures à 35 °C, et 15 % des stations des températures supérieures à 40 °C. Pour replacer cette année dans un contexte plus large, notons que 2003 a été plus chaud de 2 °C que les trois précédentes années les plus chaudes (1976, 1983 et 1994).

Concernant les précipitations, une grande partie du territoire connaît en 2003 un climat relativement sec. La sécheresse est plus marquée dans le Nord-Est du pays, où les précipitations sont inférieures de 25 à 50 % par rapport à la normale.

L'été 2003 a également présenté des radiations supérieures à la normale, jusqu'à +15 % sur le Jura et dans les Alpes externes. Ces valeurs élevées d'insolation sont venues renforcer les conséquences de la sécheresse sur les peuplements forestiers.

- Dans le Bugey

En 2003, la station d'Hauteville-Lompnes a enregistré des températures supérieures à la normale du mois de mars au mois d'août (fig. 6), avec des températures particulièrement chaudes pour les mois de juin et août (respectivement 20,2 et 21 °C de moyenne). À Ambérieu-en-Bugey, le mois d'août a connu une vague de chaleur particulièrement remarquable avec onze jours consécutifs pour lesquels la température maximale a excédé 35 °C. Les précipitations ont été inférieures aux moyennes de 1990-2010 sur

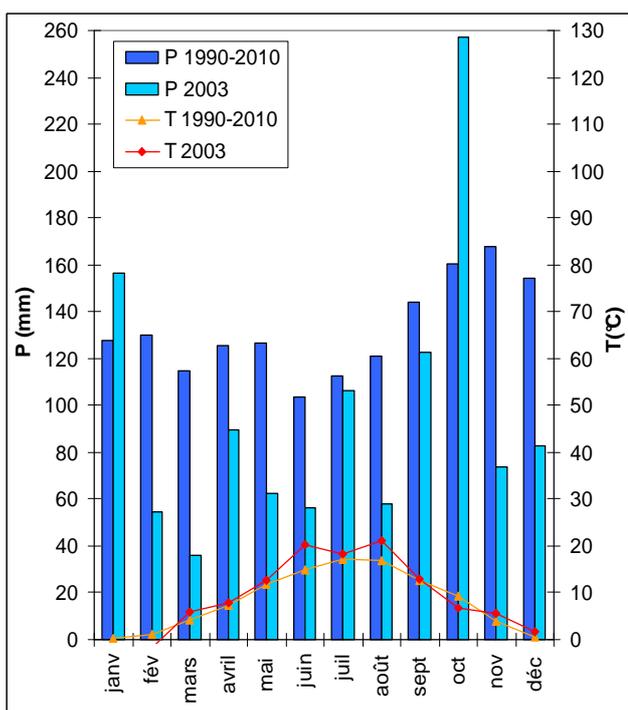


Figure 6 : Diagramme ombrothermique d'Hauteville-Lompnes (moyennes 1990-2010 et 2003).
Données : Météo-France

pratiquement l'ensemble de l'année, à l'exception du mois d'octobre, très humide. Les mois de février, mars, juin et août ont été particulièrement secs (seulement 56,2 mm au mois de juin)¹.

Les années 2004, 2005 et 2006 ont également connu un climat remarquable, 2004 et 2005 étant deux années particulièrement sèches et 2006 une année très chaude. Cependant, les températures comme les précipitations n'ont pas atteint les extrêmes rencontrés en 2003.

3.3. Symptômes observés, impacts sur la croissance et mortalités

- Bilan à l'échelle du territoire français

Les conséquences de la sécheresse de 2003 sur les peuplements forestiers ont d'abord été visuelles : couleurs automnales dès le mois d'août, perte prématurée des feuilles et dessèchement ont pu être observés partout en France (Département de la santé des forêts, 2004).

Les hêtraies de la moitié est de la France ont été les plus touchées. Alors que dans le Sud-Est, tous les peuplements de hêtre sont marqués, dans le Nord-Est, seules les hêtraies sur terrains calcaires peu profonds ou sur limons dégradés par les tassements présentent les symptômes de la sécheresse (rougissements précoces, dessèchements). Dans le Jura et les Alpes suisses, une augmentation de la transparence des houppiers de hêtre de plus de 15 % ou une décoloration de 10 % des feuilles ont pu être observées. La présence de ces symptômes semble notamment corrélée aux températures de mars à août (Graf Pannatier *et al.*, 2006).

Le sapin pectiné est lui marqué par des dessèchements brutaux de houppier, en particulier dans le Jura et les Vosges (Département de la santé des forêts, 2004). À l'échelle locale, les arbres les plus affectés sont ceux qui se trouvent fortement exposés au soleil ou sur sols superficiels ou particulièrement drainants.

- Observations de terrain dans le Bugey

En 2003, comme pour le territoire français, les dépérissements de sapins (déjà bien répandus, avec probablement pour cause des peuplements très denses et un affaiblissement par le gui) ont été accentués par la canicule et la sécheresse, conduisant à des récoltes de produits accidentels* exceptionnelles en 2004 (fig. 7).

Cependant, d'autres observations faites par les agents de l'ONF sont quelque peu en contradiction avec les observations faites à l'échelle nationale. En effet, contrairement à ce que l'on aurait pu penser, les sapins situés en fond de vallon, sur sol frais, et ne présentant pas forcément

d'attaques par le gui, ont été eux aussi touchés par cet événement climatique. Une première interprétation pourrait résider dans le fait que durant cet été 2003, même les stations forestières les plus humides ont connu un déficit hydrique important, auquel le sapin n'était pas adapté. Ce type de réaction à la sécheresse de 2003 a également pu être observé sur le pin sylvestre dans les Alpes-Maritimes (Lelou, 2010), site pour lequel les peuplements d'ubac ont connu des taux de mortalité bien supérieurs aux peuplements d'adret.

Les hêtres ont quant à eux été peu marqués par cet événement. Même si des jaunissements ont pu être observés, les récoltes de produits accidentels sont restées à un niveau relativement faible (maximum de récolte en 2005, avec moins de 350 tiges).

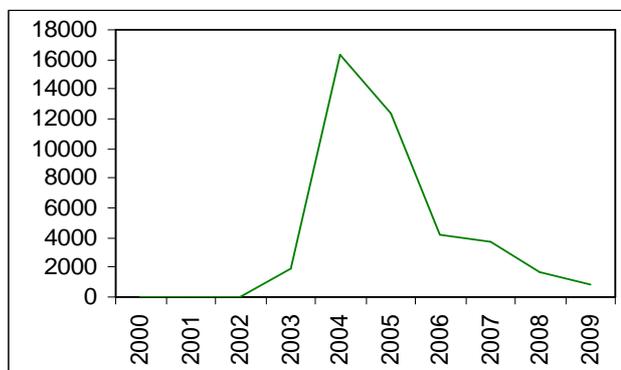


Figure 7 : Récolte de produits accidentels en sapin pectiné dans le Bugey. Données : ONF

¹ Bagnouls et Gaussen (1957) définissent un mois sec comme un mois pour lequel $P \text{ (mm)} < 2T \text{ (}^\circ\text{C)}$. En s'appuyant sur cette définition, aucun mois n'est considéré comme sec en 2003. Les mois de juin et août de l'année 2003 correspondent à des mois subsecs ($P < 3T$).

- Conséquences sur l'accroissement radial

Les hêtres comme les sapins ont connu une **réduction de l'accroissement** suite à la sécheresse de 2003. Sur certains sites, la croissance du hêtre a commencé à ralentir dès le début du mois de juillet 2003, pour ensuite repartir au mois de septembre grâce à un retour de la pluviométrie (Van der Werf, 2007). Les pertes de croissance observées ne semblent pas corrélées aux mortalités qui ont suivi la sécheresse (Cailleret, 2011).

3.4. D'autres exemples de sécheresses

Les années de sécheresse estivale ont été relevées dans le paragraphe 3.1. Comme précisé, nous nous intéresserons plus particulièrement aux sécheresses de 1976, dont les paramètres climatiques sont proches de ceux de 2003, et à celle de 1989, remarquable par son intensité et par le fait qu'elle n'ait pas été accompagnée de canicule.

- La **sécheresse de 1976** affecte une grande partie de l'Europe de l'Ouest, de l'Angleterre à l'Italie. En France, les régions du Nord-Ouest sont les plus touchées, et seule la région méditerranéenne est épargnée. Le déficit pluviométrique s'installe dès le mois de décembre 1975 et se prolonge jusqu'en août 1976. Le mois de juin est le plus exceptionnel de toute la période, aussi bien par le niveau des précipitations et des températures (+ 2,5 à + 4,5 °C par rapport à la moyenne 1951-1970 en Rhône-Alpes) que par la durée de l'insolation (Blanchet, 1977 ; Voiron et al., 1977).

À l'échelle française, les conséquences de la sécheresse sur les peuplements forestiers adultes restent assez ponctuelles, à l'exception, semble-t-il, de la sapinière vosgienne (Becker, 1987). Tandis que les jeunes plantations connaissent des taux de mortalité exceptionnels, surtout sur sol superficiel, les peuplements plus âgés montrent peu de signes de faiblesse : mortalités ponctuelles, dessèchements de cime chez le hêtre, chute de feuilles. Les essences les plus touchées sont les essences exotiques. Enfin, Aussenac (1978) précise qu'il y a eu en 1976 une perte de croissance difficilement quantifiable.

Pour le Bugey, les données disponibles sont celles de la station Météo-France d'Ambérieu-en-Bugey (fig. 8).

- L'**année 1989**, bien que peu remarquable sur le plan des températures, fait également partie des années les plus sèches du xx^e siècle. La sécheresse affecte l'ensemble du territoire français. Elle se caractérise par un fort déficit pluviométrique,

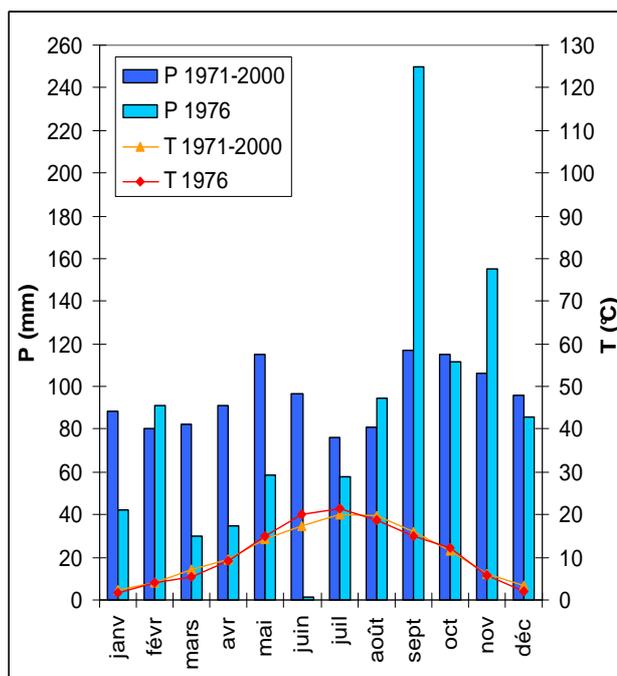


Figure 8 : Diagramme ombrothermique d'Ambérieu-en-Bugey (moyennes 1971-2000 et 1976).
Données : Météo-France

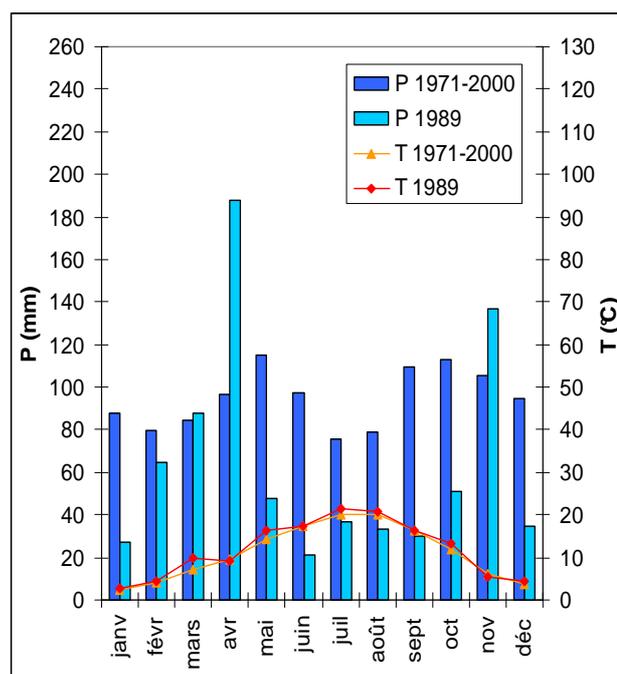


Figure 9 : Diagramme ombrothermique d'Ambérieu-en-Bugey (moyennes 1971-2000 et 1989).
Données : Météo-France

atteignant en Rhône-Alpes 39 % de la normale 1951-1980, et une durée d'insolation exceptionnelle (Blanchet, 1992). En été 1989, un département français sur deux est touché par des feux de forêts, y compris dans de régions habituellement épargnées telles que la Vendée ou le Morbihan (Centre interrégional de la coordination opérationnelle de la sécurité civile, 1990).

Les données climatiques de la station d'Ambérieu-en-Bugey montrent un bilan hydrique climatique inférieur à la normale du mois de mai au mois de décembre (fig. 9).

En confrontant les données climatiques disponibles et les paramètres climatiques qui, d'après la littérature, déterminent la croissance du sapin et du hêtre, nous pouvons émettre les hypothèses suivantes :



Hypothèse 3 :

Les cernes des années 1976, 1989 et 2003 sont plus fins que la moyenne, aussi bien pour le hêtre que pour le sapin.

Pour l'année 2003, il semblerait que seul le déficit hydrique de l'été puisse être un facteur significativement limitant. En effet, les autres facteurs déterminants, d'après la bibliographie, pour la croissance du hêtre et du sapin (précipitations de l'automne 2002, températures de l'hiver 2003), sont proches des valeurs normales.



Hypothèse 4 :

La perte de croissance radiale en année sèche est plus forte chez le sapin que chez le hêtre.

Cette hypothèse découle de l'observation de dépérissements plus marqués sur le sapin en 2003 dans le Bugey ainsi que des exigences écologiques de cette essence, parfois moins en accord avec les conditions locales que pour le hêtre.

4. Conclusion

La problématique de gestion, telle que définie plus haut, regroupe deux aspects de la réaction du sapin et du hêtre face aux sécheresses : le maintien ou non de la production, appréhendée par un étude de la réponse en croissance et la survie, qui correspond aux phénomènes de dépérissement et mortalité.

La synthèse bibliographique permet d'avancer les premières hypothèses en réponse à ces questions. Cependant, une question subsiste encore : la littérature semble montrer que les peuplements forestiers ont été plus affectés par la sécheresse de 2003 en situation de sol superficiel que de sol profond à réserve utile maximale élevée. Or, cela ne correspond pas toujours à ce qui a pu être observé dans le Bugey. Cette contradiction soulève tout l'intérêt de réaliser une étude de la croissance par classes de profondeur de sol.

L'étude qui suit vise à **tester les hypothèses dans leur composante « production »**, mais n'aborde pas de façon détaillée l'aspect lié à la survie des essences. Elle s'appuie sur la comparaison des accroissements du sapin et du hêtre lors d'épisodes de sécheresse.

Matériel et Méthodes

Cette étude, qui s'appuie sur les principes de la dendrochronologie (Lebourgeois, 2010b), vise à faire le **lien entre les largeurs de cernes mesurées et les conditions climatiques** de l'année considérée. Pour cela, des carottes de bois sont prélevées, sur lesquels les cernes pourront être mesurés.

La largeur de cerne mesurée pour une année n est le résultat d'un ensemble de facteurs, internes ou externes, qui peuvent être divisés de la manière suivante :

$$LC_n = A_n + C_n + D1 + D2 + E_n$$

LC_n représente la largeur mesurée du cerne.

A_n correspond à l'effet de l'âge d'élaboration du cerne.

C_n correspond à l'effet des variations interannuelles du climat.

D1 correspond aux conditions stationnelles locales, telles que la fertilité du milieu ou l'alimentation en eau.

D2 correspond aux effets à plus long terme des changements des conditions environnementales, tels que les effets du changement climatique ou de l'évolution progressive des pratiques sylvicoles.

E_n est le signal aléatoire caractérisant la variabilité propre à chaque arbre (potentiel génétique de l'arbre, erreurs de mesure...).

Le protocole qui suit a pour objectif d'isoler l'effet des variations interannuelles du climat, que nous cherchons à mesurer dans cette étude, et de fixer les autres facteurs, en particulier ceux liés à la station.

1. Plan d'échantillonnage

Afin d'obtenir une chronologie moyenne* représentative de la croissance du hêtre et du sapin pectiné sur la zone d'étude, il est nécessaire de **répéter les mesures** sur le plus grand nombre possible d'individus. On considère que le biais* lié aux caractéristiques propres de l'individu et de la station est négligeable si le nombre d'individus carottés est supérieur à 15, et si le nombre de répétitions par placette est supérieur à 3 (Mérian, Lebourgeois, 2011). Le plan d'échantillonnage proposé repose sur ces deux critères.

1.1. Principe

Dans un premier temps, nous choisissons d'étudier la croissance radiale du hêtre et du sapin selon trois compartiments écologiques liés à la **réserve utile maximale du sol**. Compte tenu de la nature du sous-sol, le plus souvent des dalles calcaires plus ou moins fissurées, mais aussi du sol, en général très pierreux, un simple sondage à la tarière ne permet pas d'estimer de manière fiable la réserve utile maximale. C'est pourquoi nous avons recours au critère de **volume de sol prospectable**² (qu'il est possible de prospecter à la tarière) :

$$V = P_f \times (1 - P_r)$$

V est le volume de sol prospectable.

P_f est la profondeur de sol maximale mesurée à la tarière à spirale sur la placette.

P_r est la pierrosité moyenne du profil de sol ainsi décrit (en %).

² Ce volume sous-estime certainement le volume de sol réellement disponible pour les racines.

Les 3 compartiments écologiques sont définis de la manière suivante :

- **Sol 1** : sol superficiel, pierrosité forte
- **Sol 2** : sol moyennement profond, pierrosité moyenne
- **Sol 3** : sol profond, pierrosité faible

Les valeurs seuils obtenues pour chacun des compartiments figurent dans le tableau 5 (p. 25).

Compte tenu des critères d'effectifs précisés en introduction, le schéma des effectifs minimaux est le celui présenté dans le tableau 3.

	Sapin	Hêtre	TOTAL
Sol 1	15 individus = <i>5 placettes x 3 individus</i>	15 - 5	30 - 5
Sol 2	15 - 5	15 - 5	30 - 5
Sol 3	15 - 5	15 - 5	30 - 5
TOTAL	45 - 15	45 - 15	90 - 15

Tableau 3 : Plan d'échantillonnage théorique minimal. **En gras**, le nombre d'individus ; en italique, le nombre de placettes.

Pour isoler, dans les chronologies moyennes obtenues, le signal propre au climat, les autres paramètres stationnels et de peuplement doivent être contrôlés. L'étude est donc restreinte :

- aux **peuplements mélangés**. Chaque placette comptera donc à la fois des hêtres et des sapins. Nous considérerons ainsi que seule l'essence est un critère de variabilité au sein de la placette. Ce choix est justifié par le fait que la microtopographie très forte de la zone d'étude ne permet pas de trouver des peuplements purs de hêtre et de sapin pour lesquels les conditions stationnelles soient strictement identiques.
- aux parcelles n'ayant **pas subi de prélèvements importants** dans les années précédant et suivant 2003. Notons qu'il n'a pas été choisi pour cette étude de n'échantillonner que sur des parcelles non passées en coupe après 2003, bien que cette méthode présente l'avantage de pouvoir observer les arbres morts sur pied. En effet, ainsi, les parcelles les plus touchées par la sécheresse de 2003 auraient été exclues de l'étude car passées en coupe sanitaire. En conséquence, **l'étude sera centrée sur les arbres qui ont survécu à la sécheresse de 2003**. L'estimation des mortalités pourra se faire par une étude des produits accidentels récoltés.
- aux **expositions d'adret**. Celles-ci sont définies par le guide de station *Alpes du Nord et montagnes de l'Ain* comme étant les expositions S, S-E, S-O et O.
- à l'étage du **montagnard inférieur**. Pour les expositions choisies, il correspond aux altitudes comprises entre 850 et 1100 m.
- aux **pentés faibles à moyennes**, de 15 à 45 %.

Ces trois dernières conditions sont celles rencontrées le plus fréquemment dans la zone d'étude.

Dans un second temps, et à partir du même jeu de placettes, nous chercherons à étudier la croissance du sapin et du hêtre selon 2 compartiments écologiques liés à **l'ensemble des facteurs stationnels**. Cette approche, qui ne modifiera en rien le plan d'échantillonnage, est décrite dans le paragraphe 3.2.2.

1.2. Méthode

L'échantillonnage se fait en 2 étapes :

- **sélection des parcelles** forestières répondant aux 5 critères cités plus haut ;
- **prospection** des parcelles afin d'y installer les placettes et choix des 3 hêtres et 3 sapins correspondants.

La **répartition des placettes** dans les 3 compartiments écologiques se fera *a posteriori*, en fonction des descriptions de sol réalisées. En effet, les données disponibles initialement ne sont pas suffisantes pour effectuer cette répartition *a priori*.

1.2.1.Sélection des parcelles

La sélection des parcelles a été réalisée à partir de la **base de données des coupes martelées** entre 1995 et 2009 par l'ONF. Celle-ci a permis d'échantillonner sur les critères de mélange hêtre et sapin et de prélèvements. Ce dernier critère, lié à l'historique du peuplement, conditionne le statut des forêts dans lesquelles sera réalisée l'étude. En effet, les données de prélèvement manquent souvent en forêt privée. Toutes les mesures seront donc réalisées en forêt communale ou domaniale.

Un prélèvement est considéré comme faible si, sur la période 1995 - 2009 :

- le volume prélevé total est inférieur à 30 m³/ha,
- le nombre de tiges prélevées total est inférieur à 20 tiges/ha.

On s'assurera également qu'aucun prélèvement supplémentaire n'a été réalisé en 2010.

Par ailleurs, l'observation de la **carte IGN** au 1/25 000 permet une sélection des parcelles en fonction des conditions d'altitude, d'exposition et de pente retenues.

1.2.2.Prospection et choix des individus

Le positionnement des placettes se fait à **l'avancement**. On recherche un site :

- pour lequel les **conditions stationnelles semblent homogènes**, notamment par l'observation de l'affleurement et de la microtopographie,
- à une distance minimale de 20 m de la lisière,
- sur lequel il est possible de trouver 3 hêtres et 3 sapins répondant aux critères cités ci-après,
- sur lequel ne se trouvent pas de souches récentes.

Ainsi, les dimensions et forme de la placette ne sont pas définies *a priori*. Elles sont conditionnées par l'homogénéité du site.

Concernant le choix des individus, l'objectif est de s'affranchir de la variabilité de la croissance liée à l'âge et à la position dans le peuplement. Pour cela, tous les arbres de la placette doivent :

- appartenir à l'étage **dominant**,
- présenter des hauteurs, diamètres et formes de houppier comparables.

De plus, seuls les sapins ne présentant pas de gui (ou peu) sont retenus, ce dernier étant un facteur de réduction de la croissance radiale (Nierhaus-Wunderwald *et al.*, 1997).

2. Mesures

2.1. Mesures de terrain

Le tableau suivant (tab. 4) récapitule l'ensemble des variables mesurées sur le terrain.

2.2. Mesure des largeurs de cernes

Le carottage est réalisé à 1,30 m, à cœur, si possible parallèlement aux courbes de niveau pour éviter le bois de compression. Chaque carotte est ensuite planée, puis les largeurs de cerne sont mesurées en laboratoire, à l'aide du système Lintab (fig. 10). La précision théorique de la mesure est de 1/100 mm.

Les séries de largeurs de cerne doivent ensuite être corrigées, afin de repérer les cernes manquants, les faux cernes ou encore les simples erreurs de mesure. Pour cela, le principe



Figure 10 : Système de mesure Lintab

utilisé est celui de l'interdatation* : chaque série individuelle est comparée visuellement à la moyenne de l'ensemble des séries (ou série moyenne). Une correction est apportée chaque fois qu'un décalage est observé.

		Conditions retenues	Mesures
Variabiles étudiées			
Croissance radiale			Carottage à cœur à la tarière motorisée
Volume de sol prospectable			Sondage à la tarière à spirale : description des horizons (épaisseur, texture, éléments grossiers)
Dépérissement et mortalité			- % branches mortes selon le protocole DSF - Relevé des arbres morts sur pied dans la placette (nombre, essence, diamètre, hauteur) - Produits accidentels
Variabiles contrôlées			
Variabiles stationnelles	Altitude	Montagnard inférieur (850-1100 m)	Relevé GPS
	Exposition	S, S-E, S-O et O	Relevé boussole (rad)
	Pente	Entre 15 et 45 %	Relevé Vertex
	Confinement	nul	Position dans le versant selon la classification IFN
	Mésoclimat	Bugey central	T, P et Bhc (voir § 1.1.3.1)
Variabiles dendrométriques	Peuplement	Mélangé (couvert résineux : 25 à 75 %*)	- Surfaces terrières hêtre et sapin - Type de peuplement**
	Statut social, Historique de l'arbre	Dominant	- Hauteur (Vertex) - Hauteurs de houppier amont et aval (Vertex) - Rayons de houppier amont et aval
	Âge	Moyen à élevé, jugé par un diamètre minimum de 25 cm	Diamètre (compas)
	Gui	Pas de présence massive de gui	Note selon la grille IFN
	Prélèvement	< 30 m ³ /ha et > 20 tiges/ha (1995 - 2010)	- Historique de la parcelle (coupes) - Absence de souche à proximité

Tableau 4 : Bilan des variables mesurées. * D'après la définition des futaies mixtes feuillus-résineux de l'IFN
** D'après la typologie des futaies résineuses jardinées du deuxième plateau et des pentes intermédiaires du massif jurassien

3. Caractérisation des placettes et répartition de l'échantillon

3.1. Distribution géographique des placettes

Au total, 18 placettes sont échantillonnées. Elles sont réparties de manière à couvrir la plus grande partie des versants ouest du plateau d'Hauteville-Lompnes (fig. 11). Elles s'étendent d'Ordonnaz au sud-ouest à Brénod au nord-est.

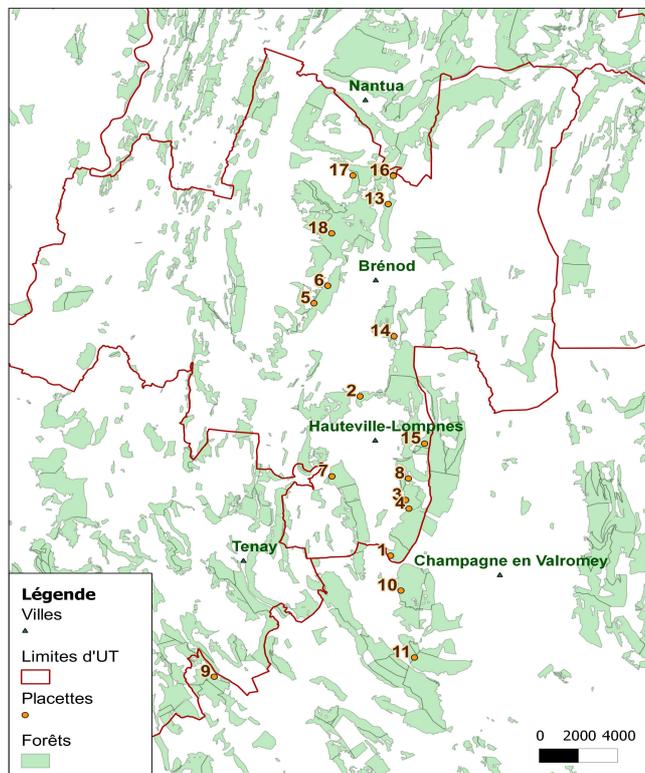


Figure 11 : Carte de localisation des placettes de mesure

3.2. Répartition de l'échantillon en compartiments écologiques

Comme abordé au paragraphe 1.1, deux méthodes sont envisagées pour stratifier l'échantillon :

- **approche monofactorielle** : les groupes sont distingués selon des critères purement édaphiques (profondeur moyenne, maximale, affleurement et pierrosité), synthétisés en partie dans la variable Vol_sol. Les autres critères stationnels sont au maximum rendus homogènes entre les groupes. Cette approche répond à un objectif de compréhension.
- **approche intégratrice** : les groupes sont distingués selon un ensemble de critères stationnels (sol, exposition, altitude). Cette approche répond à un objectif d'application pratique des résultats.

Par ailleurs, plusieurs contraintes limitent les possibilités de stratification :

- La classification, réalisée *a posteriori*, doit s'adapter aux conditions réellement échantillonnées.
- Les critères stationnels autres qu'édaphiques ont une amplitude restreinte dans l'échantillon.
- La stratification doit répondre à une nécessité d'équilibrer les effectifs, avec un minimum de 5 placettes par groupe.

3.2.1. Approche monofactorielle

Le critère principal de classification est ici le volume de sol prospectable. Comme évoqué plus haut, trois groupes sont réalisés après mesures. Ces groupes doivent être validés statistiquement, de manière à vérifier que :

- chaque groupe présente des conditions édaphiques homogènes et bien différenciées de celles des autres groupes,
- les autres conditions écologiques (altitude et exposition en particulier) et de peuplement sont comparables d'un groupe à l'autre.

Pour cela, une **ACP* (analyse en composantes principales)** est réalisée, qui nous permettra de représenter dans le plan les « distances » entre chaque placette en prenant en compte un ensemble de variables descriptives. Les variables considérées sont (voir l'annexe 4 pour la signification des codes) :

- Sol : Vol_sol, Prof_sol_moy, Prof_sol_max, Pierrosite, Affleurement
- Station : Z, Expo, Pente
- Peuplement : Gtotal, D_moy, H_moy, Age_moy, H100

Des variables de peuplement sont intégrées dans l'objectif d'homogénéiser d'éventuels effets de la sylviculture entre les groupes. On fait ici l'hypothèse que les variables mesurées sur les arbres carottés (diamètre, hauteur, âge) sont représentatives du peuplement. Cette hypothèse est appuyée par le fait que seuls des arbres dominants ont été carottés.

Les résultats de l'ACP (fig. 12) permettent de corriger la répartition des placettes réalisée à partir du seul critère Vol_sol (changement de groupe ou suppression de placettes). Le cercle des corrélations montre un premier axe représentant les conditions stationnelles (sol, altitude, exposition, pente) et un second axe lié au peuplement (surface terrière, âge, hauteur, diamètre). Ainsi, tous les paramètres de sol sont bien corrélés entre eux (profondeur, pierrosité, affleurement), et les paramètres stationnels ne sont pas corrélés avec les paramètres de peuplement.

La répartition des placettes dans le plan montre 3 groupes bien distincts. L'hétérogénéité des facteurs de peuplement au sein des groupes est similaire.

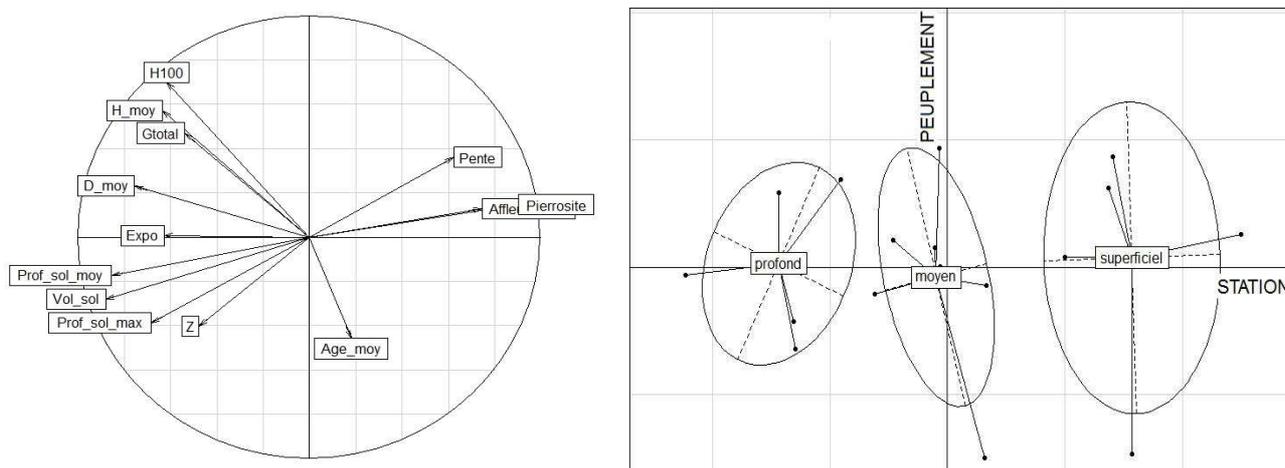


Figure 12 : Résultats de l'ACP pour la répartition des placettes selon les critères édaphiques

L'annexe 5 regroupe l'ensemble des représentations en *boxplot* des variables mesurées, pour chaque groupe de sol. Par rapport aux distributions observées dans le cas d'une répartition des placettes en fonction du seul critère Vol_sol, cette classification, présente l'avantage de mieux prendre en compte l'affleurement et la pierrosité (annexe 5, fig. 1.c et 1.d). Elle est cependant moins tranchée par rapport aux critères Vol_sol et Prof_sol_max (annexe 5, fig. 1.b et 1.e). Concernant les autres critères stationnels (annexe 5, fig. 2), elle permet de réduire de manière satisfaisante les différences d'altitude et d'exposition

entre les groupes³, mais semble accentuer les différences de pente. Enfin, vis-à-vis des critères de peuplement (annexe 5, fig. 3), l'effet le plus marqué est celui de la surface terrière, plus faible dans le groupe des sols superficiels.

Les résultats devront être analysés au regard de ces distributions. Il faudra notamment considérer le fait que certaines placettes de sol superficiel peuvent présenter une altitude plus faible, une exposition orientée plus au sud, et une surface terrière plus faible que les placettes des deux autres groupes.

3.2.2. Approche intégratrice

Deux groupes ont été ici formés, de la manière suivante :

- **Station A : « sèche »**. Placettes sur sol superficiel OU d'exposition sud OU de basse altitude.
- **Station B : « fraîche »**. Placettes sur sol profond OU d'exposition nord-ouest OU de haute altitude.

Les placettes présentant des caractéristiques peu tranchées ou contradictoires vis-à-vis des critères de classification ont été éliminées. Le jeu final compte 15 placettes. De même que lors de la première stratification, une ACP permet de valider le classement (fig. 13).

Les distributions montrent une bonne séparation des groupes sur les critères édaphiques et sur l'exposition (annexe 5, fig. 4.b et 4.d à 4.h). Vis-à-vis de l'altitude (annexe 5, fig. 4.a), la distinction est un peu moins marquée compte tenu de la faible amplitude des valeurs (de 850 à 1100m). Comme recherché, les critères de peuplement ne sont pas discriminants (annexe 5, fig. 5), à l'exception de la surface terrière. En effet, les distributions en *boxplot* montrent que les peuplements de stations sèches sont majoritairement clairs (en moyenne 25 m³/ha contre 37 m³/ha pour les peuplements de stations fraîches).

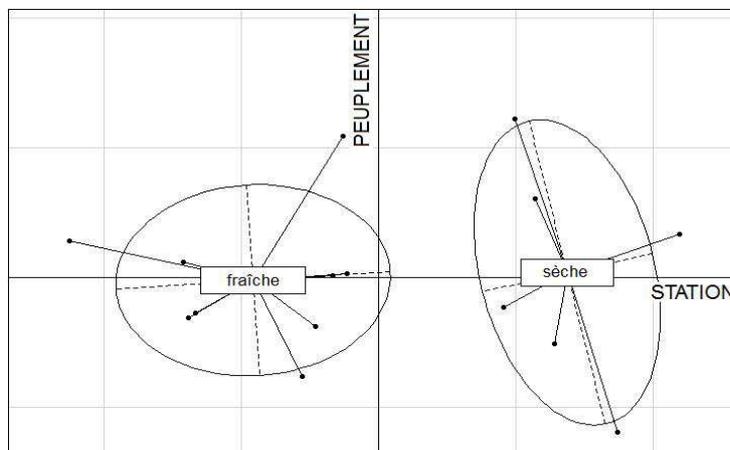


Figure 13 : Représentation des placettes dans le plan, groupées selon l'ensemble des paramètres stationnels.

3.2.3. Données détaillées par groupe

Les effectifs, différents selon le type de classification pour des raisons d'homogénéité statistique des groupes formés, sont les suivants :

- Sol 1** (superficiel) : 5 placettes, 15 hêtres, 15 sapins
- Sol 2** (moyennement profond) : 7 placettes, 21 hêtres, 21 sapins
- Sol 3** (profond) : 5 placettes, 15 hêtres, 15 sapins

- Station A** (sèche) : 6 placettes, 18 hêtres, 18 sapins
- Station B** (fraîche) : 9 placettes, 27 hêtres, 27 sapins

³ Une comparaison de moyenne permet de vérifier que les altitudes et expositions moyennes de chaque groupe sont comparables.

Le tableau 5 donne pour chaque paramètre la valeur moyenne (gras) et les valeurs extrêmes. En annexe 6 figurent les caractéristiques de chaque placette.

	Général	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Station A	Station B
Altitude (m)	839 - 1090 968	840 - 994 921	949 - 1049 1006	891 - 1090 987	839 - 994 907	949 - 1090 1007
Exposition (°)	230 - 350 297	230 - 335 263	230 - 350 306	295 - 320 311	230 - 335 275	290 - 350 318
Pente (%)	13 - 48 31	25 - 48 38	23 - 46 30	13 - 36 23	25 - 48 38	13 - 46 29
Profondeur moy (cm)	5 - 60 24	5 - 10 8	10 - 30 18	30 - 60 50	5 - 10 8	10 - 60 37
Profondeur max (cm)	10 - 90 44	10 - 40 25	25 - 75 47	35 - 90 63	10 - 40 24	30 - 90 62
Pierrosité (%)	0 - 90 35	30 - 90 66	10 - 50 30	0 - 10 4	10 - 90 70	0 - 40 14
G (m ³ /ha)	19 - 45 33	19 - 36 26	26 - 44 36	23 - 45 38	19 - 37 26	23 - 45 35
Age hêtre (ans)	53 - 204 89	62 - 120 88	54 - 131 84	74 - 173 103	62 - 120 84	54 - 131 84
Age sapin (ans)	46 - 225 112	50 - 158 120	75 - 176 122	89 - 113 102	50 - 158 109	75 - 176 115
Hauteur hêtre (m)	15 - 36 25	18 - 30 24	21 - 29 25	27 - 30 28	15 - 36 23	16 - 32 26
Hauteur sapin (m)	15 - 34 25	17 - 28 22	19 - 28 24	24 - 33 29	15 - 29 21	15 - 35 26
Diamètre hêtre (cm)	21 - 55 34	25 - 39 30	31 - 42 34	36 - 45 41	23 - 40 29	27 - 55 37
Diamètre sapin (cm)	26 - 57 42	29 - 44 37	33 - 52 43	40 - 51 47	26 - 49 35	28 - 57 44

Tableau 5 : Valeurs moyennes et extrêmes des variables mesurées pour chaque groupe.
En jaune sont indiqués les facteurs que l'on souhaite discriminants.

Enfin, pour obtenir des données climatiques précises aux coordonnées des placettes, les données des postes Météo-France ont été corrigées à l'aide du modèle climatique Aurelhy (ou du modèle climatique du Lerfob pour le bilan hydrique climatique). Les écarts entre, d'une part les valeurs normales des postes, et d'autre part les valeurs normales extraites du modèle aux coordonnées des placettes, ont permis cette correction.

4. Schéma bilan

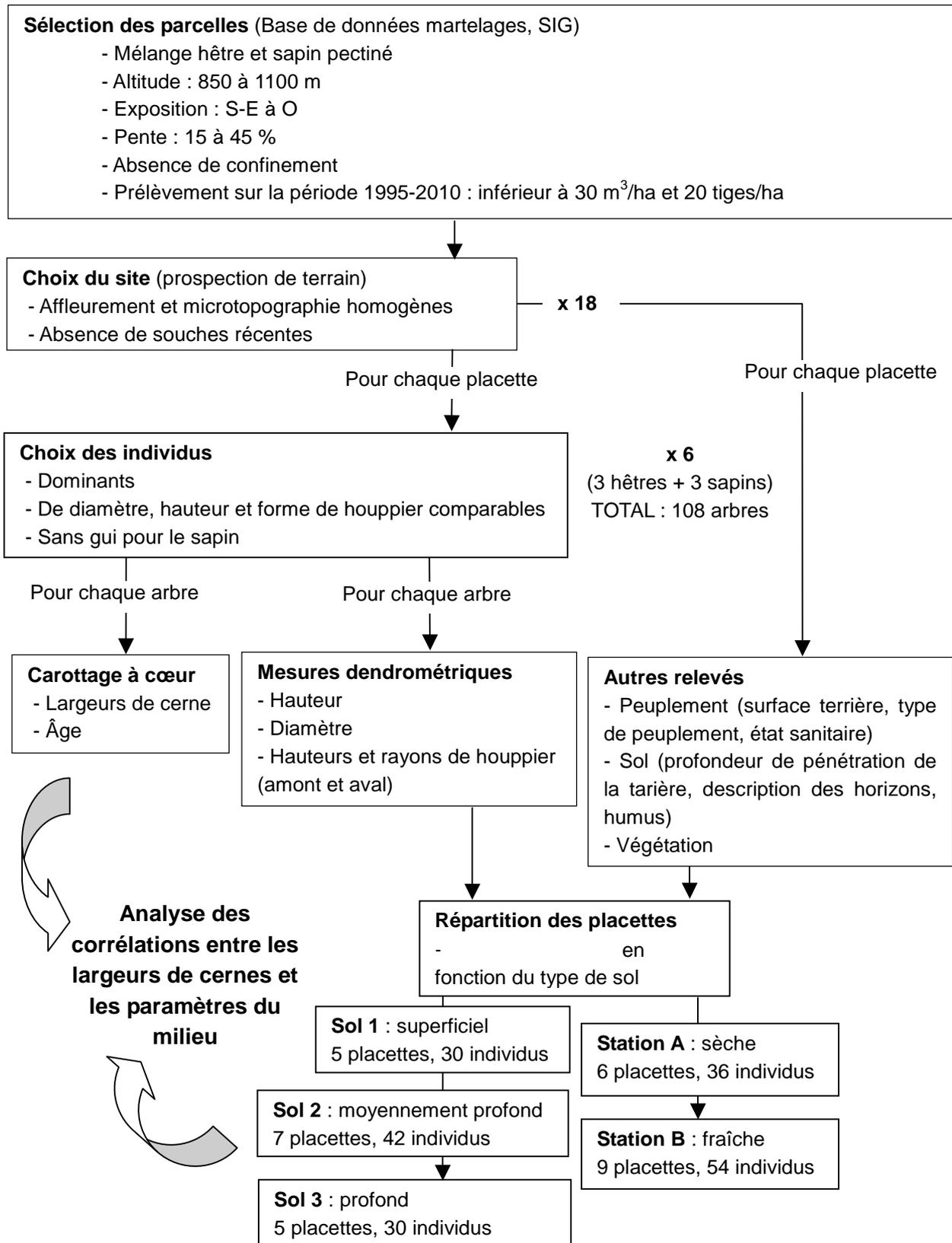


Figure 14 : Schéma récapitulatif du protocole

Résultats

Dans une première partie, l'analyse porte sur la croissance mesurée en millimètres, présentée sous forme de chronologies moyennes brutes. Cette approche permet d'observer les tendances d'accroissement sur le long terme, mais ne permet pas de séparer les effets du climat, de l'âge ou de la station. Par la suite, l'analyse porte sur les chronologies maîtresses. Celles-ci sont le résultat d'une transformation statistique des chronologies moyennes brutes : la standardisation*. Elles sont une représentation du signal haute fréquence des chronologies, qui correspond à la réponse aux variations interannuelles du climat. Elles permettent d'établir des corrélations entre croissance et climat et d'observer la réponse des essences aux sécheresses estivales. Enfin, d'éventuels effets des paramètres dendrométriques sur la perte de croissance accusée en 2003 sont étudiés, tels que la hauteur ou le diamètre des individus. L'objectif de cette dernière approche est de vérifier que par la méthode employée, seuls les paramètres stationnels ont une influence sur le comportement des essences en 2003.

Dans cette partie de résultats, tous les graphiques montrent en **bleu** les résultats du **sapin pectiné**, en **vert** les résultats du **hêtre**.

Afin de faciliter la compréhension de ce qu'impliquent les résultats par rapport à la problématique, les hypothèses testées, numérotées de 1 à 7, sont reprises dans l'annexe 7.

1. Étude des chronologies moyennes brutes

1.1. Tendances observées sur le long terme

1.1.1. Comparaison des essences

Les chronologies moyennes brutes sont obtenues par moyenne des séries individuelles, pour le sapin d'une part (fig. 15), et pour le hêtre d'autre part (fig. 16). La validité de la chronologie dépend du nombre d'arbres considérés. Ainsi, les périodes précédant 1900 chez le hêtre et 1860 chez le sapin, pour lesquelles moins de 10 arbres ont pu être carottés, ne peuvent pas être interprétées.

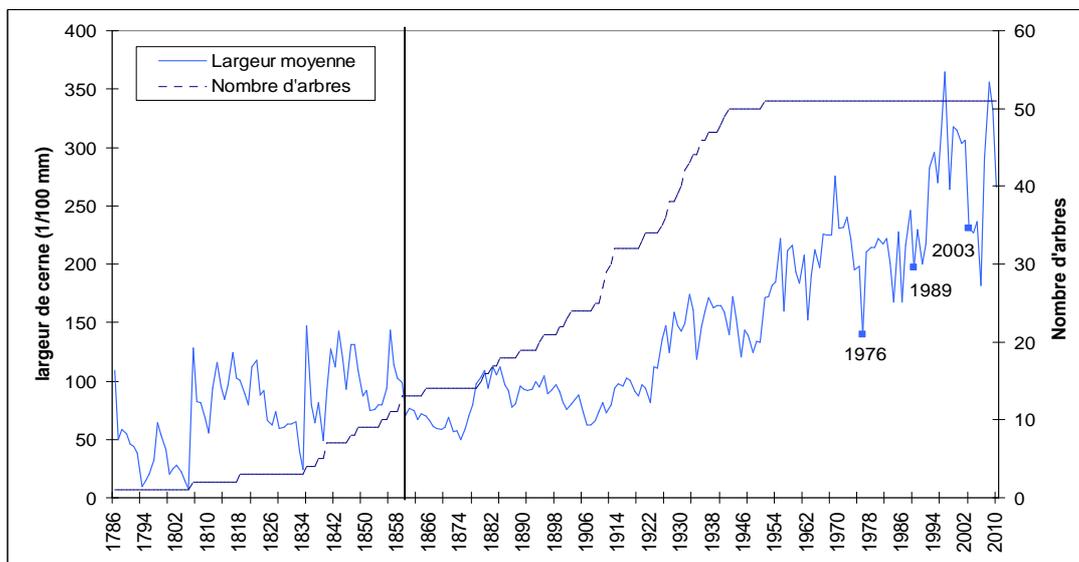


Figure 15 : Chronologies moyennes du sapin

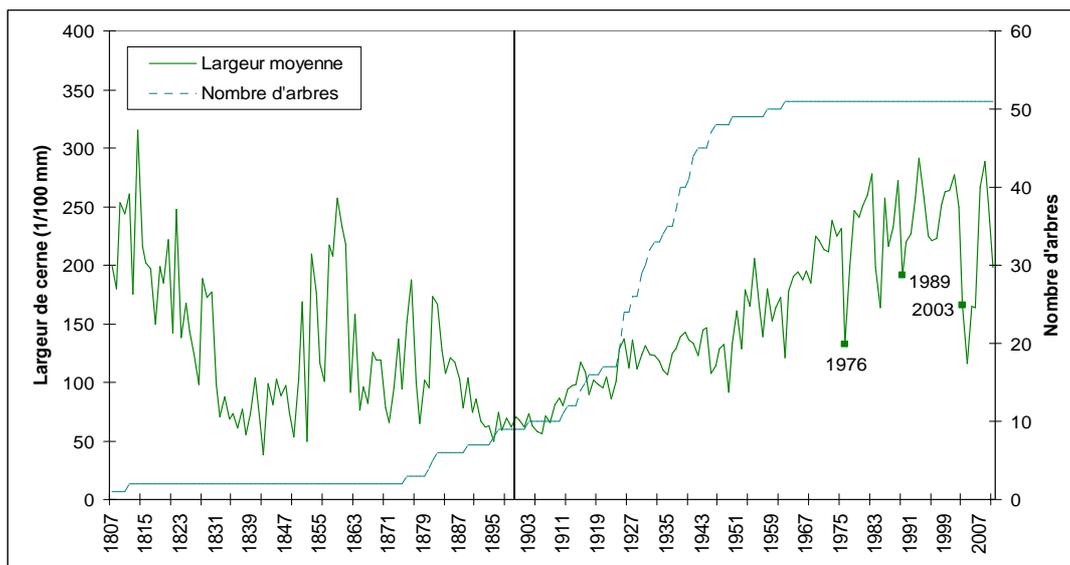


Figure 16 : Chronologies moyennes du hêtre

Après ces deux dates , on peut observer, pour les deux essences :

- une tendance à l'**augmentation continue de l'accroissement annuel**. Cette observation peut paraître surprenante, dans la mesure où l'accroissement annuel a tendance à diminuer avec l'âge de l'arbre (Lebourgeois, 2010b). Deux explications peuvent alors être avancées : la hausse de la concentration atmosphérique en CO₂ (Institut national de la recherche agronomique, 2000) et un changement dans les pratiques sylvicoles. En effet, les peuplements, installés au milieu du XIX^e siècle, sont aujourd'hui beaucoup plus ouverts qu'ils ne l'étaient au début du XX^e siècle (communication personnelle de M. Dumas, Agence Ain-Loire-Rhône de l'ONF). Une décapitalisation (passage d'une structure régularisée dense à une structure jardinée plus claire) pourrait donc expliquer en partie l'augmentation de la croissance radiale de 1900 à nos jours.

- une **augmentation de la variabilité interannuelle**, plus particulièrement à partir des années 1950. Cette dernière serait également à mettre en lien avec la densité des peuplements au début du XX^e siècle. Pendant cette période, la lumière, principal facteur limitant, ne permet pas au facteur climat de s'exprimer. Il en résulte une croissance très régulière des individus.

- des **années de sécheresses** bien marquées.

Validation de l'hypothèse 3 :



Les années 1976, 1989 et la période 2003-2006, ainsi que les années 1962 et 1984 (également sèches), montrent une croissance très faible du sapin et du hêtre.

Notons que pour la période 2003-2006, les deux essences ont montré des comportements différents. En effet, l'année la moins favorable à la croissance a été 2006 pour le sapin, et 2004 pour le hêtre.

1.1.2. Effet du sol

Pour la suite de l'analyse, les chronologies seront représentées à partir de 1970, de manière à mieux visualiser la période récente qui nous intéresse plus particulièrement. Les chronologies complètes sont regroupées en annexe 8. Dans cette partie et celle qui suit, les chronologies sont distinguées par essence afin d'évaluer l'influence de la profondeur de sol et de la station sur la croissance radiale (fig. 17 et fig. 18). La comparaison des essences au sein d'un type de sol ou de station se fera à partir des séries

standardisées.

Les chronologies moyennes obtenues pour le **hêtre** sont très proches d'un groupe de sol à l'autre. En 1976 et sur la période 2003-2006, les hêtres sur sol profond semblent tout de même avoir été moins affectés par la sécheresse que les autres, du moins l'année de l'événement climatique. L'effet du sol sur la croissance radiale ne se manifesterait donc chez le hêtre qu'en année de climat défavorable.

Au contraire, le début des années 1980 marque pour le **sapin** une séparation des chronologies entre les différents types de sol.

Cette date correspond à une période d'éclaircie des peuplements, liée à une intensification des récoltes. Ainsi, les chronologies observées pourraient être le résultat d'un passage d'une croissance limitée par le facteur lumière à une croissance limitée par le facteur sol.

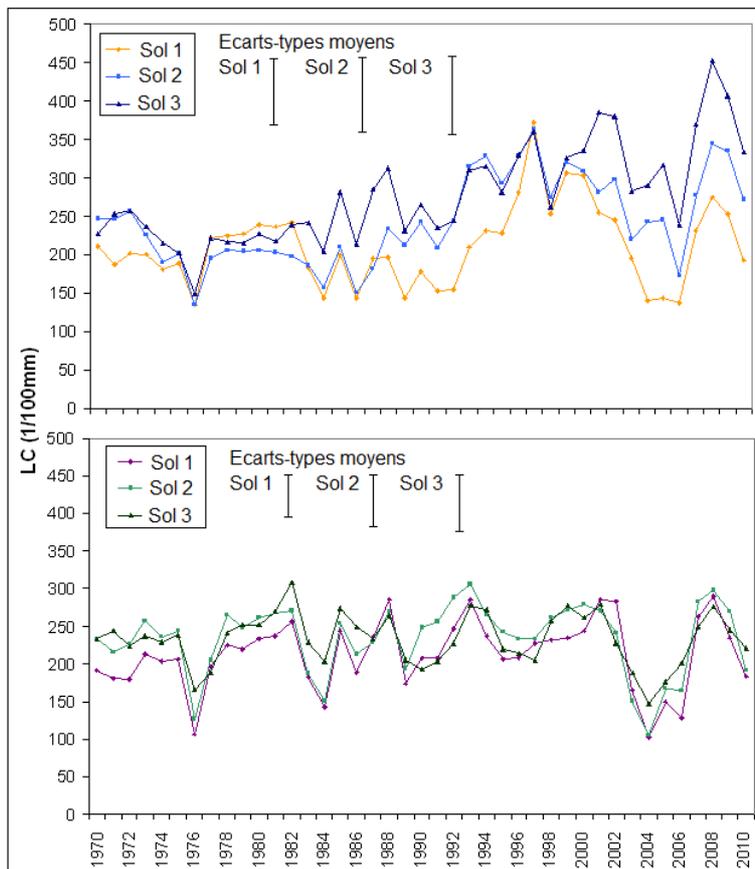


Figure 17 : Chronologies moyennes du sapin (en haut) et du hêtre (en bas) pour trois profondeurs de sol. LC : largeur de cerne

1.1.3. Effet de la station

La classification en deux types stationnels apporte les mêmes conclusions que la classification par type de sol.

Cependant, la hiérarchisation des chronologies du sapin est un peu moins marquée (fig. 18). Les éclaircies des années 1980 semblent tout de même avoir joué en faveur des peuplements de stations fraîches.

Enfin, les chronologies du hêtre montrent une séparation plus nette, avec le plus souvent une croissance moyenne plus forte sur station fraîche que sur station sèche.

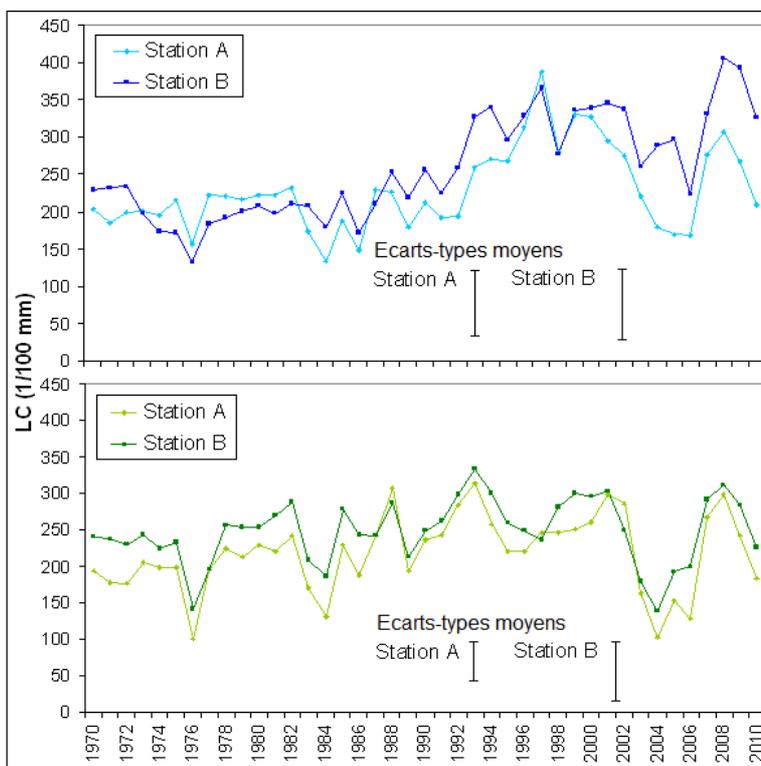
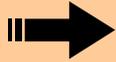


Figure 18 : Chronologies moyennes du sapin (en haut) et du hêtre (en bas) pour deux types de station. LC : largeur de cerne

Validation de l'hypothèse 1 :



La croissance du sapin est, à partir des années 1980, nettement plus forte sur les sols profonds, à forte réserve utile maximale.

1.2. Écarts relatifs de croissance

Pour chaque essence ont été calculés les écarts relatifs de croissance* par rapport aux 10 années précédentes. Cette variable correspondant au rapport :

$$ER10 = \frac{LC_n - LC_{n-11 \rightarrow n-1}}{LC_{n-11 \rightarrow n-1}} \times 100$$

LC_n : largeur de cerne de l'année n
 $LC_{n-11 \rightarrow n-1}$: largeur de cerne moyenne sur les 10 ans précédant l'année n

Exprimée en pourcentage, elle peut être interprétée comme la réaction en croissance de l'essence aux conditions externes, connaissant sa croissance moyenne sur les 10 années précédentes. Une valeur absolue forte montrera un changement important dans la croissance, le signe donnant le sens de ce changement. De la même manière, on peut considérer les écarts relatifs par rapport à la moyenne des 5 années précédentes (ER5), ou à la croissance de la seule année précédente (ER1). La perte de croissance en année sèche étudiée dans la partie 4 (p. 40) correspond à l'écart relatif de croissance ER5.

Sur la période récente, les **écarts relatifs de croissance des deux essences sont très proches**, traduisant une réaction similaire aux conditions climatiques de l'année (fig. 19). Les années qui apparaissent comme des années de perte de croissance importante concordent également bien pour les deux essences. Il s'agit d'années de forte sécheresse estivale (1976, 1984, 1989 et la période 2003 à 2006). On retrouve également des similitudes dans les années de forte reprise de croissance (1993, 2008), avec cependant des reprises plus marquées pour le sapin dans les années 1993 à 1997.

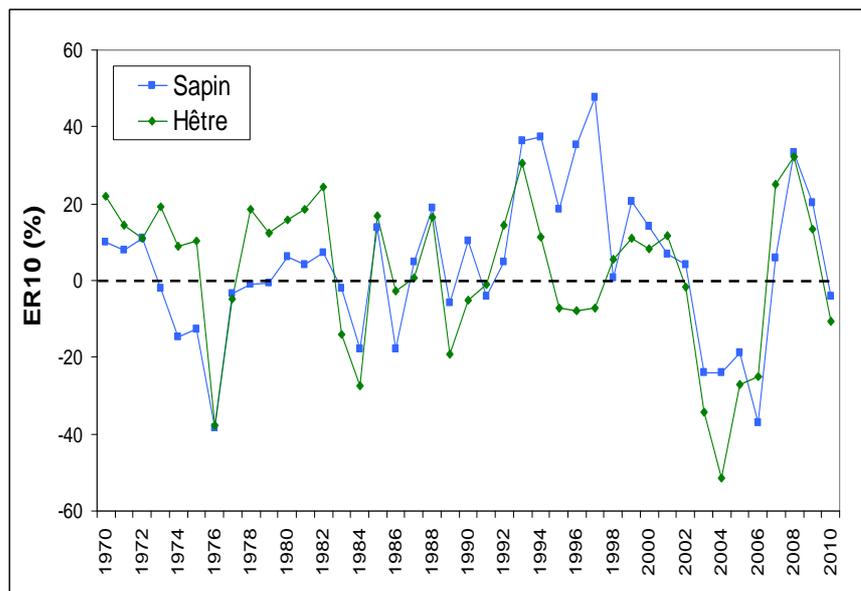


Figure 19 : Ecarts relatifs de croissance calculés par rapport à la croissance moyenne des 10 années précédentes

Afin de préciser la comparaison des écarts relatifs de croissance des deux essences, le rapport suivant peut être calculé :

$$qER10 = \frac{ER10_{\text{hêtre}} + 100}{ER10_{\text{sapin}} + 100}$$

L'ajout de la valeur 100 à chaque écart relatif de croissance permet d'obtenir des valeurs positives en conservant l'ordre des valeurs d'origine.

- $qER_{10} > 1$: reprise plus forte ou perte de croissance plus faible du hêtre par rapport au sapin. L'année avantage le hêtre par rapport au sapin.
- $qER_{10} < 1$: reprise plus forte ou perte de croissance plus faible du sapin par rapport au hêtre. L'année avantage le sapin par rapport au hêtre.

Ce rapport traduit donc le dynamisme de l'essence et son aptitude à répondre plus favorablement au climat que la seconde essence. Il peut également permettre de faire le lien avec les années d'événements climatiques extrêmes.

Les années très favorables à la croissance du hêtre vis-à-vis du sapin sont les années 1973, 1974 et 1975 (fig. 20). Ces années ne semblent pas présenter de conditions climatiques particulières. En effet, le début des années 1970 connaît des précipitations et des températures moyennes annuelles proches de la normale (environ 7°C).

Les années très favorables à la croissance du sapin par rapport au hêtre sont les années 1995, 1996, 1997 et 2004. Ces années se situent immédiatement après des années de sécheresse ou de canicule, ce qui laisserait supposer que ce type d'événement affecte le hêtre de manière plus durable que le sapin. Cependant, les autres événements de sécheresses (1976, 1984) ne sont pas suivis d'une plus grande vigueur du sapin. Ainsi, les années qui favorisent fortement une essence par rapport à l'autre ne semblent pas en lien direct avec les événements climatiques extrêmes.

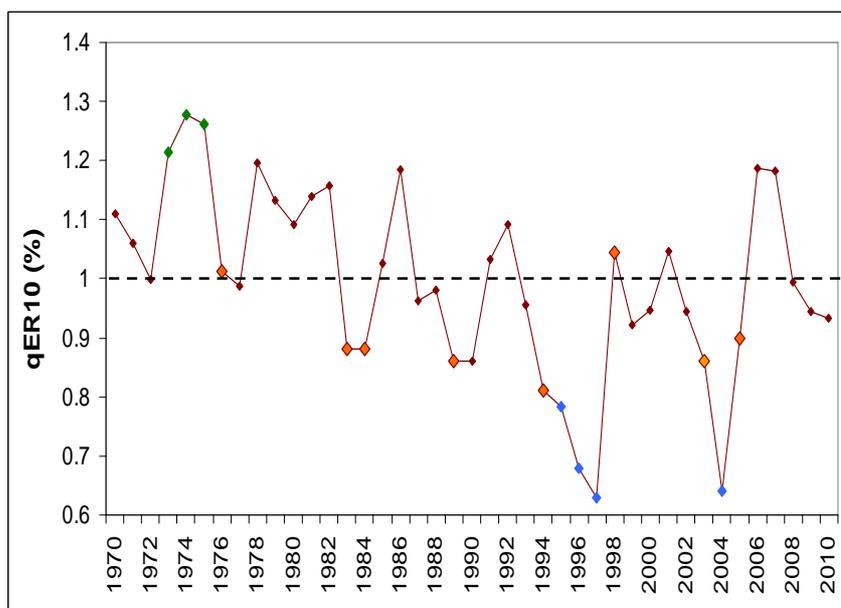


Figure 20 : Rapport entre les écarts relatifs de croissance du sapin et du hêtre ; Vert : dynamisme plus fort du hêtre de plus de 20% par rapport au sapin ; Bleu : dynamisme plus fort du sapin de plus de 20% par rapport au hêtre ; Orange : année de sécheresse (1976, 1983, 1984, 1989, 1994, 2003, 2005)

La majeure partie des années de sécheresse montre tout de même un écart relatif de croissance plus faible pour le sapin que pour le hêtre. Nous pouvons également noter qu'à partir des années 1980, le sapin semble prendre plus fréquemment l'avantage par rapport au hêtre (20 années sur 30 en faveur du sapin après 1980, contre 30 sur 64 avant 1980). Un test d'indépendance du khi-2 montre que cette différence entre les deux périodes n'est pas significative.

Réfutation de l'hypothèse 2 :



Les comportements très proches du sapin et du hêtre ne permettent pas d'affirmer que le hêtre est une bonne alternative au sapin.

Réfutation de l'hypothèse 4 :



La différenciation des essences en année sèche, en termes de croissance, ne semble se faire ni en faveur du hêtre ni en faveur du sapin.

1.3. Années caractéristiques

Les années caractéristiques sont les années pour lesquelles **au moins 75 % des arbres** du peuplement considéré ont présenté un **écart relatif de croissance d'au moins 10 % par rapport à l'année précédente** (Lebourgeois, 2010 b). Cet écart correspond à la variable ER1 citée plus haut. L'année est positive en cas de croissance plus forte et négative sinon. La macro « POINTER » réalisée sous le logiciel R par Pierre Mérian (Lerfob) permet d'automatiser le calcul de ces années. Le calcul a été réalisé pour un minimum de 15 arbres par essence, soit à partir de 1879 pour le sapin et de 1916 pour le hêtre.

Les **années caractéristiques pour les deux essences** (tab. 6) sont des années de sécheresses intenses (1976, 1989) ou au contraire de reprise de conditions climatiques favorables (1977, 2007⁴).

Réfutation de l'hypothèse 2 :



Le hêtre montre systématiquement une réaction plus forte que le sapin, dans les négatives comme dans les positives. Cette caractéristique ne fait pas du hêtre une bonne essence de substitution au sapin.

Le **hêtre** a également été marqué de manière négative par l'année 1983, année de canicule, et de manière positive par 1963, année parmi les plus froides des 50 dernières années (Météo01, site de données météorologiques de l'Ain). Il semble réagir moins fortement aux aléas climatiques sur sol profond, avec seulement 6 années caractéristiques depuis 1916, contre 24 sur sols superficiels et 18 sur sols moyens. L'analyse par groupe stationnel donne des résultats comparables : le hêtre semble répondre de manière plus forte et plus homogène aux variations interannuelles des conditions du milieu sur les stations sèches (23 années caractéristiques dans ces situations contre 8 en situations plus fraîches).

Le **sapin** présente quant à lui des réactions relativement proches dans chacune des situations.

Réfutation de l'hypothèse 1 :



Les pertes de croissance accusées par le sapin en année sèche ne sont ni plus intenses ni plus fréquentes sur sol superficiel.

Les années 1998 et 2006 lui sont caractéristiques. L'année 1998 a connu une vague de fortes chaleurs (Bréda *et al.*, 2004), qui ne ressort cependant pas dans les données climatiques relevées sur les placettes. En 2006, des gelées tardives se sont ajoutées à une canicule (Département de la santé des forêts, 2009). Étonnamment, cette première analyse ne fait pas ressortir les années 2003 et 2005 comme caractéristiques pour le sapin. En 2003, seuls 68 % des sapins de l'échantillon ont eu une croissance au moins 10 % inférieure à la croissance de l'année 2002, bien qu'en moyenne, la croissance en 2003 ait été de 17 % inférieure à la croissance de 2002. Cela traduit une variabilité importante entre les placettes. En revanche, 84 % des hêtres de l'échantillon ont eu en 2003 une croissance au moins inférieure de 10 % à la croissance de l'année 2002, avec en moyenne une perte de croissance de 29 % entre ces deux années.

La plupart des années qui ressortent de cette analyse sont celles qui figurent classiquement dans la littérature pour le territoire français (Lebourgeois, 2010 b).

⁴ L'année 2007 a été dans le Bugey particulièrement favorable à la croissance, avec une forte pluviométrie lors de la période estivale, mais également des températures supérieures à la normale de 0,8 °C (Météo01, site de données météorologiques de l'Ain).

Année	Général		Sol 1		Sol 2		Sol 3		Station A		Station B	
	H	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H	S
1949			-25.5						-8.8			
1950	51.0		58.7		49.6				55.9		51.6	
1951			34.8			33.9			32.7			
1953	45.0		48.3		33.5		56.2		49.3		40.6	
1955			38.3						34.8			23.9
1956		-21.9	-18.8			-27.1	-25.7	-30.1	-13.8			-26.4
1957					-27.0	46.6						54.7
1958	53.9		77.8		71.4				71.0			
1959					-15.1				-21.5			
1961										29.0		
1962		-24.7	-39.8	-32.3	-30.5			-29.5	-43.2	-30.9		-16.0
1963	106.0		103.2		163.3				124.3			
1969			22.8	33.6						34.3		
1970				-19.3						-15.1		-20.0
1973			21.3									
1976	-38.4	-22.9	-46.1		-41.1	-27.6	-27.0	-19.2	-48.3		-30.8	-18.7
1977	79.2	51.0	141.3	65.5	65.7	46.6		42.7	150.5	57.6		38.5
1978							32.4					
1983	-26.1		-25.0	-20.8	-28.5				-26.8		-24.0	
1984			-20.1		-18.3				-23.1			
1985	64.2	42.7	75.1	42.8	77.5	44.7	34.8	40.0	84.7	51.0	53.0	
1986		-26.0	-20.9	-26.1		-26.7		-25.1				-23.3
1987				43.5				33.6		47.9		
1988						33.0			34.8			
1989	-25.1	-17.6	-38.7	-26.7	-25.2			-24.2	-37.4	-24.1		-10.2
1990					30.1							43.5
1992			20.4									-30.5
1993		35.3		45.7		28.9		33.9		43.5		30.9
1998		-28.4		-32.7		-26.5		-26.8		-30.5		-25.6
1999		20.1				15.8		22.7		23.4		19.4
2003	-29.5		-37.3		-33.5			-21.3	-38.4		-24.5	
2004	-30.1		-36.4	-25.5					-36.7			
2005	53.6		52.5		74.2		24.0		56.9		52.0	
2006		-19.0				-29.1		-21.8		-6.0		-22.4
2007	81.5	65.5	139.4	74.8	83.2	62.6		60.4	137.2	78.5	50.5	50.7
2010			-19.7		-23.6				-21.8			

Tableau 6 : Années caractéristiques et écarts relatifs moyens par rapport à l'année précédente (ER1 en %). En gras figurent les années caractéristiques à la fois pour le hêtre et le sapin pectiné.

- 1962 année de sécheresse
- 2006 année de canicule
- 1976 année de sécheresse et canicule
- 1977 année suivant une sécheresse et/ou une canicule

2. Standardisation des séries

Les mesures de largeurs de cernes montrent des situations de peuplement variées entre les placettes. Cette variabilité se retrouve dans l'âge, la largeur de cerne moyenne, l'amplitude des variations interannuelles ou encore l'historique des individus. Certains sapins présentent par exemple des périodes de compression plus ou moins longues, en début ou milieu de vie. Cependant, la variabilité entre les individus au sein d'une même placette reste faible.

Les placettes peuvent être groupées selon le type de peuplement, déduit des séries individuelles (fig. 21) :

- **peuplements âgés**, avec **installation progressive** des individus. Le plus souvent, on observe l'installation de hêtre sous couvert de sapin. Ces peuplements sont regroupés sous le terme général de « régulier » (R) : 8 placettes.

- **peuplements jeunes** et dynamiques, avec **installation simultanée** des individus. Ces peuplements sont regroupés sous le terme général d'« irrégulier » (IR) : 10 placettes.

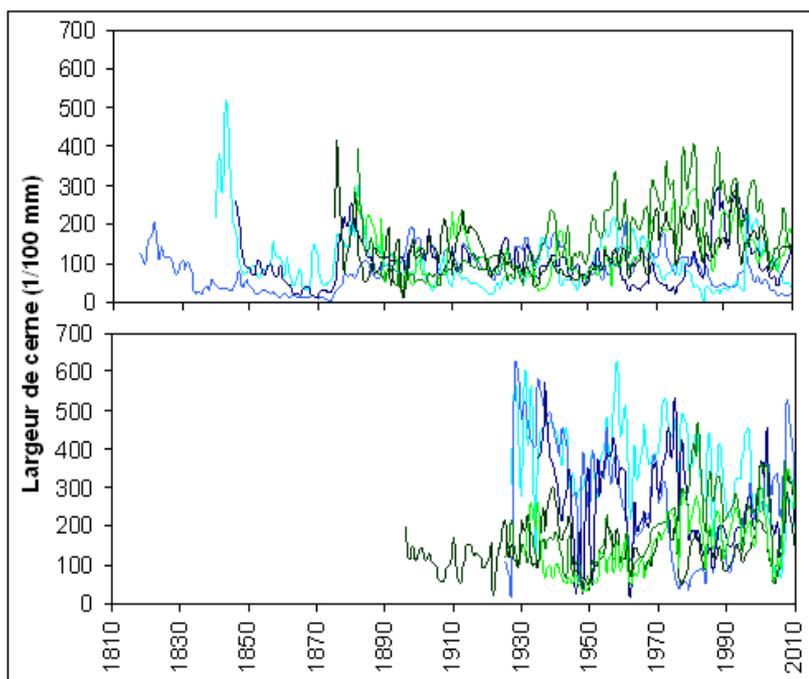


Figure 21 : Séries individuelles d'une placette de type « peuplement âgé » (en haut) et d'une placette de type « peuplement jeune » (en bas)

Cette approche montre que les peuplements âgés ont le plus souvent une croissance plus faible que les peuplements jeunes. L'objectif de la standardisation est donc de s'affranchir de cet effet du peuplement sur la croissance.

2.1. Principe

La standardisation est une méthode statistique de traitement des séries individuelles qui permet d'**isoler le signal haute fréquence** des largeurs de cerne. Ce signal correspond essentiellement à la réponse de l'accroissement aux variations interannuelles du climat, par opposition aux signaux de basse et moyenne fréquence, qui traduisent notamment l'effet de l'âge, du peuplement ou des pratiques sylvicoles sur le long terme (voir Matériel et méthodes – introduction). Le résultat de la standardisation est une chronologie maîtresse* exprimée en indice de croissance*, sans unité.

Les séries présentées en introduction (fig. 21) justifient la nécessité de standardiser les séries, l'effet de

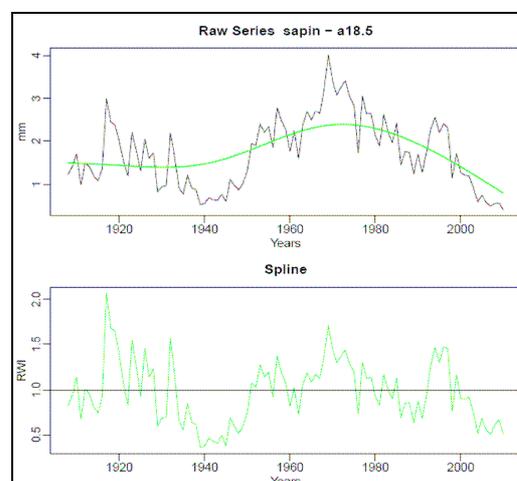


Figure 22 : Exemple de série avant et après standardisation par une spline.

l'âge sur la croissance radiale étant bien marqué.

La méthode choisie est celle de la standardisation simple à l'aide d'une spline (fig. 22). Les indices de croissance obtenus sont le résultat du rapport entre la largeur de cerne et la valeur donnée par la spline.

La **validation de la standardisation** peut passer par l'observation des chronologies obtenues pour chaque type de peuplement décrit plus haut (fig. 23). Celles-ci montrent que sur la période récente, les comportements sont plus différents entre le hêtre et le sapin (ce que nous cherchons à étudier) qu'entre peuplement régulier et peuplement irrégulier pour une même essence. Nous pouvons donc considérer qu'il n'y a plus d'effet du peuplement sur la réponse du hêtre et du sapin.

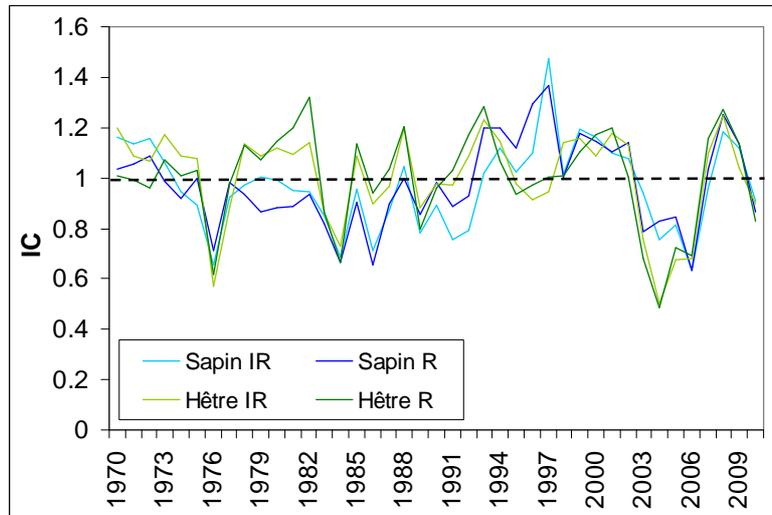


Figure 23 : Chronologies maîtresses du sapin et du hêtre en fonction du type de peuplement. IC : indice de croissance

2.2. Comparaison des essences

Les chronologies sont ici distinguées par groupe de sol (fig. 24), et non comme précédemment par essence, afin de mieux comparer le hêtre et le sapin dans chacune des situations. La comparaison des différents types de sol et station a été faite sur les chronologies brutes (voir partie Résultats §1.1.2 et §1.1.3), pour lesquelles le signal de basse fréquence (dans lequel est compris l'effet sol et station) est conservé.

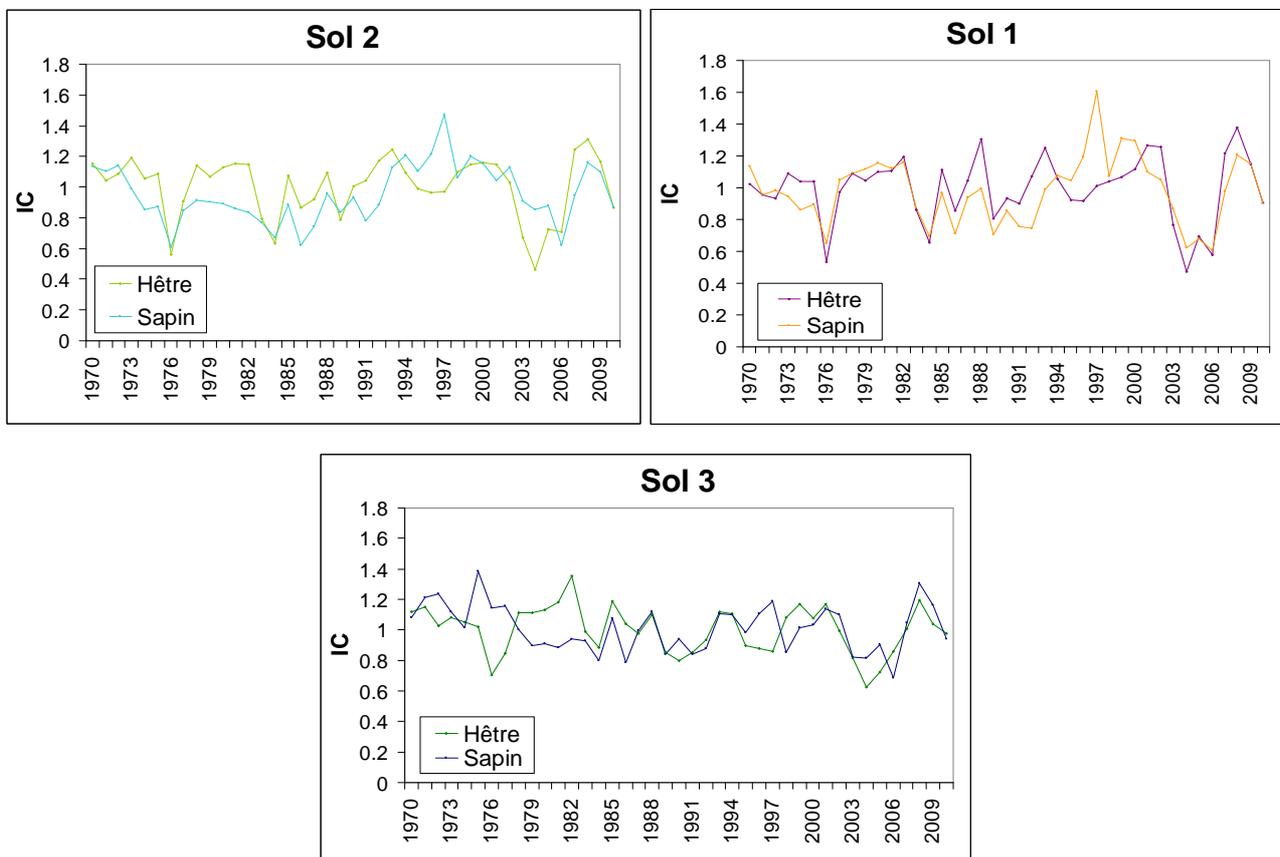


Figure 24 : Chronologies maîtresses du sapin et du hêtre

Les chronologies maîtresses viennent confirmer l'hypothèse selon laquelle **les réactions en croissance du sapin et du hêtre face au climat sont relativement proches**, en particulier face aux années de sécheresse et sur sol superficiel. Seules les années 1996 à 1998 présentent un écart important en termes de variation de la croissance. Sur sol moyen à profond, comme sur station fraîche, les chronologies maîtresses des deux essences sont moins proches, et se dissocient notamment sur la période 2003-2006, qui semble moins impactante pour le sapin. En 2006, année qui, d'après l'analyse des chronologies moyennes brutes (voir partie Résultats §1.1.1), paraissait très défavorable au sapin, l'indice de croissance de celui-ci se retrouve au même niveau que celui du hêtre.

La validation statistique de ces observations peut également se faire au travers des corrélations entre les indices de croissance du hêtre et ceux du sapin. Les résultats montrent que seule la corrélation entre les écarts relatifs de croissance est significative. Son coefficient de corrélation est de 0,24. **Les variations interannuelles de la croissance du hêtre et du sapin vont donc dans le même sens.**



Réfutation de l'hypothèse 2 :

Les comportements proches du sapin et du hêtre sur les sols les plus superficiels ne permettent pas d'affirmer que le hêtre est une bonne alternative au sapin.

2.3. Paramètres dendrochronologiques sur séries standardisées

Trois paramètres statistiques sont classiquement utilisés en dendrochronologie, qui permettent d'appréhender le mode de réponse des individus au climat. Les formules de calcul ainsi que les graphiques synthétisant les valeurs obtenues figurent en annexe 9.

- Sensibilité moyenne individuelle ($0 < SM < 2$)

Elle permet de quantifier la réponse de chaque arbre aux fluctuations climatiques interannuelles. Elle vaut 0 lorsque deux cernes successifs sont égaux, et 2 lorsque la largeur de l'un des deux cernes est nulle. Les valeurs obtenues, comprises entre 0,25 et 0,3 pour le hêtre, et 0,23 et 0,28 pour le sapin, sont proches de celles présentes dans la littérature. Elles montrent que les deux essences répondent assez fortement aux variations interannuelles du climat. La sensibilité moyenne du hêtre est dans toutes les situations supérieure à celle du sapin. Cette observation soutient encore l'hypothèse selon laquelle le hêtre répond plus fortement aux variations interannuelles du climat que le sapin. Enfin, notons que les sensibilités moyennes sont plus faibles sur sol profond, et pour le hêtre plus fortes sur les stations fraîches.

- Coefficient d'interdatation ($0 < SR < 1$)

Il traduit la synchronisation des séries élémentaires, et rend compte de l'homogénéité de la réponse au climat au sein d'un peuplement. Les valeurs obtenues, en moyenne de 0.69 pour le hêtre et 0.62 pour le sapin, montrent une bonne homogénéité des peuplements dans la réponse au climat, en particulier sur sol profond.

- Coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 (AC1)

Il met en évidence l'impact de la largeur d'un cerne sur celle de l'année suivante. Les coefficients d'autocorrélation obtenus sont plus élevés pour le sapin, dont la croissance est marquée par des arrière-effets. Le hêtre présente quant à lui quelques arrière-effets sur sol profond.

De plus, les tests statistiques montrent (fig. 25) qu'il existe, chez le hêtre comme chez le sapin, une corrélation positive significative entre le cerne de l'année $n-1$ et celui de l'année n . Ainsi, plus la croissance moyenne d'une année n est forte, plus la croissance moyenne de l'année $n+1$ sera forte. De même, il existe une corrélation négative entre indice de croissance de 2002 et écart relatif de 2003, plus forte chez le hêtre, à l'exception des situations de sol profond. Ainsi, plus la croissance de 2002 a été forte, plus la perte de croissance relative en 2003 a également été importante. Les corrélations sont moins marquées dans le cas des sécheresses de 1976 et 1989.

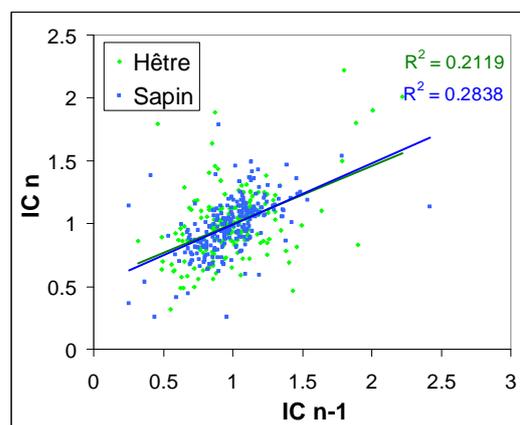


Figure 25 : Régression linéaire entre l'indice de croissance d'une année n et celui de l'année $n-1$

3. Corrélations avec les facteurs climatiques

L'objectif est ici de cerner les paramètres climatiques les plus déterminants dans la formation du cerne de l'année. Les corrélations sont établies à partir des données météo de la station d'Ambérieu-en-Bugey. Trois types de variables sont étudiées :

- les **indices de croissance** des chronologies maîtresses de chacune des essences (IC),
- les **écarts relatifs de croissance** par rapport à la croissance moyenne des 10 années précédentes (ER10 calculé en indice de croissance),
- le **rapport entre les ER10** des deux essences (qER10 calculé en indice de croissance).

3.1. Corrélations simples

Le jeu de données présenté ci-dessus permet de calculer les coefficients de corrélation de Spearman pour chacun des couples (variable de croissance ; paramètre climatique). Ces coefficients présentent l'avantage de mettre en évidence des corrélations qui ne sont pas nécessairement linéaires.

Le tableau qui suit (tab. 7) donne pour chaque variable étudiée les paramètres climatiques avec lesquels la corrélation est significative, ainsi que le coefficient de la corrélation. Les variables climatiques sont codées tempN, precN ou BhcN, avec N le numéro du mois de l'année. La présence d'un point signifie que la variable est considérée pour l'année précédant la mise en place du cerne. Seules les variables dont le test donne une probabilité critique inférieure à 0,01 figurent dans ce tableau. L'ensemble des résultats des corrélations est donné en annexe 10.

	Général		Sol 1		Sol 2		Sol 3		Station A		Station B	
IC Hêtre	prec6	0.42	prec6	0.38	prec6	0.42	prec6	0.32	prec6	0.36	prec6	0.38
	prec7	0.48	prec7	0.58	prec7	0.46	prec7	0.32	prec7	0.57	prec7	0.40
	temp7	-0.34	temp7	-0.41	temp7	-0.34			temp7	-0.39		
ER Hêtre	prec6	0.44	prec6	0.41	prec6	0.45	prec6	0.35	prec6	0.44	prec6	0.40
	prec7	0.44	prec7	0.52	prec7	0.39	temp7.	-0.34	prec7	0.50	prec7	0.40
	temp7	-0.35	temp7	-0.42					temp7	-0.37		
IC Sapin			temp7.	-0.40					temp7.	-0.35		
			temp8.	-0.44					temp2	0.34		
			temp9.	-0.34								
ER Sapin	prec6	0.32	temp7.	-0.32								
			temp8.	-0.35								
			temp9.	-0.33								
qER	prec7	0.34	prec7	0.35	prec7	0.35			prec7	0.38		

Tableau 7 : Bilan des facteurs climatiques corrélés aux variables de croissance du sapin et du hêtre

Cette première analyse fait apparaître une corrélation positive entre les **précipitations des mois de juin et juillet** et l'indice de croissance du **hêtre**. Les **températures de juillet** ont au contraire un effet négatif sur cet indice. La croissance radiale du hêtre est donc défavorisée par un été chaud et sec (fig. 26). Les facteurs climatiques corrélés avec une reprise de croissance du hêtre sont identiques.

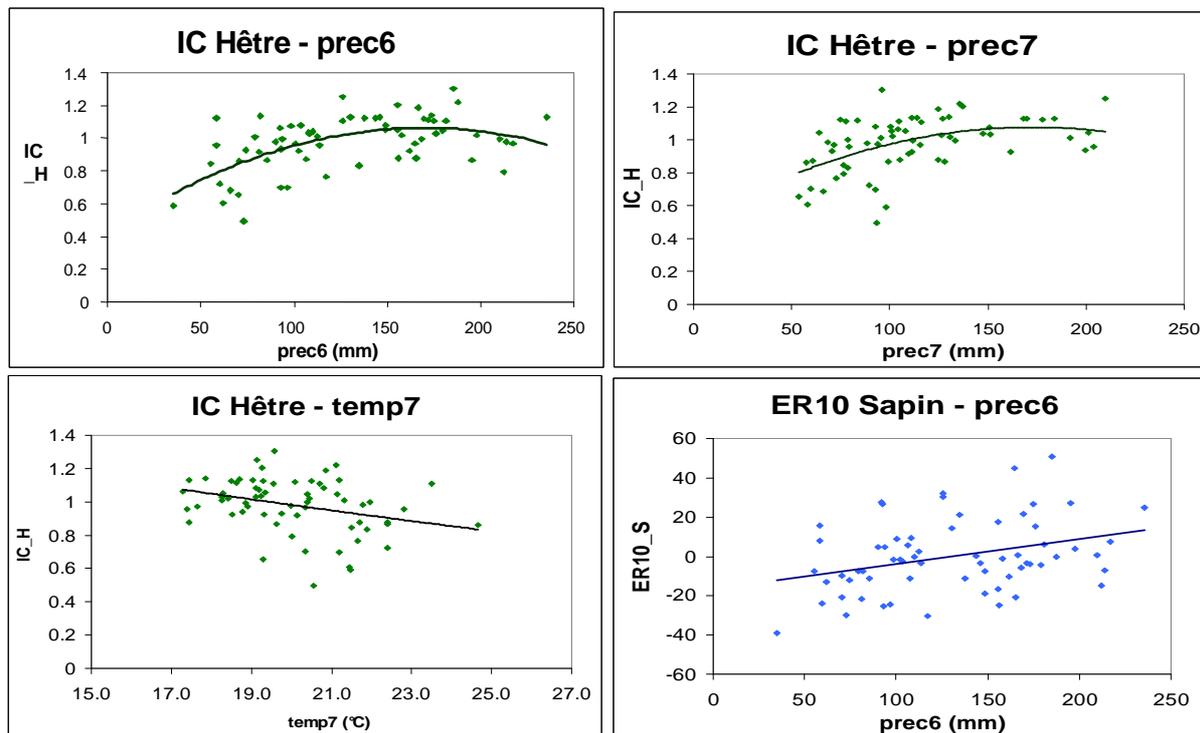


Figure 26 : Corrélations significatives entre l'indice de croissance du hêtre ou du sapin et les paramètres climatiques

Contrairement au hêtre, l'indice de croissance du **sapin** ne montre dans le cas général **aucune corrélation forte** avec les facteurs climatiques. Ce résultat se retrouve sur station fraîche ainsi que sur sol moyen et profond, situations pour lesquelles la croissance du sapin semble donc indépendante des conditions climatiques. Dans ces conditions, le sapin serait alors moins sujet à une perte de croissance en cas de sécheresse. Au contraire, sur **sol superficiel et station sèche**, l'analyse fait ressortir de manière forte le rôle des **températures de l'été précédent** dans la formation du cerne : plus l'été passé a été chaud, et plus le cerne de l'année sera fin. Enfin, une pluviométrie élevée au mois de juin favorise une reprise de la croissance, mesurée par l'ER10.

Par ailleurs, le **rapport entre les écarts relatifs de croissance** du hêtre et du sapin (qER10) est corrélé positivement aux **précipitations du mois de juillet**. De fortes précipitations ce mois-ci conduiront donc à une reprise de la croissance plus forte pour le hêtre que pour le sapin. L'approche stationnelle nous permet de préciser que l'influence de ce paramètre n'est marquée que sur station sèche.

Réfutation de l'hypothèse 2 :



La sensibilité du hêtre aux précipitations des mois de juin et juillet, et donc aux sécheresses estivales, n'en fait pas une bonne alternative au sapin.

Validation de l'hypothèse 1 :



Le sapin présente une plus forte sensibilité au climat sur sol superficiel.

3.2. Fonctions de corrélation

3.2.1. Principe

Les fonctions de corrélation* sont établies sous le logiciel R à partir de la macro « DENDRO » (Mérian, 2010). Elles permettent de considérer simultanément un ensemble de paramètres climatiques, en s'affranchissant des éventuelles corrélations qui peuvent exister entre ces paramètres. Le nombre de paramètres climatiques pris en compte est limité par la durée de la période d'étude. Les données climatiques issues de la station météo d'Ambérieu-en-Bugey étant disponibles sur une période de 65 ans (1941-2005), 32 paramètres climatiques, ont pu être utilisés simultanément. Il s'agit des précipitations et températures du mois de juillet de l'année précédente au mois d'octobre de l'année en cours. En parallèle, un deuxième jeu de fonctions de corrélation a été établi à partir des bilans hydriques climatiques des mois de juillet de l'année précédente au mois d'octobre de l'année.

3.2.2. Résultats

Les graphiques suivants (fig. 27 et 28) donnent pour chaque mois considéré la valeur du coefficient de régression obtenu ainsi que l'intervalle de confiance du test de corrélation à 95 %.

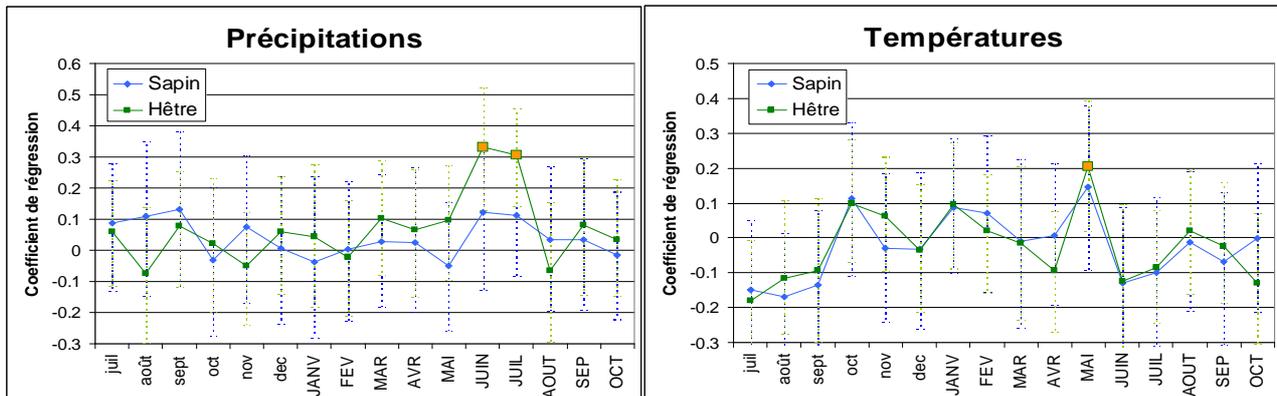


Figure 27 : Fonctions de corrélation établies pour les indices de croissance du sapin et du hêtre. Les points oranges correspondent à un test de corrélation positif. juil : mois de l'année précédente ; JUIL : mois de l'année en cours

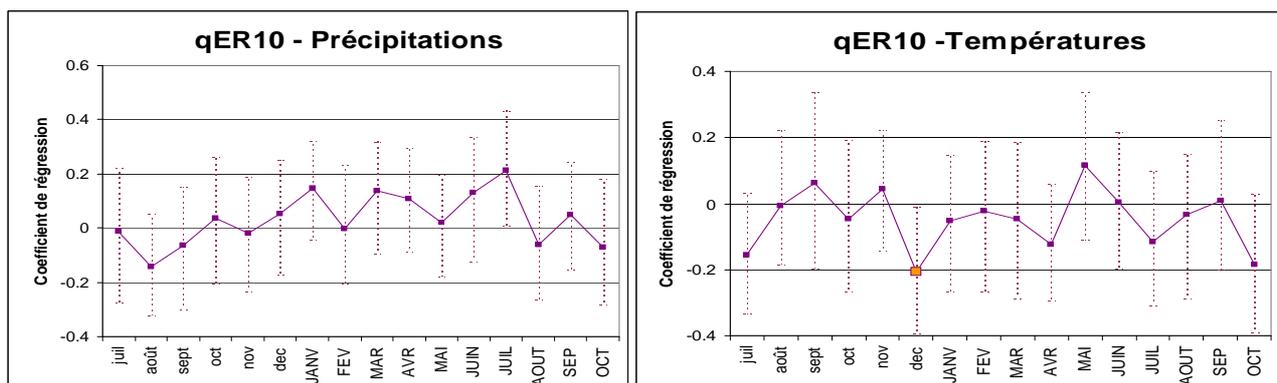


Figure 28 : Fonction de corrélation établie pour le rapport entre les écarts relatifs de croissance du hêtre et du sapin. Les points oranges correspondent à un test de corrélation positif. juil : mois de l'année précédente ; JUIL : mois de l'année en cours

Les fonctions de corrélation confirment le rôle des précipitations estivales dans la mise en place du cerne du hêtre. Les températures du mois de juillet, qui ressortaient dans les corrélations simples, ne sont ici plus explicatives. En revanche des températures du mois de mai élevées favorisent la croissance du hêtre. Concernant le sapin, aucun paramètre climatique n'est corrélé significativement à l'indice de croissance moyen.

Enfin, la fonction de corrélation établie pour la variable qER10 (fig. 28) montre que les températures du mois de décembre sont le paramètre climatique principal pour différencier le comportement des deux essences. Ainsi, plus ces températures sont élevées, plus la reprise de croissance du sapin est forte vis-à-vis de celle du hêtre.

L'ensemble des résultats des fonctions de corrélation, par situation de sol et de station, est présenté dans le tableau 8. Pour chaque variable sont donnés les paramètres climatiques pour lesquels le test de corrélation est significatif à 95 %.

	Général	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Station A	Station B
IC Hêtre	prec6 ++ prec7 ++ temp5 +	prec6 ++ prec7 ++	prec6 ++ prec7 + temp5 +	prec6 ++ prec7 + temp7. -	prec6 ++ prec7 ++ temp5 +	prec6 ++ prec7 + temp5 +
IC Sapin		temp8. - temp9. -			temp8. - temp9. -	
ER Hêtre	prec6 ++ prec7 +	prec6 ++ prec7 +	prec6 ++ prec7 + temp5 +	prec6 + prec7 + temp7. -	prec6 ++ prec7 +	prec6 + prec7 + temp5 +
ER Sapin		temp8. -	prec6 +			
qER	temp12. -	prec6 +	temp12. -	prec1 + temp10 -	prec7 +	temp12. -

Tableau 8 : Bilan des facteurs climatiques intervenant dans les fonctions de corrélation. + : coefficient de corrélation > 0,2 ; ++ : coefficient de corrélation > 0,3 ; +++ : coefficient de corrélation > 0,4 ; - : corrélation négative

Les résultats des fonctions de corrélation sont très proches de ceux obtenus par corrélation simple. Deux périodes semblent déterminantes pour différencier la réaction des deux essences (qER10) :

- sur sol moyen à profond et station fraîche, la fin de l'automne et l'hiver précédents jouent un rôle important. Pendant cette période, des températures élevées et des précipitations faibles vont favoriser la croissance du sapin vis-à-vis de celle du hêtre.

- sur sol superficiel et station sèche, l'été est la saison la plus discriminante. Des précipitations importantes y favorisent la croissance du hêtre vis-à-vis de celle du sapin.



Les conclusions par rapport aux hypothèses sont identiques à celles du paragraphe précédent.

3.3. Apport du bilan hydrique climatique

Le bilan hydrique climatique (Bhc) permet de synthétiser en une seule variable les données de précipitation et de température. Il peut donc être intéressant d'observer les corrélations entre le bilan hydrique climatique et les indices de croissance, à la fois pour mieux comprendre la réponse des arbres au climat, mais aussi pour obtenir un outil de gestion plus pertinent.

3.3.1. Fonctions de corrélation

En cohérence avec le rôle des précipitations estivales dans la formation des cernes du hêtre, les bilans hydriques climatiques des mois de juin et juillet montrent une forte corrélation avec les indices de croissance du hêtre, et ce quelle que soit la situation stationnelle (tab. 9). Les indices de croissance du sapin sont quant à eux expliqués par le bilan hydrique du mois de juillet de l'année précédente, sur sol superficiel et station sèche. Sur ces mêmes stations, un bilan hydrique climatique de juin élevé favorise une reprise de croissance.

	Général	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Station A	Station B
IC Hêtre	bhc6 +++	bhc6 +++	bhc6 +++	bhc6 ++	bhc6 +++	bhc6 ++
	bhc7 ++	bhc7 +++	bhc7 ++		bhc7 ++	bhc7 ++
IC Sapin		bhc7. +			bhc7. +	
ER Hêtre	bhc6 +++	bhc6 +++	bhc6 +++	bhc6 ++	bhc6 +++	bhc6 ++
	bhc7 ++	bhc7 ++	bhc7 ++		bhc7 ++	bhc7 ++
ER Sapin	bhc6 +	bhc6 +	bhc6 +		bhc6 +	
qER				bhc1 +	bhc7 +	bhc3 +

Tableau 9 : Bilan des bilans hydriques climatiques intervenant dans les fonctions de corrélation

L'observation des corrélations simples entre indices de croissance du hêtre et bilan hydrique climatique moyen de juin et juillet montre un fléchissement de la réponse pour les bilans hydriques les plus faibles⁵ (fig. 29).

Le seuil observé est proche de - 15 mm sur station sèche et sur sols superficiel à moyen, et proche de - 25 mm sur station fraîche. Il peut s'expliquer physiologiquement par le début de la régulation stomatique*. En effet, d'après Granier *et al.* (1995), celle-ci intervient en moyenne lorsque la réserve hydrique du sol atteint 40 % de la RUM, et ce quelle que soit la surface foliaire*. Une telle observation est importante car elle permet de définir des zones de sensibilité du hêtre au changement climatique, qui pourront être utilisées pour la gestion. Dans le cas du sapin, aucun fléchissement dans la réponse au bilan hydrique climatique de juillet de l'année précédente n'a pu être observé.

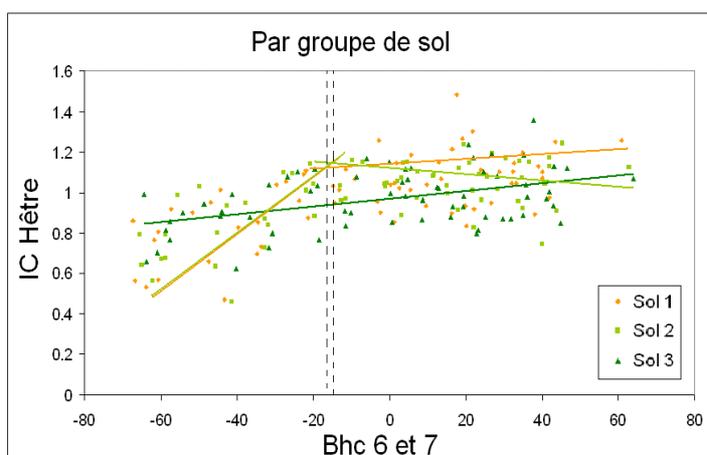


Figure 29 : Réponses de l'indice de croissance du hêtre au bilan hydrique climatique moyen des mois de juin et juillet

3.3.2. Définition de zones de sensibilité au changement climatique

Comme vu précédemment, le changement climatique tend à une diminution du bilan hydrique, en particulier pendant la période estivale. Les résultats obtenus ci-dessus peuvent alors être interprétés selon cette prévision : là où le bilan hydrique climatique est inférieur au seuil, le changement climatique conduira à une réduction de la croissance ; ailleurs, la croissance pourra se maintenir⁶. Le modèle linéaire simple étant privilégié sur sol profond, on considèrera que sur ces sols, l'évolution climatique ne sera pas défavorable, et ce quel que soit le bilan hydrique climatique actuel.

Trois situations se dégagent (fig. 30) :

Bhc 6 et 7 < - 25 mm : évolution climatique défavorable

- 25 mm < Bhc 6 et 7 < - 15 mm : évolution climatique défavorable uniquement sur stations sèches et sols superficiels à moyens

Bhc 6 et 7 > - 15 mm : évolution climatique non défavorable

⁵ Le modèle linéaire segmenté a été validé dans toutes les situations à l'aide du test de Davis, à l'exception des sols profonds pour lesquels le modèle linéaire simple a été retenu. Les résultats de ce test se trouvent en annexe 10.

⁶ Les prévisions ainsi obtenues ne sont valables que sous l'hypothèse que la réponse du hêtre au climat ne soit pas elle-même affectée par le changement climatique.

Attention : la carte présentée est bien à interpréter en termes de diminution de la croissance radiale et non en termes de dépérissement. Rien ne laisse penser que les zones décrites ici comme sensibles pour le hêtre seront à terme des zones défavorables à la présence du hêtre.

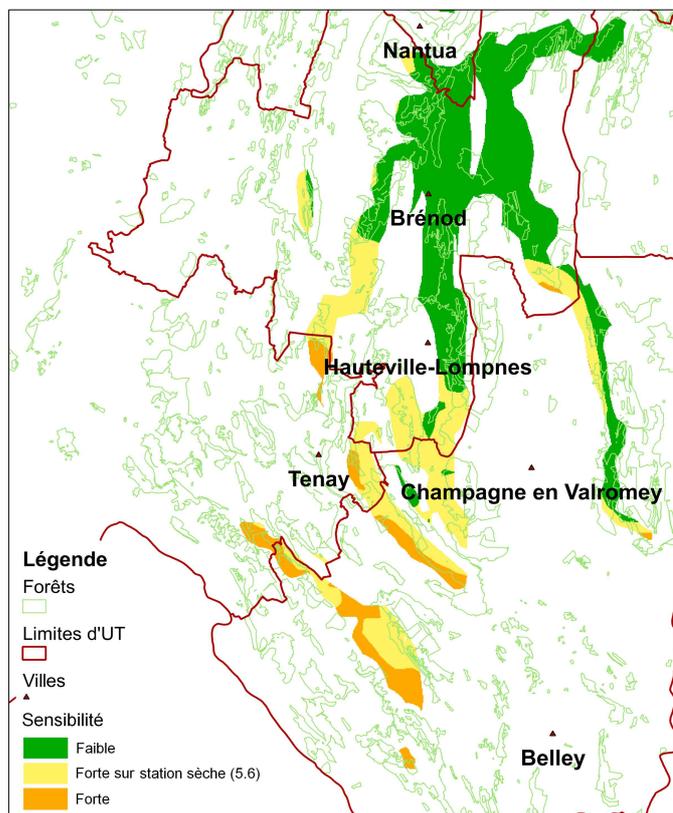


Figure 30 : Carte de sensibilité du hêtre à la diminution du bilan hydrique climatique estival. D'après le bilan hydrique climatique moyen des mois de juin et juillet calculé sur la période 1996-2007 par le Lerfob

4. Analyse autour des années de sécheresse

Les années de sécheresses estivales étudiées sont 1976, 1989 et 2003.

4.1. Effet des sécheresses sur la croissance

Dans cette partie, l'objectif est de tester les deux hypothèses issues de la **bibliographie** :



Hypothèse 3 :

Les cernes des années 1976, 1989 et 2003 sont plus fins que la moyenne, aussi bien pour le hêtre que pour le sapin.



Hypothèse 4 :

La perte de croissance radiale en année sèche est plus forte chez le sapin que chez le hêtre.

De plus, les **fonctions de corrélation** obtenues en 3.2.2 sont confrontées aux données climatiques des années 1976, 1989 et 2003 (fig. 31), ce qui permet d'émettre d'autres hypothèses :



Hypothèse 5 :

Le hêtre a accusé une perte de croissance importante lors des sécheresses de 1976, 1989 et 2003, en particulier sur sol superficiel. En effet, tous les paramètres climatiques déterminants pour la croissance du hêtre sont ces années-là défavorables.



Hypothèse 6 :

La croissance du sapin n'a pas été affectée par les sécheresses de 1976, 1989 et 2003. En effet, les températures de l'automne précédent sont pour ces trois années proches des normales.

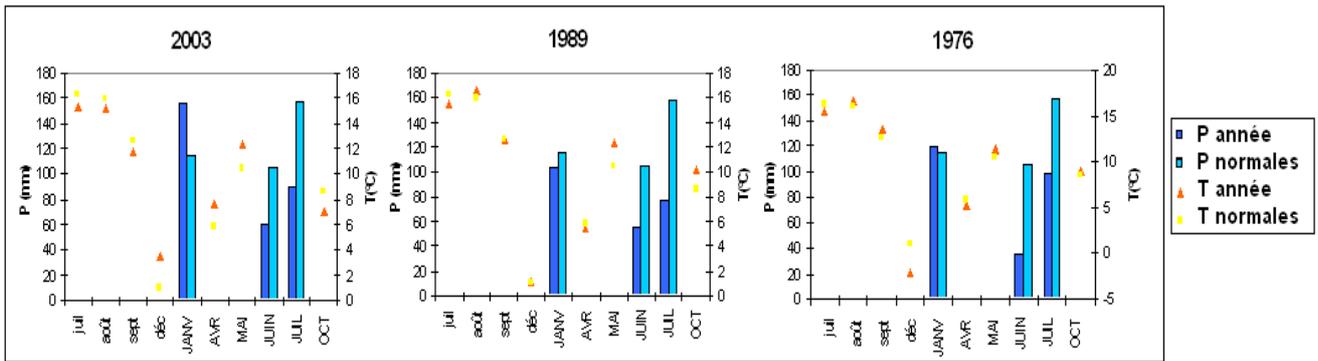


Figure 31 : Paramètres climatiques des années de sécheresse intervenant dans les fonctions de corrélation. Météo-France

L'impact des sécheresses est étudié au travers de trois types de variables :

- Les **écarts relatifs de croissance (%) : ER5 et ER10**. Ces variables correspondent à la perte de croissance accusée l'année de sécheresse par rapport à un référence calculée sur 5 ou 10 ans. Dans le cas de la sécheresse de 1989, l'ER5 est remplacé par un écart relatif ER4 calculé en référence à la période 1985-1988, afin d'éviter l'influence de la sécheresse des années 1983-1984. L'analyse des écarts relatifs de croissance par rapport à une période de référence sur les années suivant la sécheresse permet de visualiser la récupération progressive de la croissance. L'effet de la sécheresse est alors confondu avec les effets potentiels du climat des années qui suivent.

- La **proportion d'arbres n'ayant pas retrouvé leur croissance initiale (%) : Prop NR**. La croissance initiale est ici définie comme la croissance moyenne des 5 années précédant la sécheresse (4 pour 1989). On considère qu'un individu n'a pas retrouvé sa croissance initiale s'il ne l'atteint pas dans les 8 années suivant la sécheresse (7 pour 2003), période maximale pour laquelle un nouvel aléa climatique ne vient pas perturber la croissance.

- Le **temps moyen de récupération (années) : Tps**. Il correspond au nombre d'années nécessaires à l'arbre pour retrouver sa croissance initiale. Les moyennes sont calculées uniquement sur la proportion définie ci-dessus.

La description des tests statistiques permettant de valider les observations ainsi que leurs résultats sont présentés en annexe 11. Les graphiques représentant la reprise de croissance par groupe de sol ou par groupe stationnel se trouvent en annexe 12.

4.1.1. Impact de l'année 2003

- Perte de croissance

L'analyse des écarts relatifs de croissance (fig. 32) montre que dans toutes les situations, le hêtre comme le sapin ont connu une perte de croissance significative en 2003. De plus, le hêtre apparaît comme l'essence la plus touchée avec en moyenne 14,5 % de perte de croissance en plus du sapin.

Cette différence est plus marquée en situation de sol moyen, et similaire sur station sèche ou fraîche. Notons enfin que la différence entre les pertes de croissance s'atténue lorsque l'on compare la croissance de 2003 à la croissance moyenne des 10 années précédentes.

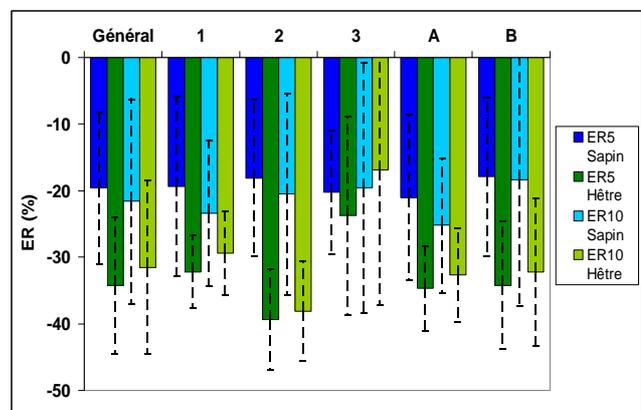


Figure 32 : Écarts relatifs de croissance en 2003

- **Reprise de croissance**

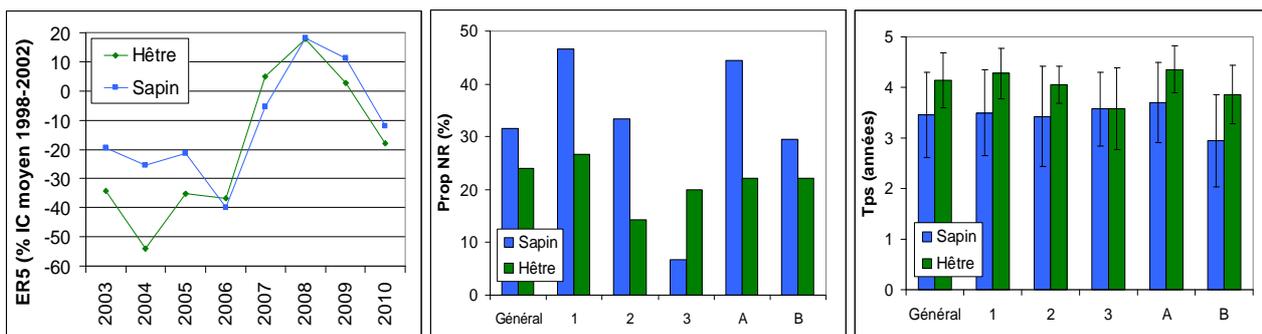


Figure 33 : Reprise de croissance après la sécheresse de 2003

La cinétique de reprise de la croissance semble proche pour les deux essences (fig. 33) : suite à 2003, le hêtre comme le sapin n'ont retrouvé leur croissance initiale qu'en 2007. Cette observation est à mettre en relation avec les conditions climatiques défavorables des années 2003 à 2006.

Par ailleurs, le sapin semble avoir été marqué de manière plus durable par la sécheresse. En effet, la proportion d'arbres qui ne retrouvent pas leur croissance initiale paraît supérieure à celle du hêtre. Les situations de sol profond font exception, avec un impact très faible sur le sapin. Ces observations ne sont cependant pas validées par les tests statistiques. Enfin, un temps significativement plus long (en moyenne 0,8 année de plus) a été nécessaire au hêtre pour retrouver sa croissance initiale.

- **Impact des années 2003 à 2006**

Étant donné les conditions climatiques des années qui ont suivi 2003 et du retard que peut avoir le sapin dans sa réaction aux aléas, il peut être intéressant d'observer la perte de croissance moyenne accusée sur la période 2003-2006. Là encore, l'impact des conditions climatiques sur la croissance a été plus fort chez le hêtre. Cependant, les situations qui ont pénalisé le plus fortement cette essence (ou qui ont été plus favorables au sapin) correspondent majoritairement aux stations fraîches.

4.1.2. Impact de l'année 1989

- **Perte de croissance**

En 1989, les pertes de croissance observées sont beaucoup moins importantes que lors des sécheresses de 1976 et 2003, en particulier pour le sapin, sur stations fraîches et sols moyens (fig. 34). De ce fait, le hêtre apparaît dans les tests comme l'essence la plus touchée, avec en moyenne une perte de croissance supérieure de 12 % à celle du sapin.

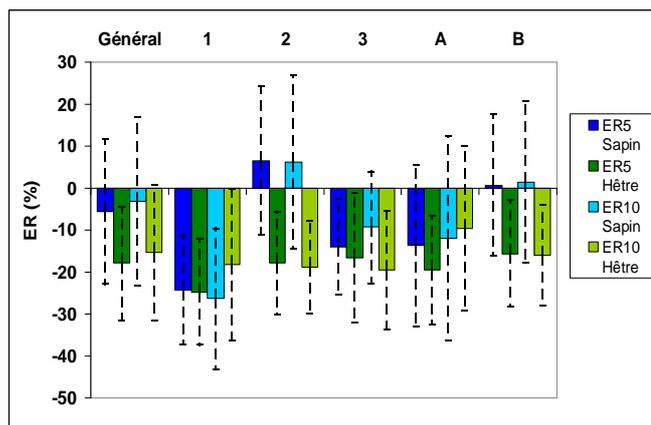


Figure 34 : Écarts relatifs de croissance en 1989

- **Reprise de croissance**

Suite à 1989, la reprise de croissance a été très rapide (fig. 35), d'autant plus pour le sapin dont la perte de croissance avait été très faible. La proportion d'arbres n'ayant pas retrouvé leur croissance initiale est très faible pour les deux essences, et les temps de récupération sont similaires (entre 2 et 4 ans selon les situations).

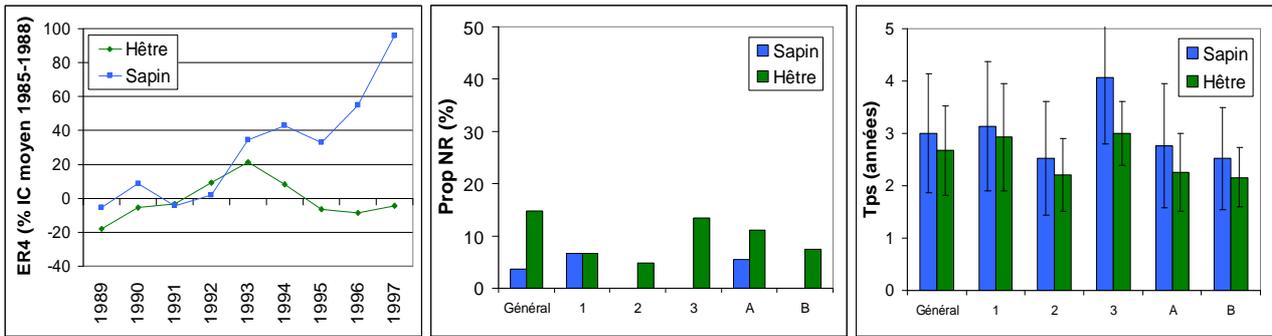


Figure 35 : Reprise de croissance après la sécheresse de 1989

La sécheresse de 1989 ne semble donc pas avoir été très impactante pour la croissance du hêtre et du sapin. Deux explications peuvent être évoquées : les conditions climatiques défavorables des années 1983 et 1984, qui ont conduit à une réduction de la croissance peu de temps avant la sécheresse de 1989, et l'absence de canicule.

4.1.3. Impact de l'année 1976

- Perte de croissance

L'année 1976 est marquée par une perte de croissance généralisée chez le sapin et le hêtre (fig. 36). De même qu'en 2003, cette perte est plus importante chez le hêtre, principalement sur sols moyens à superficiels et sur stations sèches. Dans cette dernière situation, l'écart entre les deux essences atteint 27 %

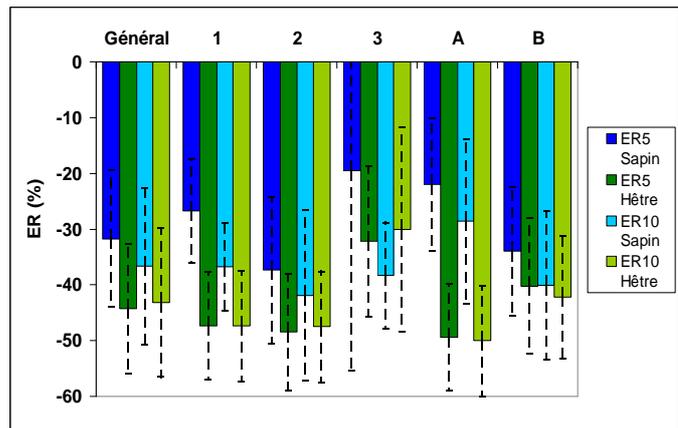


Figure 36 : Écarts relatifs de croissance en 1976

- Reprise de croissance

Suite à 1976, la reprise de croissance est nettement plus rapide qu'en 2003 (fig. 37). Le hêtre comme le sapin retrouvent le plus souvent leur croissance initiale dès 1978. Le niveau de croissance stagne ensuite jusque dans les années 1983 et 1984, deux nouvelles années de sécheresse. Comme en 2003, une proportion plus grande de sapins ne retrouve pas sa croissance initiale dans les 8 années qui suivent la sécheresse. Cette observation est ici validée par les tests statistiques. Aucune différence n'apparaît dans les temps de reprise de la croissance.

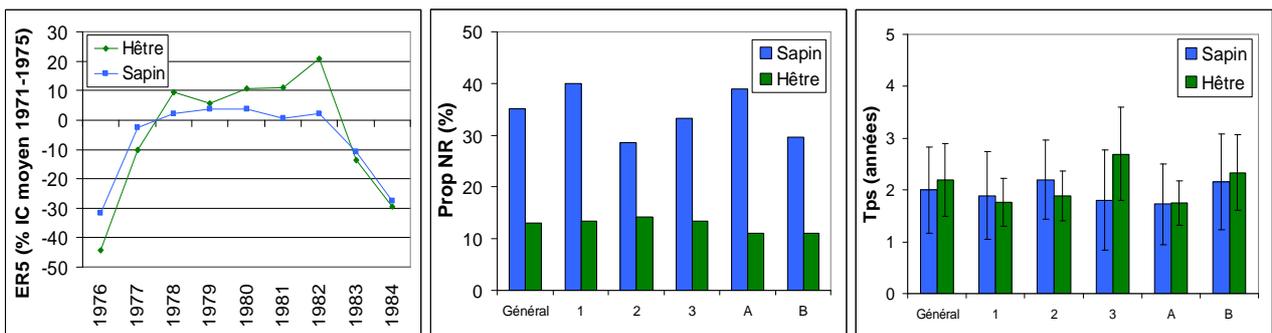


Figure 37 : Reprise de croissance après la sécheresse de 1976

4.1.4. Bilan

Les résultats varient en fonction de l'année de sécheresse considérée.

Vis-à-vis des sécheresses de 1976 et 2003, nous pouvons apporter les réponses suivantes :

Validation des hypothèses 3 et 5 et réfutation de l'hypothèse 6 pour 1976 et 2003 :
Le hêtre et le sapin ont tout deux accusé des pertes de croissance importantes, en cohérence avec la bibliographie, mais en contradiction avec les fonctions de corrélation établies pour le sapin.

Les résultats liés à la sécheresse de 1989 sont opposés :

Réfutation des hypothèses 3 et 5 et validation de l'hypothèse 6 pour 1989 :
Le sapin n'a été que peu affecté par la sécheresse de 1989, en accord avec les fonctions de corrélation établies, mais en contradiction avec la bibliographie.

Cependant, dans tous les cas, la comparaison des essences montre des résultats similaires :

Réfutation de l'hypothèse 4 pour 1876, 1989 et 2003 :
Contrairement à ce que laissait supposer la bibliographie, mais en accord avec les fonctions de corrélation, la perte de croissance a été plus importante chez le hêtre que chez le sapin.

4.2. Étude du dépérissement

L'étude du dépérissement est réalisée à partir des mesures de **branches mortes** dans le houppier fonctionnel. Les séries sont considérées avant standardisation. En effet, la conservation des signaux de moyenne et basse fréquence est importante, car le dépérissement est un phénomène qui s'exprime sur le long terme, de manière progressive. Ainsi, l'analyse des corrélations entre proportion de branches mortes (mesurée en 2011) et perte de croissance en 2003 peut permettre de faire le lien entre croissance et dépérissement.

L'observation des chronologies moyennes de sapin sain, porteur de 1 à 5 % de branches mortes, ou porteur de plus de 5 % de branches mortes⁷ apporte les premiers éléments de réponse (fig. 38). Ainsi, à partir de 1983 (année de sécheresse), les séries se hiérarchisent, avec une croissance plus forte des arbres sains et plus faible des arbres présentant plus de 5 % de branches mortes. Suite à la sécheresse des années 2003 à 2005, les sapins présentant plus de 5 % de branches mortes ne parviennent pas à retrouver leur croissance initiale. Parmi ces individus, certains connaissent une croissance très faible depuis de

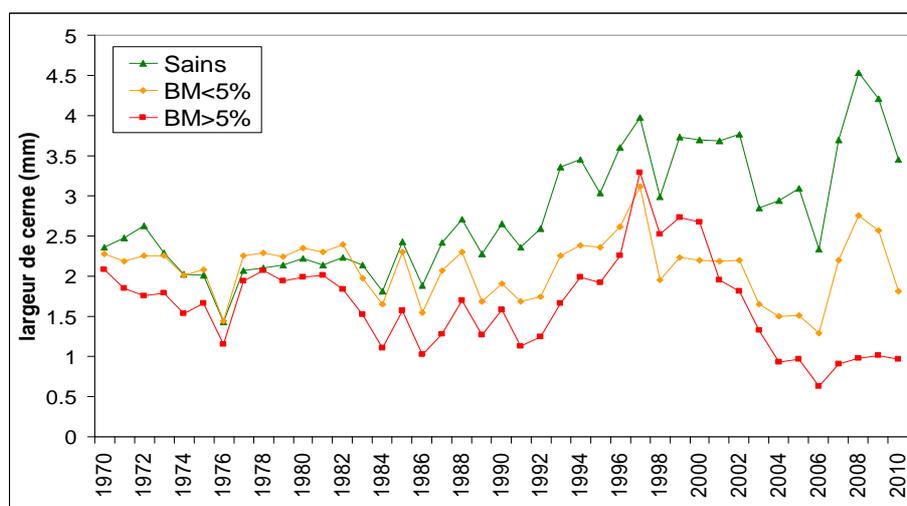


Figure 38 : Chronologies moyennes des sapins sains et porteurs de branches mortes. BM : branches mortes

⁷ Aucun arbre échantillonné ne présente plus de 25 % de branches mortes.

nombreuses années, tandis que d'autres ont connu une croissance forte à très forte jusque dans le début des années 2000. Mais depuis 2003, seul un individu connaît un accroissement supérieur à 2 mm/an.

Concernant le hêtre, les écarts de croissance entre les trois classes de branches mortes restent faibles, et les accroissements sont même identiques depuis 2002 pour les arbres présentant ou ne présentant pas de branches mortes.

Par ailleurs, les arbres présentant des branches mortes ne sont pas répartis uniformément entre les différents groupes stationnels. En effet, la plus grande part des sapins dépérissants se trouve sur sol superficiel et stations sèches, tandis que le hêtre dépérissant se trouve préférentiellement sur sol moyen à profond et stations fraîches (fig. 39). Cette observation tendrait à montrer que les arbres (sapins ou hêtres) dont la perte de croissance a été la plus forte en 2003 sont également ceux qui dépérissent le plus aujourd'hui.

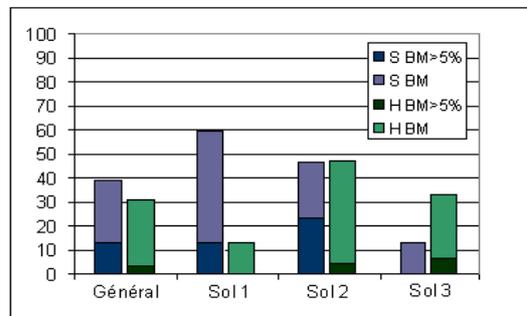


Figure 39 : répartition des arbres porteurs de branches mortes (en proportion du nombre total d'arbres présentant des branches mortes). BM : branches mortes

Afin de le vérifier, nous pouvons comparer les pertes de croissance moyennes de chaque classe de branches mortes (fig. 40). Les tests statistiques montrent que la perte de croissance moyenne du groupe de sapins ayant plus de 5 % de branches mortes est significativement supérieure à celle des deux autres groupes.

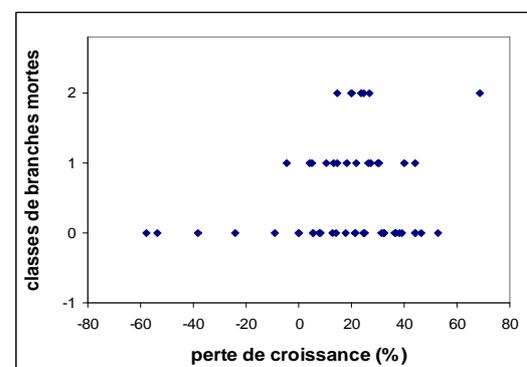


Figure 40 : Branches mortes observées sur sapin en 2011 en fonction de la perte de croissance de 2003. 0 : sapins sains ; 1 : entre 1 et 5 % de branches mortes ; 2 : plus de 5 % de branches mortes

5. Influence des paramètres individuels et de peuplement

L'objectif de cette analyse est de **vérifier l'hypothèse suivante** :



Hypothèse 7 :

Il n'existe pas d'influence des paramètres individuels et de peuplement sur la perte de croissance accusée en 2003.

Elle ne prétend pas comprendre les liens qui existent entre ces paramètres et la croissance. En effet, pour atteindre un tel objectif, il serait nécessaire de réaliser un suivi des peuplements sur le long terme ou d'élargir l'échantillon. Seule l'année 2003 est considérée, les autres sécheresses ayant eu lieu dans des conditions de peuplements inconnues et probablement différentes de celles observées aujourd'hui.

Les facteurs pris en compte sont :

- dendrométriques : âge, diamètre, hauteur, forme du houppier, surface terrière.
- sanitaire : pour le sapin, présence ou non de gui⁸.

⁸ La présence de branches mortes est étudiée dans le paragraphe précédent. En effet, ce paramètre y est analysé dans un objectif de

5.1. Etude du lien entre perte de croissance et paramètres dendrométriques

L'étude du lien entre perte de croissance en 2003 et paramètres dendrométriques se fait à l'aide du calcul des **coefficients de corrélations** de Spearman. Toutes les variables considérées sont de type continu (la forme du houppier citée plus haut correspond en fait aux variables hauteur de houppier amont, hauteur de houppier aval, rayon de houppier amont et rayon de houppier aval). La perte de croissance est considérée par rapport à la période de référence 1998-2002, et est calculée sur les indices de croissance.

Deux paramètres ressortent de cette analyse (fig. 41) :

-le **rayon du houppier amont pour le sapin** : plus celui-ci est élevé, plus la perte de croissance a été forte en 2003. Cette observation peut être interprétée en termes de transpiration, plus importante lorsque le houppier est large (voir Discussion § 4.2).

- l'**âge pour le hêtre** : plus l'arbre est vieux, moins sa perte de croissance a été importante en 2003. Une limite de l'analyse dendrochronologique apparaît ici. En effet, les indices de croissance, issus de la standardisation, ne devraient plus contenir d'information liée à l'âge. L'étude du lien entre indice de croissance et âge cambial, non montré statistiquement, montre que l'année 2003 semble faire exception.

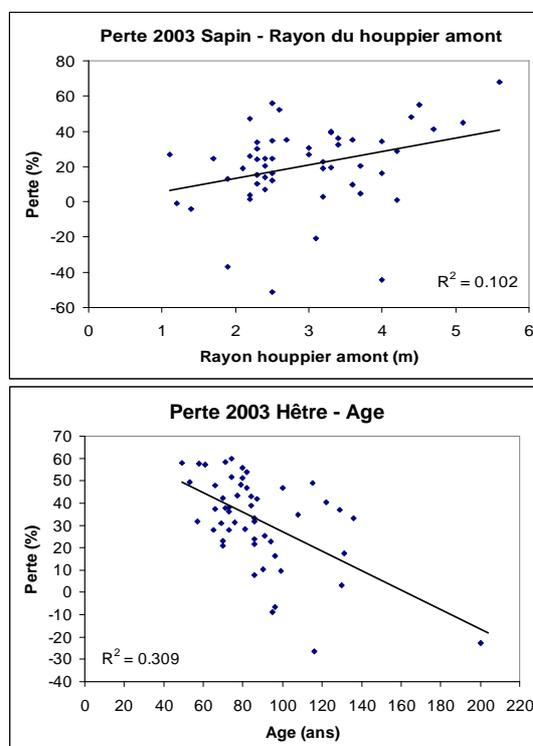


Figure 41 : Corrélations significatives entre la perte de croissance de 2003 et les paramètres dendrométriques

5.2. Comparaison de la croissance des sapins sains et des sapins gûités

La présence de gui relevée est toujours très faible (moins de 3 boules de gui par arbres). Nous pouvons donc émettre l'hypothèse que, dans le cas de cette étude uniquement, le gui n'influence pas la croissance des arbres, et n'a pas eu d'influence sur la perte de croissance de 2003 calculée sur les indices de croissance. Afin de vérifier cette hypothèse, un test de comparaison de moyennes est réalisé. Il montre que la perte de croissance des sapins gûités en 2003, proche de 42 %, est supérieure à la perte de croissance moyenne accusée par les autres individus la même année (de 17 %). Ainsi, le gui est un facteur à considérer pour l'analyse de la perte de croissance lors d'une sécheresse estivale.

Réfutation de l'hypothèse 7 :



Le rayon de houppier du sapin, l'âge du hêtre et la présence de gui sont trois facteurs ayant eu une influence sur la perte de croissance accusée lors de la sécheresse de 2003.

6. Conclusion

Les résultats obtenus permettent de nuancer les données tirées de la littérature. Ainsi, les deux essences étudiées montrent des variations de croissance très proches. Le hêtre apparaît comme l'essence qui répond le plus fortement aux sécheresses. En effet, sa croissance est largement déterminée par le bilan hydrique climatique estival, et les pertes de croissance observées lors des années de sécheresses sont importantes. Le sapin, au contraire, a une réaction aux sécheresses moins intense, mais plus étalée dans le temps. Sa sensibilité au climat est, comme relevé par l'étude bibliographique, plus forte sur sol superficiel. **En termes de production, le hêtre n'apparaît donc pas comme une alternative satisfaisante au sapin.**

Cependant, les analyses dendrochronologiques ne suffisent pas à expliquer les dépérissements de sapins observés en situation fraîche en 2003. Le lien entre croissance et dépérissement est complexe, et l'un ne peut servir à prédire l'autre.

Enfin, les effets observés des paramètres tels que le rayon du houppier ou la présence de gui montrent la difficulté d'isoler un signal unique dans les séries de largeurs de cernes, et la complexité des interactions qui peuvent exister entre le climat, la station et le peuplement.

Discussion

1. Limites de l'étude

Avant d'aborder les limites que peut présenter l'étude, nous pouvons souligner deux points importants quant à la pertinence des résultats obtenus :

- Toutes les données initiales (description de la station, du peuplement et données d'accroissement) ont été collectées au cours de la période d'étude par une seule personne. Ainsi, même si des problèmes de fiabilité peuvent se poser, toutes ces données restent comparables entre les individus et entre les placettes. Seul un problème de biais systématique peut se poser.
- Le protocole a été élaboré de manière à permettre une reproductibilité de la méthode pour des études ultérieures. Toutes les étapes sont donc décrites avec précision et la part de subjectivité dans le relevé a été réduite au minimum.

1.1. Limites liées aux données initiales

Malgré les points précisés plus hauts, de réelles limites dans la prise de données doivent permettre de nuancer les résultats.

Tout d'abord, la **taille de l'échantillon** ne semble pas suffisante à une bonne analyse. En effet, bien que Mérian et Lebourgeois (2010) préconisent un minimum de 15 individus par compartiment écologique, il semblerait que les effectifs choisis ici ne soient pas suffisants pour s'affranchir de la variabilité des résultats. Ainsi, des effectifs plus importants auraient peut-être pu permettre, par exemple, d'augmenter les coefficients de corrélation des fonctions de corrélation du sapin, et faire ressortir un certain nombre de paramètres climatiques, notamment les bilans hydriques climatiques estivaux classiquement mis en évidence dans la littérature (Lebourgeois *et al.*, 2010 ; Cailleret, 2011).

Le second obstacle auquel s'est heurtée l'étude réside dans la **description de la station**. En effet, les sols du Bugey présentent une hétérogénéité spatiale importante, en termes de profondeur et de teneur en éléments grossiers. De ce fait, les six individus d'une même placette, pour lesquels des valeurs uniques ont été utilisées, n'ont en réalité certainement pas accès au même volume de sol et donc à la même réserve utile. De plus, l'estimation de la réserve utile maximale, problème récurrent dans les études du fonctionnement hydrique des arbres et des peuplements (Breda *et al.*, 2002), vient également biaiser la description de la station. Dans cette étude, aucune valeur de réserve utile maximale n'a été donnée, car toute estimation aurait certainement sous-évalué ce paramètre. En effet, la profondeur mesurée est définie par la présence d'un obstacle mécanique (horizon massif, roche mère non altérée) ou chimique (horizon asphyxiant). Cette profondeur ne prend pas en compte la capacité de certaines essences à coloniser les horizons les plus profonds par un réseau de racines fines, y compris dans le cas d'une forte pierrosité ou d'une roche mère fissurée. Mais même la variable « volume de sol prospectable » (sous-entendu : à la tarière) ne semble pas satisfaisante. En effet, la tarière à spirale, plus adaptée aux sols pierreux qu'une tarière pédologique classique, a été choisie pour obtenir une meilleure estimation de la profondeur de sol, sans passer par une fosse pédologique. Cependant, cette méthode reste très approximative quant à la détermination de l'évaluation de la teneur en éléments grossiers. Ce dernier point est pourtant majeur pour la détermination du volume de sol prospectable, et, par conséquent, de la réserve utile maximale. Enfin, les relevés floristiques, qui auraient pu permettre de préciser les qualités hydriques et nutritionnelles de la station, n'ont pas donné de résultats satisfaisants. Les plantes présentes lors de la période d'inventaire (mai) étaient pour la plupart indicatrices de sol calcaire à neutre. Très peu indiquaient le caractère hydrique de la

station.

Les fonctions de pédotransfert, qui font le lien entre la réserve utile maximale et quelques propriétés physico-chimiques du sol, pourraient être une solution à l'évaluation du facteur hydrique de la station. Bien que le plus souvent établies sur sols agricoles, il existe quelques fonctions de pédotransfert appliquées aux sols forestiers, par exemple sur les plateaux calcaires de Lorraine (Bigorre *et al.*, 2000). La pertinence de ces fonctions dans le contexte des sols du Bugey reste cependant à démontrer.

1.2. Limites liées à la méthode d'analyse

Une grande partie des résultats reposent sur la **stratification de l'échantillon**, réalisée d'une part en fonction des paramètres édaphiques, et d'autre part en fonction de l'ensemble des paramètres stationnels. La deuxième méthode a en fait été utilisée pour pallier les limites de la première. En effet, aucune donnée concernant l'épaisseur et la teneur en éléments grossiers des sols n'étant disponible avant les relevés de terrain, l'échantillonnage a été réalisé « à l'aveugle ». Les paramètres de sol n'ont donc été connus qu'a posteriori, et n'ont pas permis d'établir une classification claire des placettes. Les limites entre les trois groupes de sol sont floues, et la description du profil de sol d'une placette supplémentaire selon la même méthode ne suffirait pas toujours à la placer dans l'un de ces groupes.

La seconde méthode, dite intégratrice, présente elle-même des limites. En effet, le protocole établi initialement avait pour objectif une étude en fonction du critère sol uniquement. Ainsi, des critères comme l'altitude ou l'exposition, bien que significativement différents entre station sèche et station fraîche, ne présentent a priori pas une amplitude suffisante pour être discriminants. Cailleret (2011) montre par exemple que même le long d'un gradient altitudinal important, le premier facteur explicatif de la croissance reste le sol.

2. Variabilité des résultats

Bien que de grandes tendances se dégagent nettement des analyses, la réponse des essences au climat montre une certaine **variabilité interannuelle** qui reste inexpiquée par les données climatiques dont nous disposons. Celle-ci est notamment appréhendée par la comparaison des 3 années de sécheresse étudiées (1976, 1989 et 2003). Certaines années, le sapin connaîtra une perte de croissance plus importante sur stations sèches (1989 et 2003) ; d'autres années sur stations fraîches (1976). Sur sols profonds, un certain nombre d'entre eux pourront ne pas retrouver leur croissance initiale dans les années qui suivent (1976), ou au contraire la retrouver plus rapidement (1989, 2003).

La réponse du hêtre aux sécheresses semble moins aléatoire, avec une perte de croissance systématiquement plus forte sur stations sèches ou sols superficiels, mais globalement plus homogène. Cette homogénéité dans la réponse peut en partie être due à la capacité du hêtre à retrouver en fin de saison une partie de sa conductance dans les vaisseaux embolisés.

Afin d'expliquer le peu de cohérence entre les réactions à ces 3 années, nous pouvons émettre quelques hypothèses, qui s'appuient sur les conditions climatiques de l'année :

- En année de sécheresse (1989), moins de hêtres retrouvent leur croissance, mais ceux qui récupèrent le font plus vite.
- En année de sécheresse et canicule (1976, 2003), plus de hêtres retrouvent leur croissance, mais ceux qui récupèrent le font moins vite.

La **variabilité interindividuelle** reste quant à elle limitée. Cela se traduit par des coefficients d'interdatation relativement élevés (voir partie Résultats § 2.3).

3. Interprétation physiologique et écologique

3.1. Comparaison du comportement du hêtre et du sapin pectiné

3.1.1. Deux comportements proches face au climat

La première conclusion qui peut être tirée de cette étude est une relative similitude dans la réponse en croissance du hêtre et du sapin aux sécheresses estivales, et de manière plus générale au climat. Cette observation est appuyée par différents éléments de la physiologie et de l'autécologie des deux essences :

- Le hêtre et le sapin sont des **essences de climat montagnard** dont la distribution est relativement proche. Les deux essences ont donc des exigences comparables en termes de température et de pluviométrie. L'étude étant de plus restreinte aux conditions d'altitude les plus favorables aux deux essences (voir § 2.1 et 2.2), le climat n'apparaît pas comme facteur limitant de la croissance.
- Le hêtre et le sapin présentent le **même type de comportement face à une sécheresse**. Le contrôle de la transpiration pour ces deux essences est relativement tardif, et apparaît pour des potentiels hydriques* déjà faibles (-1,5 à 2,5 MPa) (Aussenac 1995).

3.1.2. Quelques différences notables

Les différences de comportement des deux essences peuvent en grande partie être expliquées par les deux caractères mentionnés au paragraphe Problématique 2.4 :

- des aiguilles persistantes pour le sapin, des feuilles caduques pour le hêtre,
- un système racinaire pivotant pour le sapin, superficiel pour le hêtre.

3.1.2.1. Une réponse plus forte du hêtre au climat

Cette observation ressort à différents niveaux, aussi bien en termes d'années caractéristiques, de sensibilité aux variations interannuelles du climat, de corrélations avec les facteurs climatiques que de perte de croissance en année sèche.

Elle peut s'expliquer par le **caractère sempervirent* du sapin**, qui aura tendance à **lisser les effets du climat** par la conservation de ses aiguilles. Sa capacité photosynthétique hivernale peut en effet lui permettre de compenser les impacts d'une mauvaise saison estivale par l'accumulation de réserves pendant cette période. Au contraire, si une année particulièrement défavorable au sapin conduit à la non-formation d'aiguilles cette année-là, la capacité photosynthétique du sapin sera réduite jusqu'à renouvellement complet des aiguilles. Au contraire, le hêtre « accuse le coup » de mauvaises conditions climatiques l'année même, de manière plus forte car sa période de végétation est réduite (premières réserves utilisées pour la mise en place des feuilles), mais moins durable car la croissance de l'année suivante est permise par un nouveau cortège de feuilles. Cette différence physiologique est également à mettre en lien avec la fonction de corrélation établie pour le rapport des écarts relatifs de croissance du hêtre et du sapin (qER10). En effet, d'après celle-ci, les températures du mois de décembre sont le principal facteur discriminant pour les deux essences. Ce paramètre reflète les conditions climatiques d'une période pendant laquelle le hêtre sera sans activité tandis que le sapin constituera des réserves.

Cependant, cette **différence d'intensité dans la réponse doit être nuancée**. En effet, au regard des résultats obtenus dans la littérature (Lebourgeois *et al.*, 2010 ; Cailleret, 2011), les corrélations entre paramètres climatiques et indices de croissance du sapin semblent remarquablement faibles. Aucune d'entre elles n'est significative, alors que le bilan hydrique estival ressort fréquemment dans la littérature comme un paramètre climatique déterminant pour la croissance. De plus, cette observation vient en contradiction avec des pertes de croissance mesurées tout de même fortes en année de sécheresse. Cela pourrait s'expliquer

par une sous-estimation du nombre d'individus nécessaires à l'obtention de résultats significatifs, comme déjà évoqué. Le hêtre, pour qui les réponses sont plus stables dans le temps et entre les individus, ne présente pas ce problème.

3.1.2.2. Une différenciation des essences en année sèche

La première différence tient dans le fait que le hêtre accuse une perte de croissance plus importante que le sapin en année de sécheresse estivale. Ce résultat peut être expliqué par les mêmes éléments que ceux conduisant à une réponse plus forte du hêtre au climat.

Le **système racinaire** pourrait également avoir son rôle à jouer. En effet, en situation de déficit hydrique, l'arbre va chercher à puiser l'eau dans les horizons les plus profonds (fig. 42, Bréda *et al.*, 2002). Le hêtre, par son système racinaire superficiel n'a pas la capacité d'atteindre ces horizons profonds. Il se trouvera donc défavorisé vis-à-vis du sapin, dont les racines auront déjà pu s'installer en profondeur.

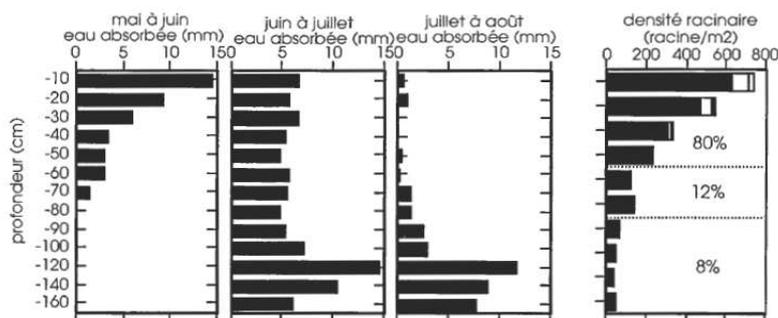


Figure 42 : Répartition des prélèvements d'eau le long d'un profil de sol sous frênaie au cours d'un dessèchement estival. Bréda *et al.*, 2002

La seconde différence relevée est une proportion de sapins globalement plus importante pour laquelle le retour à la croissance initiale ne se fait pas dans les huit années suivant la sécheresse. Ce résultat peut encore une fois s'expliquer par la persistance des aiguilles du sapin. En effet, la période considérée ici (8 ans) correspond au temps moyen nécessaire au sapin pour renouveler totalement ses aiguilles. Il est également à rapprocher des **phénomènes de dépérissement** étudiés par ailleurs. En effet, nombre de publications (mais aussi d'observations de terrain) montrent que suite à une sécheresse, les signes de dépérissements observés le sont principalement sur le sapin. L'impact de la sécheresse sur cette essence se traduirait donc par des phénomènes sur le plus long terme : difficulté de reprise de la croissance, apparition progressive de branches mortes, et finalement mortalité complète de l'individu. Dans le cadre de cette étude, seuls les deux premiers symptômes ont pu être observés, et les résultats obtenus vont dans le sens de la littérature. Par ailleurs, cette différence dans la récupération de la croissance peut aussi être due à une très bonne capacité de reprise du hêtre. En effet, en période de sécheresse intense, ce dernier se défeuille complètement, limitant ainsi la transpiration et les phénomènes de cavitation*. En protégeant ainsi ses tissus conducteurs, le hêtre s'assure une nouvelle mise en place d'un feuillage et une reprise de croissance aisées l'année suivante. Bien que de telles défoliations n'aient pas été observées dans le Bugey suite à 2003, ces phénomènes ont pu se produire suite à la sécheresse de 1976.

3.2. Influence de la station et de la profondeur de sol sur la croissance

3.2.1. Une perte de croissance plus forte sur sols superficiels

Pour le groupe de placettes classées en sol superficiel, la **réserve utile maximale** est logiquement plus faible qu'en situation plus profonde. À bilan hydrique climatique égal, le bilan hydrique édaphique sera plus faible, favorisant les processus de dépérissement par des phénomènes de cavitation et d'épuisement plus rapide des réserves carbonées (Bréda *et al.*, 2006). De plus, les arbres des sols superficiels présentent un accroissement moyen plus faible que sur sols profonds, et parfois très faible (de 1 à 2 mm), ce qui peut

les rendre plus sensibles aux sécheresses (Graf Pannatier *et al.*, 2006). Cette observation est appuyée par les travaux de Granier *et al.* (1995). Ceux-ci montrent, en comparant des sols bruns lessivés et des rendzines brunifiées, que sur des sols à réserve utile plus faible, la sécheresse est à la fois plus précoce et plus intense. La régulation stomatique sera donc plus précoce, et la croissance plus faible. Ces travaux montrent également que la recharge en eau du sol y est très rapide. Cela peut expliquer le fait que la reprise de croissance sur les sols superficiels ne soit pas plus lente que sur sols profonds. Notons enfin que la surface terrière plus faible sur sols superficiels ne semble pas compenser les mauvaises conditions stationnelles : la croissance y reste plus faible.

4. Conséquences sur la gestion

4.1. Mise en garde

Avant d'étudier les conséquences des résultats pour la gestion, il est nécessaire de rappeler le **périmètre de validité** de ces résultats. Ainsi, tous les résultats présentés précédemment et discutés dans les paragraphes qui suivent ne sont valables que dans la limite des conditions extrêmes de l'étude :

- à l'étage du **montagnard inférieur** : de 850 à 1100 m d'altitude
- en **exposition d'adret** : S à N-O
- en **peuplement mature, mélangé, irrégulier**, de densité moyenne à faible (20 à 45 m³/ha)

Les éventuelles implications en termes de gestion ne devront donc être appliquées qu'après vérification de la correspondance du peuplement avec ces conditions.

4.2. Rappel du rôle de la sylviculture dans la résistance à la sécheresse

Le contrôle du bilan hydrique peut se faire via deux types d'opérations sylvicoles :

- les **trouées et éclaircies** : en diminuant la surface foliaire (LAI), cette opération diminue à la fois la transpiration globale du peuplement, l'interception des pluies par le couvert et la compétition pour l'eau au niveau du sol. La résistance globale du peuplement à la sécheresse en serait alors renforcée (Aussenac *et al.*, 1995 ; Lelou *et al.*, 2009). Cependant, les conséquences d'une telle opération sont complexes et peuvent parfois entrer en contradiction (fig. 43). Tandis que la réduction de la transpiration du peuplement et de l'interception des pluies permet une économie en eau en année moyenne, l'augmentation de la transpiration du sous-bois, de l'évaporation du sol et du prélèvement d'eau par le gui rend le peuplement plus sensible aux sécheresses intenses.

-l'**abandon des rémanents au sol** : cette pratique permet de limiter l'évaporation du sol et le développement du sous-bois. Elle favorise donc l'économie en eau du peuplement (Lelou *et al.*, 2009).

Le **mélange des essences** fait également partie des recommandations pour faire face aux événements climatiques extrêmes (Bréda *et al.*, 2006 ; Bréda *et al.*, 2008 ; Legay *et al.*, 2007). En effet, les peuplements mélangés sont supposés plus résistants à la sécheresse :

- car les essences ne sont pas toutes sensibles au même seuil de stress ;
- car en cas de dépérissement, le peuplement conservera une partie de son couvert forestier et de son potentiel séminal par le biais des essences les plus résistantes.

Des études récentes ont également mis en évidence des phénomènes de compensation entre les essences en peuplement mélangé. C'est le cas d'un peuplement mélangé chêne sessile-pin sylvestre (Pérot *et al.*, 2008), pour lequel l'accroissement des pins était supérieur comparé à une situation de peuplement pur.

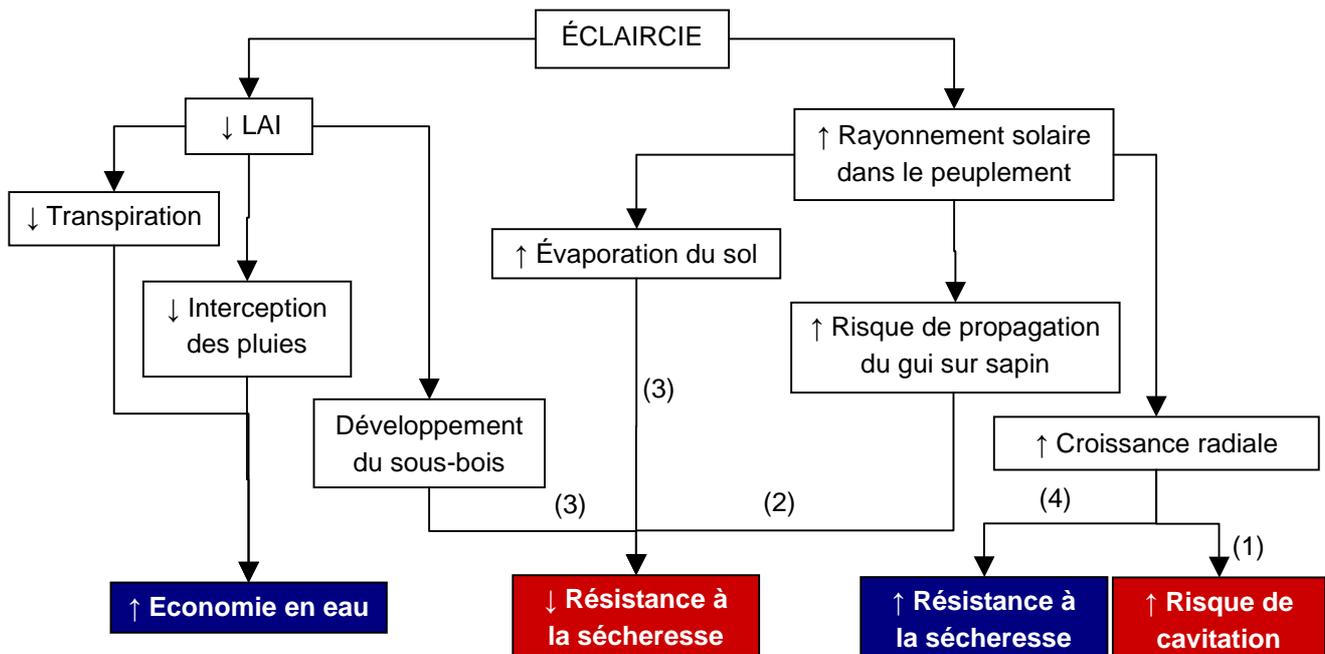


Figure 43 : Conséquences d'une éclaircie sur le bilan hydrique d'un peuplement forestier

(1) Hacke *et al.* (2001) montrent qu'au sein d'un même organe, les vaisseaux plus larges sont plus sensibles à la cavitation en condition de sécheresse. Ce fait n'est cependant pas avéré lorsqu'on compare différents organes ou différentes espèces, le risque de cavitation étant alors principalement lié à des pores pariétaux de grande taille. Par ailleurs, les bois à forte densité sont moins exposés au risque de rupture des parois des vaisseaux lors de sécheresses, en particulier chez les conifères (Hoffmann, 1994). Notons également que le hêtre présente la capacité de retrouver partiellement en fin de saison la conductance dans les vaisseaux embolisés (Bréda *et al.*, 2006).

(2) Plagnat, 1950

(3) Lelou *et al.*, 2009

(4) Certaines publications (Suarez *et al.*, 2004 ; Bréda *et al.*, 2006) semblent montrer que les arbres présentant une croissance plus faible sont plus sensibles à la sécheresse et plus susceptibles de mourir. Lors de la sécheresse de 2003 notamment, les arbres préalablement exposés à un stress et présentant des cernes étroits ont pu mourir cette même année ou dans les années qui ont suivi.

4.3. Préconisations

4.3.1. Discussion autour du choix des essences

Un des objectifs de l'étude est de préciser le choix des essences objectif en fonction de la situation stationnelle. La carte de sensibilité du hêtre au changement climatique ainsi que l'analyse de la réaction du hêtre et du sapin aux sécheresses permet de préciser cela.

L'étude nous montre que suite à une année sèche comme 2003, de nombreux sapins perdent une part importante de leur croissance et peinent à retrouver leur croissance initiale sur les sols superficiels à moyens. C'est également sur ces sols que se concentrent les individus présentant des branches mortes. Au contraire, sur sol profond, le comportement du sapin suite à une année sèche reste tout à fait bon. Ainsi, au regard de ces résultats, **le travail en faveur du sapin serait à poursuivre sur sol profond et à modérer sur les sols superficiels à moyens**. Cette recommandation est également appuyée par la littérature. Rappelons par exemple que Lebourgeois (2010) préconise d'exclure le sapin en dessous de 800 m d'altitude et sur les stations dont la réserve utile est inférieure à 100 mm.

Concernant le hêtre, la réaction dans les années qui suivent une sécheresse semble bonne et ce quelle que soit la situation stationnelle. Cependant :

- la perte de croissance l'année même est tout de même élevée ;
- le lien fort de la croissance avec le bilan hydrique estival rend l'essence plus sensible aux évolutions climatiques à venir.

Pour ces deux raisons, **le hêtre ne serait pas à considérer en tant que telle comme une essence de substitution au sapin en vue des évolutions climatiques, mais plutôt comme une essence permettant un mélange avec le sapin**, de manière plus ou moins importante selon la situation. Le tableau qui suit (tab. 10) est donné à titre indicatif et doit être modulé selon la situation actuelle du peuplement.

		Sensibilité du hêtre		
		Forte	Forte sur stations sèches (5.6)	Faible
Sol	Superficiel	Autre Hêtre ? Sapin ? Mélange : fort	Autre Hêtre ? Sapin ? Mélange : fort	Hêtre ++ Sapin ? Mélange : fort
	Moyen	Sapin + Hêtre + Mélange : fort	Sapin + Hêtre + Mélange : moyen	Sapin + Hêtre ++ Mélange : moyen
	Profond	Sapin ++ Hêtre + Mélange : moyen	Sapin ++ Hêtre ++ Mélange : faible	Sapin ++ Hêtre ++ Mélange : faible

Tableau 10 : Aide au choix des essences objectif en fonction de la station et de la zone de sensibilité du hêtre.
 ? : situation à risque pour l'essence ; + : essence qui peut être maintenue ; ++ : essence à favoriser ; Mélange : niveau de mélange nécessaire à la stabilité du peuplement (fonctionnement hydrique, résistance aux pathogènes). Les données de l'étude ne sont pas suffisantes pour quantifier ce niveau de mélange.

Quelques situations ne sont a priori favorables ni au hêtre ni au sapin (tab. 10 : **Autre**). Dans ce cas, il serait intéressant de réfléchir à une éventuelle substitution d'essence, possible par les essences autochtones déjà présentes dans les peuplements. Les peuplements les plus au sud de la zone d'étude sont par exemple en partie composés de chêne sessile. On trouve également fréquemment des érables, et notamment l'érable à feuilles d'obier, ainsi que des tilleuls à grandes feuilles dont la croissance peut être très importante. Quels que soient les choix qui sont pris, le mélange doit toujours être favorisé pour les raisons citées plus haut.

4.3.2. Discussion autour du choix de l'itinéraire sylvicole

Nous avons vu plus haut qu'en termes de potentiel hydrique, les seuils de fermeture des stomates du hêtre et du sapin sont très proches. Ainsi, à situation stationnelle égale, une même sylviculture peut être appliquée pour limiter le stress hydrique. En théorie, celle-ci doit alors tendre :

- en année moyennement sèche, vers une surface foliaire du peuplement suffisante pour conserver la production mais suffisamment faible pour limiter l'évapotranspiration ;
- en année sèche et chaude, vers un couvert relativement fermé pour limiter l'échauffement du sol.

Les préconisations de gestion peuvent s'articuler autour de la discussion des trois itinéraires sylvicoles actuellement mis en œuvre pour le sapin en structure régulière :

- Itinéraire 1 : éclaircies tardives et modérées

Cet itinéraire consiste à imposer aux arbres une première phase de compression longue, permettant de donner sa forme au fût. Des éclaircies modérées sont ensuite effectuées, qui maintiennent un peuplement fermé.

- Itinéraire 2 : éclaircies précoces et modérées

Cet itinéraire consiste à mettre les arbres à distance dès le jeune âge, et à effectuer des éclaircies continues jusqu'à atteindre le diamètre d'exploitabilité. Le peuplement est donc maintenu fermé tout au long de l'itinéraire.

- Itinéraire 3 : éclaircies tardives et fortes

Les arbres sont maintenus en compression dans le jeune âge afin d'obtenir une grume de qualité, puis des éclaircies fortes permettent d'obtenir des accroissements forts et donc d'atteindre le diamètre d'exploitabilité rapidement.

Le tableau suivant (tab. 11) permet de préciser les conséquences de chaque itinéraire sur 4 critères : l'économie en eau du peuplement, la résistance aux sécheresses, la prise de risque vis-à-vis du changement climatique (plus les arbres restent longtemps sur pied, plus ils subissent d'aléas climatiques et plus l'adaptation génétique aux nouvelles conditions du milieu est lente) et la qualité des bois obtenus.

	Économie en eau	Résistance à la sécheresse	Prise de risque	Qualité des bois	Stations adaptées
Itinéraire 1	(-) Peuplement fermé → faible	(+-) Peuplement fermé (-) Croissance faible → moyenne	(-) Âge d'exploitation élevé (120 ans) → forte	(+) Cernes réguliers (+) Forme régulière → bonne	Stations fraîches (5.7)
Itinéraire 2	(+-) Peuplement assez fermé → moyenne	(+-) Peuplement assez fermé (+) Croissance moyenne → bonne	(+) Âge d'exploitation faible (80 ans) → faible	(+) Cernes réguliers (-) Forme médiocre → faible	Stations sèches (5.6) Stations fraîches (5.7)
Itinéraire 3	(+) Peuplement clair après les premières éclaircies → bonne	(-) Peuplement clair après les premières éclaircies (-) Croissance forte après les premières éclaircies → faible	(+) Âge d'exploitation faible (80 ans) → faible	(-) Cernes irréguliers (+) Forme régulière → moyenne	Stations fraîches (5.7)

Tableau 11 : Aide au choix de l'itinéraire sylvicole. Rouge : impact de l'itinéraire sur le critère concerné négatif pour le sylviculteur ; Orange : peu d'impact sur le critère concerné ; Vert : impact positif sur le critère concerné. Les âges d'exploitation sont donnés à titre indicatif pour un diamètre d'exploitation de 60cm.

4.3.3. Branches mortes : un bon indicateur de croissance ?

Comme vu précédemment, aucun sapin qui présente plus de 5 % de branches mortes (note 2 de la classification DSF) n'a retrouvé en 2011 la croissance qu'il connaissait avant 2003, sauf dans le cas des sapins qui depuis plusieurs décennies ont une croissance inférieure au millimètre. Ce résultat pourrait donc être appliqué en termes de choix des individus à récolter lors du martelage. En effet, si, comme supposé, les sapins qui présentent plus de 5 % de branches mortes ne participent que peu depuis 2003 à la production du peuplement, ils peuvent être récoltés sans perte de production.

Pour valider ce résultat, il serait nécessaire d'observer la croissance de ces individus encore sur quelques années, afin de vérifier que leur croissance ne redémarre pas, et mesurer la croissance d'un nombre plus grand de sapins dépérissants (ici, seuls 7 individus sont concernés) (voir Perspectives § 3).

5. Perspectives

Afin de compléter les résultats obtenus et de tester certaines hypothèses avancées dans cette étude, différents axes peuvent être envisagés :

Faire le lien entre la croissance individuelle et la croissance du peuplement. En effet, tous les résultats obtenus ici l'ont été à l'échelle de l'arbre. Or, l'extrapolation de ces résultats à l'échelle du peuplement, échelle sur laquelle raisonne le sylviculteur, aurait des conséquences non négligeables. Nous

avons par exemple montré que plus un individu avait une croissance forte dans l'année précédant la sécheresse, plus sa perte de croissance relative était importante. Si une telle corrélation était avérée pour un peuplement, alors une sylviculture très dynamique conduirait à une perte de production forte en année sèche. Une extrapolation de l'individu au peuplement est possible s'il existe un lien entre l'accroissement et la surface terrière, ce que nous n'avons pu montrer dans cette étude.

Faire le **lien entre accroissement, dépérissement et mortalité**. La baisse d'accroissement apparaît dans la littérature en lien étroit avec une fragilisation de l'arbre (signes de dépérissements, mortalité). À titre d'exemple, Bert *et al.* (1990) montrent que dans le Jura, la croissance des sapins est inversement proportionnelle au manque d'aiguilles. Au contraire, les arbres sains présentent une croissance moyenne plus forte que les arbres dépérissants et une tendance croissante de leur accroissement (Bigler *et al.*, 2004). Les arbres de petit diamètre avec un accroissement faible font cependant exception, puisqu'il ne sont pas plus susceptibles de mourir que la moyenne. L'explication du lien accroissement faible - mortalité pourrait résider dans un dysfonctionnement de l'équilibre en carbone de l'arbre, l'épuisement des réserves aboutissant à la mort de l'individu (Bréda *et al.*, 2006). Dernièrement, le lien accroissement, dépérissement et mortalité a été étudié par Cailleret (2011), qui conclut sur une déconnexion entre ces trois phénomènes. Dans le cas de notre étude, quelques pistes pourraient être envisagées :

- réaliser un suivi sur le plus long terme des individus déjà mesurés, afin de prendre du recul par rapport à la sécheresse de 2003
- compléter l'échantillon par des individus dépérissants à très dépérissants, et observer leur croissance en 2003 et dans les années qui suivent

Étudier les **signaux de moyenne et basse fréquence de l'accroissement**, afin de préciser l'effet de l'âge, de la sylviculture, du changement climatique, de la présence du gui, souvent installé depuis plusieurs décennies, ou encore de l'historique du peuplement. Cette approche sera l'objet d'un futur stage.

Le gui est l'un des sujets préoccupants des forestiers locaux. Les recommandations actuelles visent à limiter sa propagation dans les sapinières du montagnard (Prochasson, à paraître) :

- en favorisant le mélange d'essences, ce qui aura pour conséquence de diminuer la probabilité qu'une graine de gui soit déposée sur un sapin
- en maintenant les peuplements contaminés suffisamment denses pour limiter l'arrivée de la lumière sur le parasite. Notons que cette dernière recommandation peut venir à l'encontre d'une résistance du peuplement à la sécheresse.

Élargir l'étude à l'**étage collinéen**. On trouve en effet dans le Bugey de nombreux peuplements de sapin non dépérissants, et pourtant situés à des altitudes « à risque » (Lebourgeois, 2010). Il serait donc intéressant d'étudier leur croissance en réaction au climat, et notamment aux sécheresses, et de tester l'hypothèse selon laquelle ces peuplements seraient favorisés par une pluviométrie élevée et constante tout au long de l'année.

Étudier le **comportement des autres essences autochtones** face aux sécheresses, et plus largement au climat. Cette approche permettrait d'affiner les objectifs de production en vue du changement climatique, et d'anticiper une éventuelle substitution d'essences.

Conclusion

L'étude dendroécologique comparée du sapin pectiné et du hêtre a permis d'apporter des éléments nouveaux quant à la réaction de ces essences aux sécheresses. En effet, jusqu'alors, peu d'études de ce type ont analysé de manière parallèle la réponse d'une essence résineuse et d'une essence feuillue, pourtant classiquement associées en peuplement mélangé. La première des conclusions pourrait donc être la forte similitude qui existe entre les variations interannuelles de croissance du sapin et du hêtre, et donc entre la réaction des deux essences face au climat. En année de sécheresse, la comparaison des réactions en croissance montre un impact du déficit hydrique plus fort sur le hêtre que sur le sapin. Cependant, cette observation est difficilement applicable en termes de gestion, puisque les phénomènes de dépérissement n'ont pu être intégrés à l'analyse. En effet, parmi les trois conséquences principales des sécheresses (perte de croissance, dépérissement et mortalité), seule la croissance a été étudiée. Or, les dépérissements et mortalités observés à la suite d'une sécheresse le sont très majoritairement sur le sapin. À la question « quelle essence, du hêtre ou du sapin, est la plus impactée par les sécheresses estivales dans le Bugey ? », aucune réponse tranchée ne peut donc être avancée. L'étude du lien entre croissance, dépérissement et mortalité serait un bon complément aux résultats obtenus.

Par ailleurs, les études dendroécologiques portant sur des terrains à forte hétérogénéité spatiale tel que le Bugey sont encore peu nombreuses. La méthodologie de description stationnelle proposée s'appuie sur une profondeur de sol mesurée à la tarière à spirale, avec pour objectifs facilité de relevé et reproductibilité de la mesure. Sans prétendre pouvoir quantifier la réserve utile, cette méthode peut permettre de comparer différentes situations pédologiques à forte pierrosité. Ainsi, pour le hêtre comme pour le sapin, la perte de croissance en année sèche est atténuée par un sol plus profond (en moyenne entre 30 et 60 cm d'épaisseur dans notre cas), à faible teneur en éléments grossiers. Une étude le long d'un gradient continu de profondeur de sol pourrait permettre de valider la valeur de 30 cm (mesurée à la tarière) comme seuil en dessous duquel la croissance chute de manière importante en année sèche.

Les préconisations de gestion restent délicates à avancer, du fait de la complexité des interactions entre le couvert forestier, sur lequel peut jouer le sylviculteur, et le bilan hydrique du peuplement. Nous pouvons tout de même conclure à une certaine prudence vis-à-vis d'une sylviculture très dynamique, qui peut dans certains cas rendre le peuplement plus sensible aux sécheresses estivales intenses. Des éléments ont également été apportés pour préciser les essences objectif du guide de station *Synthèse pour les Alpes du Nord et les montagnes de l'Ain*. Il apparaît notamment que la substitution observée du sapin par le hêtre, qu'elle soit subie ou favorisée, ne semble pas être une réponse adaptée aux évolutions climatiques. De nombreuses interrogations subsistent donc, en relation avec l'acclimatation des essences aux nouvelles conditions environnementales.

Références bibliographiques

- AUSSENAC G., 1978. La sécheresse de 1976 : influence des déficits hydriques sur la croissance des arbres forestiers. *Revue forestière française*, vol. 30, p. 103-114.
- AUSSENAC G., GRANIER A., BREDA N., 1995. Effets des modifications de la structure du couvert forestier sur le bilan hydrique, l'état hydrique des arbres et la croissance. *Revue Forestière Française*, vol. 47, p. 54-62.
- BADEAU V., ZAPATER M., BREDA N., GRANIER A., 2010. Biodiversité fonctionnelle : comportement écophysologique comparé d'essences forestières feuillues co-occurentes. Présentation du groupe d'étude de l'arbre.
- BAGNOULS F., GAUSSEN H., 1957. Les climats biologiques et leur classification. *Annales de géographie*, n°355, p. 193-220.
- BECKER M., 1987. Bilan de santé actuel et rétrospectif du Sapin (*Abies alba* Mill.) dans les Vosges. Etude écologique et dendrochronologique. *Annales des Sciences forestières*, vol. 44, n°4, pp. 379-402.
- BERT G.-D., BECKER H.-M., 1990. Vitalité actuelle et passée du sapin (*Abies alba* Mill) dans le Jura. Etude dendroécologique. *Annales des sciences forestières*, vol. 47, p. 395-412.
- BIGLER C., GRICAR J., BUGMANN H., CUFAR K., 2004. Growth patterns as indicators of impending tree death in silver fir. *Forest Ecology and Management*, vol.199, p.183-190.
- BIGORRE F., PERNES-DEBUYSER A., TESSIER D., 2000. Influence relative de la pédogénèse et de l'usage des sols sur leurs propriétés physiques. Applications aux fonctions de pédotransfert. Disponible sur Internet : <http://francois.bigorre.free.fr/pptes_pedo_vegetation.htm>
- BLANCHET G., 1977. La sécheresse de 1976 dans la région Rhône-Alpes. *Revue de géographie de Lyon*, vol. 52, n°2, p. 99-115.
- BLANCHET G., 1992. Le temps dans la région Rhône-Alpes en 1989 : Analyse de la sécheresse. *Revue de géographie de Lyon*, vol. 67, n°3, p. 241-253.
- BREDA N., LEFEVRE Y., BADEAU V., 2002. Réservoir en eau des sols forestiers tempérés : spécificités et difficultés d'évaluation. *La Houille Blanche*, vol. 3, p. 24-32.
- BREDA N., GRANIER A., AUSSENAC G., 2004. La Sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysologique et influence sur les arbres forestiers. *Revue Forestière Française*, vol. 56, p. 109.
- BREDA N., HUC R., GRANIER A., DREYER E., 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science*, vol. 63, p. 20.
- BREDA N., BADEAU V., 2008. Forest tree responses to extreme drought and some biotic events: Towards a selection according to hazard tolerance? *Comptes Rendus Geosciences*, vol. 340, p. 651-662.
- BUNTGEN U., FRANK D., BAREISS VALLE K., BOURIAUD O., ESPER J., 2008. Climatic drivers of beech growth in the Vosges and Jura Mountains. Dans : *TRACE - Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology*, Vol. 6: Proceedings of the DENDROSYMPOSIUM 2007, GFZ Potsdam, Scientific Technical Report STR 08/05, p. 37 - 44.
- CAILLERET M., 2007. Dendroécologie compare du sapin pectiné et du hêtre commun le long d'un gradient altitudinal. Mémoire de Master 2 Systèmes écologiques, Université de Bordeaux 1. 23 p.
- CAILLERET M., 2011. Causes fonctionnelles du dépérissement des sapinières (*Abies alba* Mill.) de l'arrière pays méditerranéen. Thèse de doctorat de l'Unité de Recherches Ecologie des Forêts Méditerranéennes de l'INRA.
- CEMAGREF, 2003. *Abies Alba* Mill. - Sapin pectiné. Conseils d'utilisation des matériels forestiers de reproduction. Disponible sur internet : <http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/sapin_pectine_avril05.pdf>
- CEMAGREF, 2003. *Fagus sylvatica* L. - Hêtre. Conseils d'utilisation des matériels forestiers de reproduction. Disponible sur internet : <http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/hetre_nov07.pdf>
- CENTRE DE DEVELOPPEMENT AGROFORESTIER DE CHIMAY. Exigences écologiques du Hêtre. Diagnostics stationnels et sylvicole. Guide n° 001. Disponible sur internet : <http://www.cdaf.be/docs/web/pdf/B1a_diagnostics_stationnel_sylvicole/guide%20001_exigences_ecologiques_hetre.pdf>
- CENTRE INTERREGIONAL DE COORDINATION OPERATIONELLE DE LA SECURITE CIVILE, 1990. La campagne feux de forêt 1989. *Forêt méditerranéenne*, vol. 12, n°1, p. 54-55.

- CENTRE REGIONAL DE LA PROPRIETE FORESTIERE RHONE-ALPES, 2006. Guide pour identifier les stations forestières de Rhône-Alpes. Synthèse pour les Alpes du Nord et les Montagnes de l'Ain. 132p.
- CHAMBRE D'AGRICULTURE DE L'AIN, 1987. Géologie du département de l'Ain, *Sols du Bugey et du Revermont*. Disponible sur internet : <<http://ddaf.ain.pref.gouv.fr/ode/ressource/pluviometrie.html>>
- CHRISTENSEN J.H., HEWITSON B., BUSUIOC A., CHEN A., GAO X., HELD I., JONES R., KOLLI R.K., KWON W.-T., LAPRISE R., MAGANA RUEDA V., MEARNES L., MENENDEZ C.G., RAISANEN J., RINKE A., SARR A., WHETTON P., 2007. Regional Climate Projections. Dans : *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- CIAIS P., REICHSTEIN M., VIOVY N., GRANIER A., OGEE J., ALLARD V., AUBINET M., BUCHMANN N., BERNHOFER C., CARRARA A., CHEVALLIER F., DE NOBLET N., FRIEND A., FRIEDLINGSTEIN P., GRUNWALD T., HEINESCH B., KERONEN P., KNOHL A., KRINNER G., LOUSTAU D., MANCA G., MATTEUCCI G., MIGLIETTA F., OURCIVAL J., PAPAIE D., PILEGAARD K., RAMBAL S., SEUFERT G., SOUSSANA J., SANZ M., SCHULZE E., VESALA T., VALENTINI R., 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, vol. 437, p. 529-533.
- DEPARTEMENT DE LA SANTE DES FORETS, 2004. Sécheresse et canicule de l'été 2003 : quelle incidence visuelle sur les peuplements forestiers ? Information Santé des Forêts.
- DEPARTEMENT DE LA SANTE DES FORETS, 2009. Quelques indicateurs de la santé des forêts françaises (1989-2008).
- DUCHAUFOR P., BONNEAU M., 1960. Note sur la physiologie de la nutrition des résineux. *Revue forestière française*, vol. 4, p. 250-256.
- FROCHOT H., LANIER L., 1980. Implantation artificielle du gui (*Viscum album* L.) sur différentes provenances de sapin pectiné (*Abies alba* Miller). *Annales des Sciences Forestières*, vol. 37, p. 147-157.
- GILLMANN M., 2010. Influence et rôle de deux facteurs biotiques (*Viscum album* L. et Scolytidae) impliqués dans le processus de dépérissement et de mortalité du Sapin pectiné (*Abies alba* Mill.). Mémoire de Master 2 recherche, Université de Rennes 1.
- GRAF PANNATIER E., DOBBERTIN M., BRECHBUHL A., SCHMITT M., THIMONIER A., WALDNER P., KRAUCHI N., 2006. Effect of water deficit on tree growth, leaf discoloration and crown transparency in Swiss ICP-Forests level II plots. WSL, Swiss Federal Institute for Forest, Snow, and Landscape Research.
- GRANIER A., BADEAU V., BREDA N., 1995. Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. *Revue forestière française*, vol. 47, n°sp, p. 59-68.
- HACKE U., SPERRY J., 2001. Functional and ecological xylem anatomy. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, Vol. 4, p.97-115.
- HOFFMANN, 1994. Fagus: a model for growth and development of beech. *Ecological Modelling*, vol. 83, n° 3, p. 327-348.
- INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE, 2000. La mise en évidence de l'augmentation de la productivité des forêts. Vous avez dit Nature ? Dossiers thématiques.
- INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL, 1999. Département de l'Ain : résultats du troisième inventaire forestier (1995). 165 p.
- INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL, AGROPARISTECH-ENGREF. Carte du pH de surface des sols forestiers français. Disponible sur internet : <http://www.ifn.fr/spip/IMG/pdf/carte_PH_version1-formatA3.pdf>
- JACAMON M., 2001. Guide de dendrochronologie. Arbres, arbustes arbrisseaux des forêts françaises. Editions ENGREF.
- LEBOURGEOIS F., 1993. Influence d'une fertilisation minérale sur la croissance radiale des sapinières dépérissantes dans les vosges. *Revue Forestière Française*, vol. 45, p. 639-650.
- LEBOURGEOIS F., JABIOL B., 2002. Enracinements comparés du Chêne sessile, du Chêne pédonculé et du Hêtre. Réflexions sur l'autécologie des essences. *Revue Forestière Française*, vol. 54, p. 17-42.
- LEBOURGEOIS F., 2005. Approche dendroécologique de la sensibilité du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) au climat en France et en Europe. *Revue Forestière Française*, vol. 57, p 33-50.
- LEBOURGEOIS F., 2007. Autécologie des principales essences forestières françaises. Cours pour la Formation des Ingénieurs Forestiers, ENGREF.

- LEBOURGEOIS F., 2009. Fonctionnement hydrique et hydraulique des arbres. Cours pour la Formation des ingénieurs forestiers, ENGREF.
- LEBOURGEOIS F., RATHGEBER C., ULRICH E., 2010. Effet de la variabilité climatique et des événements extrêmes sur la croissance d'*Abies alba*, *Picea abies* et *Pinus sylvestris* en climat tempéré français. *Revue Forestière Française*, vol. 62, p. 7-23.
- LEBOURGEOIS F., 2010. Principes et méthodes de la dendrochronologie. AgroParisTech ENGREF.
- LEGAY M., MORTIER F., MENGIN-LECREULX P., CORDONNIER T., 2007. La gestion forestière face aux changements climatiques : tirons les premiers enseignements. *Rendez-vous techniques de l'Office National des Forêts*, hors-série n°3, p. 95-102.
- LELOU D., LI Z., MAILLOT A., VERON C., 2009. La gestion sylvicole modifie-t-elle l'économie en eau des systèmes forestiers ? Présentation du séminaire *Forêts et changements climatiques*.
- LELOU D., 2010. Les dépérissements du Pin sylvestre et du Sapin pectiné dans les Alpes-Maritimes après la canicule de 2003 : une approche spatiale de leur déterminisme. Mémoire de fin d'études de la Formation des ingénieurs forestiers, ENGREF.
- LUCOT E., GAIFFE M., 1995. Méthode pratique de description des sols forestiers caillouteux sur substrat calcaire. *Etude et gestion des sols*, vol. 1, p. 91-104.
- MÉRIAN P., LEBOURGEOIS F., 2011 (à paraître). How many trees do we need per plot to assess climate-growth relationships for temperate species ? *Canadian Journal of Forest Research*.
- METEO FRANCE. Les canicules. Les dossiers de Météo-France. Disponible sur internet : <http://comprendre.meteofrance.com/pedagogique/dossiers/phenomenes/les_canicules?page_id=10765>
- METEO01, site d'informations météorologiques dans l'Ain et sa région. Climatologie du département de l'Ain. <http://www.meteo01.fr/articles.php?lng=fr&pg=309&mnu_modecol=W>
- MINISTERE DE L'AGRICULTURE, MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT, 2001. Fiche 9150 : hêtraies calcicoles médio-européennes du Cephalanthero-fagion. Cahiers d'habitats, tome 1, vol 1.
- MINISTERE DE LA SANTE ET DES SPORTS, 2010. La canicule. Risques professionnels en PME. Disponible sur Internet : <<http://www.risques-pme.fr/les-risques-particuliers/la-canicule.aspx>>
- NIERHAUS-WUNDERWALD D., LAWRENZ P., 1997. Biologie du gui. Notice pour le praticien, Institut fédéral de recherche sur la forêt, la neige et le paysage, vol. 28.
- OFFICE NATIONAL DES FORETS. Orientations locales d'aménagement des forêts soumises non domaniales, Bugey Central – Haut Bugey. Directives locales d'aménagement des forêts domaniales.
- OTTO H.-J., 1998. Écologie forestière. Institut pour le développement forestier, 397 p.
- PAYS DU BUGÉY, CONSEIL GENERAL DE L'AIN, 2005. Avant-projet de charte forestière de territoire du Pays du Bugey. 82 p.
- PEROT T., GOREAUD F., GINISTY C., 2008. Quels modèles de croissance pour les peuplements mélangés ? Exemple du mélange chêne sessile – pin sylvestre. *Revue Forestière Française*, vol. 60, p. 215-232.
- PLAGNAT F., 1950. Le gui du sapin. *Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts*, vol. 12, p.155-231.
- PROCHASSON A., 2011. *Les rendez-vous techniques de l'ONF*. Article à paraître.
- RAMEAU J.C., MANSION D., DUME G., 1993. Flore forestière française, tome 2 : Montagnes. Institut pour le développement forestier.
- RENNENBERG H., LORETO F., POLLE A., BRILLI F., FARES S., BENIWAŁ R. S., GESSLER A., 2006. Physiological responses of forest trees to heat and drought. *Plant Biology*, vol. 8, p. 556-571.
- SUAREZ M.-L., GHERMANDI L., KITZBERGER T., 2004. Factors predisposing episodic drought-induced tree mortality in Nothofagus-site, climatic sensitivity and growth trends. *Journal of Ecology*, vol.92, p.954–966.
- VAN DER POEL P.W., 1976. Influence of environmental factors on the growth of the beech. *Catena*, vol. 3, p. 203-214.
- VAN DER WERF G., SASS KLAASSEN U., MOHREN G., 2007. The impact of the 2003 summer drought on the intra-annual growth pattern of beech (*Fagus sylvatica* L.) and oak (*Quercus robur* L.) on a dry site in the Netherlands. *Dendrochronologia*, vol. 25, p. 103-112.
- VOIRON H., JAIL M., LOUP J., MARTIN N., 1977. La sécheresse dans les Alpes du Nord en 1976. *Revue de géographie alpine*, vol. 65, n°3, p. 241-256.

Liste des contacts

Nom	Fonction	Organisme	Coordonnées
Stéphane DUMAS	Animateur sylvicole	ONF – Agence interdépartementale Ain- Loire-Rhône	stephane.dumas@onf.fr 04 74 36 53 98 ONF Résiand 01110 Aranc
André PROCHASSON	Ingénieur en charge de recherche et progrès technique	ONF – Direction territoriale Rhône-Alpes	andre.prochasson@onf.fr 04 79 69 80 92 42, Quai Charles Roissard 73026 Chambéry Cedex
Myriam LEGAY	Responsable du pôle recherche et développement	ONF – Pôle recherche et développement de Nancy	myriam.legay@onf.fr 03 83 23 45 05 bat 802 - les merises 54840 Velaine en Haye
Bruno ROLLAND	Ingénieur environnement	CRPF Rhône-Alpes	bruno.rolland@crpf.fr 04 72 53 60 90 Parc de Crécy 18, avenue du Général de gaulle 69771 St Didier au Mont d'Or
Jean LADIER	Chargé de développement technique	ONF – Direction territoriale Méditerranée – Pôle recherche et développement	jean.ladier@onf.fr 04 92 70 48 04 Actiplus ZI Saint-Joseph 04100 Manosque
Eric LUCOT	Pédologue	Université de Franche- Comté	eric.lucot@univ-fcomte.fr 03 81 66 57 82 Laboratoire Chrono-Environnement UMR 6249 Université de Franche-Comté-CNRS Usc INRA Place Leclerc 25000 Besançon

Glossaire

ACP (analyse en composantes principales) : méthode statistique permettant de décrire un jeu de données issu d'observations. La représentation des unités permet de voir s'il existe une structure dans cet ensemble d'unités. La représentation des variables permet d'observer les liens qui existent entre ces variables (corrélations).

Anomalie : différence entre une valeur mesurée à un instant t et une valeur moyenne calculée sur une période de référence. Les anomalies de température ou de précipitations permettent de situer le climat d'une année par rapport au climat moyen, le plus souvent mesuré sur 30 ans.

Arrière-effet : effet du climat d'une année sur l'accroissement des années qui suivent.

Biais : erreur systématique des résultats d'une étude, généralement due au protocole employé.

Bilan hydrique : partition de l'eau qui a pénétré dans un sol. Le bilan considère des entrées (précipitations, apports latéraux), des sorties (évaporation, transpiration, drainage, ruissellement) et des stocks (réserve utile du sol).

Bilan hydrique climatique : Bilan hydrique résultant uniquement des composantes climatiques (précipitations et évapotranspiration du peuplement).

Cavitation : phénomène de rupture de la colonne d'eau dans les vaisseaux conducteurs. La cavitation le plus souvent est due à une demande atmosphérique en eau supérieure à l'offre du sol (situation de sécheresse).

Chronologie moyenne : série des largeurs de cernes mesurées en millimètres et issues de la moyenne de l'ensemble des largeurs de cernes de l'échantillon mesurées pour une année n .

Chronologie maîtresse : série des indices de croissance issus de la moyenne de l'ensemble des indices de croissance de l'échantillon calculés pour une année n .

Corrélation : lien statistique qui peut exister entre deux variables. La corrélation peut être positive si les deux variables évoluent dans le même sens, négative si les deux variables évoluent en sens opposés.

Dépérissement : phénomène complexe, étalé dans le temps, se traduisant par un affaiblissement général de la vigueur des arbres et des peuplements

ETP (évapotranspiration potentielle) : quantité d'eau perdue au niveau d'un couvert végétal de référence par évaporation du sol et transpiration du peuplement. L'ETP ne dépend que des paramètres climatiques (principalement température et rayonnement).

ER (écart relatif de croissance) : variation de la croissance radiale calculée par rapport à une croissance de référence (exemple : croissance moyenne des 10 dernières années).

Fonction de corrélation : modèle statistique linéaire susceptible de prédire les paramètres mensuels du climat intervenant dans les variations d'épaisseur du cerne annuel.

IC (indice de croissance) : rapport entre la largeur de cerne mesurée et une largeur de cerne de référence issue de la standardisation.

Interdatation : étape de l'analyse dendrochronologique visant à corriger les erreurs de mesure par comparaison de chaque série à une chronologie de référence issue de la moyenne de l'ensemble des séries de l'échantillon.

LAI (indice de surface foliaire) : rapport entre la surface totale supérieure des feuilles et la surface du sol sur laquelle la végétation se développe.

Modèle climatique : modèle statistique visant à quantifier les paramètres climatiques en tout point d'un territoire donné, par interpolation des données climatiques mesurées de postes météorologiques et intégration de données de terrain (topographie, altitude...).

Normale : moyenne climatique calculée sur une période de référence passée de 30 ans.

Potentiel hydrique : pression qu'il faudrait appliquer à un compartiment (sol, vaisseau conducteur, surface foliaire, atmosphère) pour en extraire l'eau qu'il contient.

Produit accidentel : Arbre dont l'exploitation est rendue nécessaire par son état sec, cassé, foudroyé ou renversé.

Région de provenance : zone géographique dans laquelle les conditions écologiques homogènes supposent une certaine homogénéité génétique.

Régulation stomatique : régulation des pertes en eau liées à la transpiration par fermeture des stomates. Ce phénomène intervient lorsque l'arbre est en situation de stress hydrique.

RU (Réserve utile) : fraction de la réserve en eau du sol disponible pour les plantes, car accessible par les racines et peu liée aux particules solides du sol.

RUM (Réserve utile maximale) : réserve utile maximale que peut contenir le sol.

Sempervirent : se dit des végétaux dont les feuilles restent fonctionnelles pendant plusieurs saisons de végétation.

Sensibilité : faculté plus ou moins grande d'une végétation à résister à une agression externe.

Standardisation : étape de l'analyse dendrochronologique visant à séparer le signal que l'on cherche à étudier des « bruits de fond » associés (par exemple l'effet de l'âge).

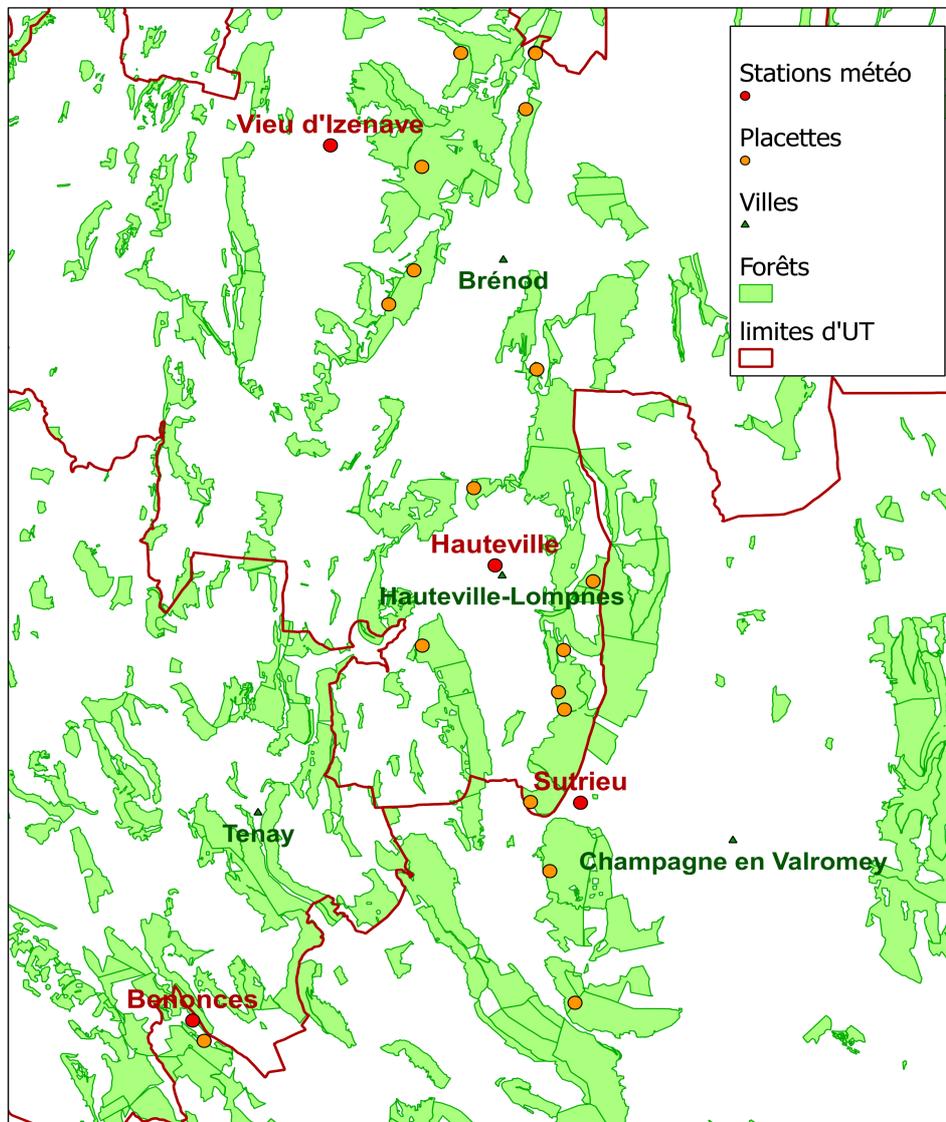
Table des annexes

Annexe 1 : Données climatiques disponibles sur le Bugey.....	70
Annexe 2 : Inventaire IFN pour la région forestière Bugey central	74
Annexe 3 : Description des stations 5.6 et 5.7 du guide Alpes du Nord et montagnes de l'Ain	75
Annexe 4 : Légende et définition des variables mesurées	77
Annexe 5 : Distribution des variables mesurées	80
Annexe 6 : Caractéristiques des placettes	85
Annexe 7 : Hypothèses testées.....	86
Annexe 8 : Chronologies moyennes complètes	87
Annexe 9 : Paramètres statistiques utilisés en dendrochronologie	90
Annexe 10 : Tableaux de résultats des corrélations simples.....	91
Annexe 11 : Tests statistiques utilisés dans l'analyse.....	94
Annexe 12 : Retour à la croissance initiale par groupe.....	96

Annexe 1 : Données climatiques disponibles sur le Bugey

Carte de localisation et caractéristiques des stations Météo-France

Stations MétéoFrance à proximité de la zone d'étude



Station : **BENONCES**
 Numéro : 01037001
 Coordonnées : X 844 300 000
 Y 2 100 700 000
 Altitude : 950 m
 Période : 1990 - 2010

Station : **VIEU D'IZENAVE**
 Numéro : 01441001
 Coordonnées : X 848 100 000
 Y 2 126 300 000
 Altitude : 615 m
 Période : 1990 - 2010

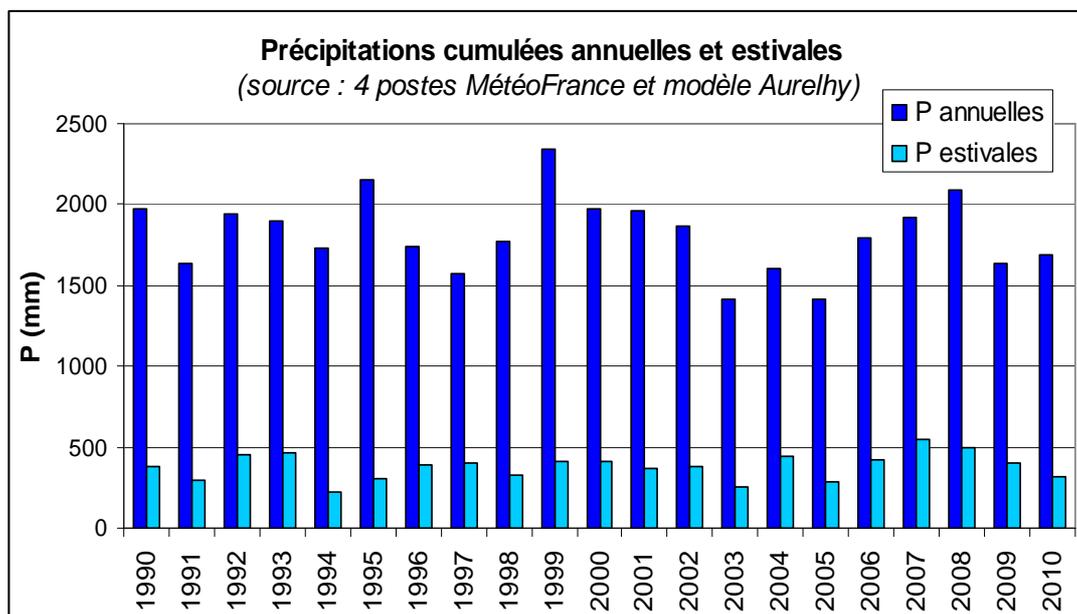
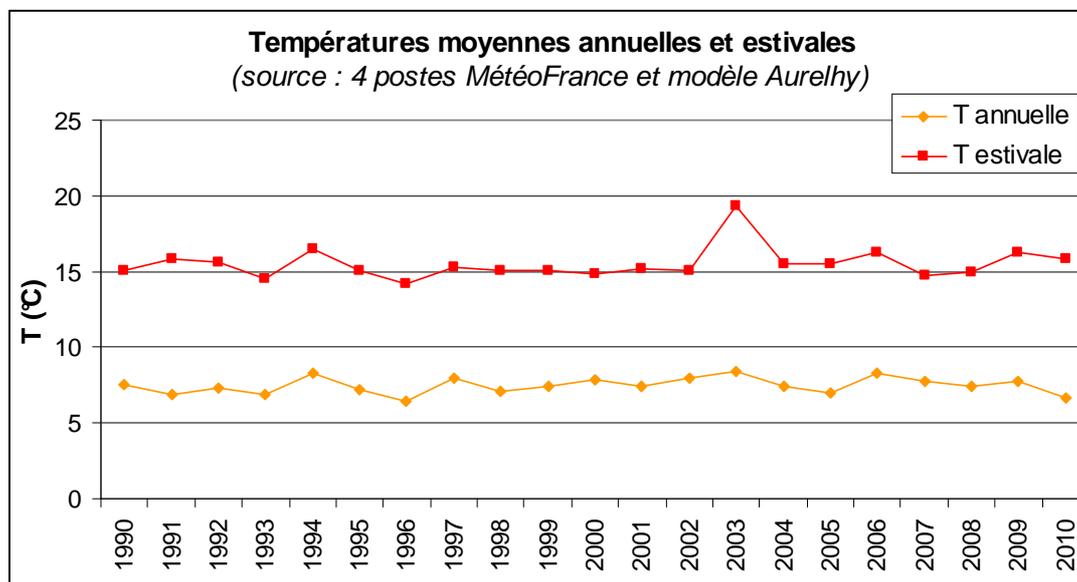
Station : **SUTRIEU**
 Numéro : 01414001
 Coordonnées : X 855 000 000
 Y 2 107 100 000
 Altitude : 878 m
 Période : 2002 - 2010

Station : **HAUTEVILLE-LOMPNES**
 N° : 1185004
 Coordonnées : X 852 600 000
 Y 2 114 100 000
 Altitude : 805 m
 Période : 1990 - 2010

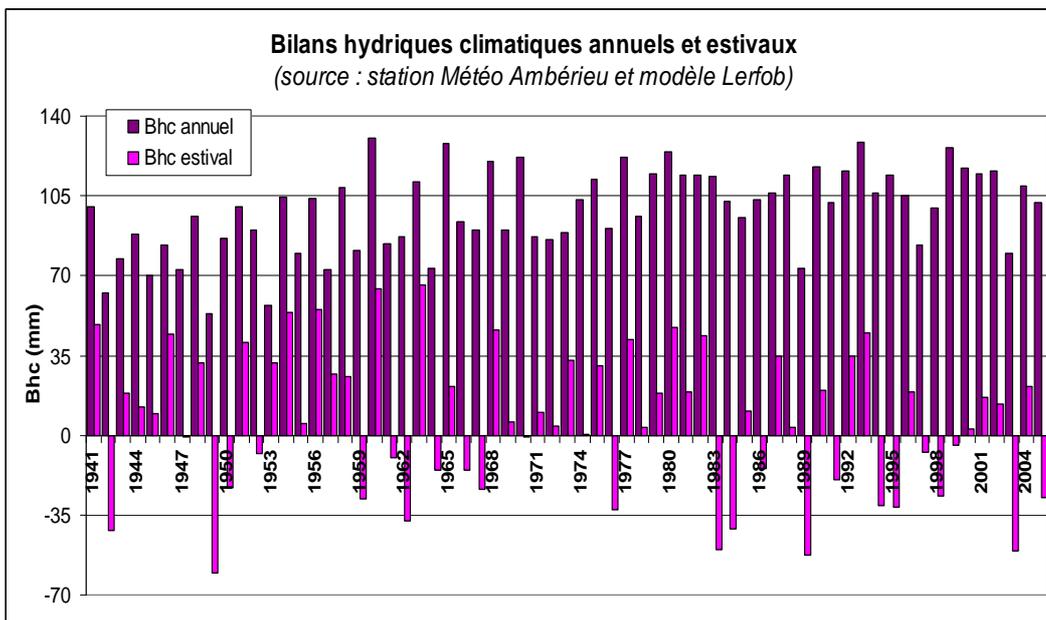
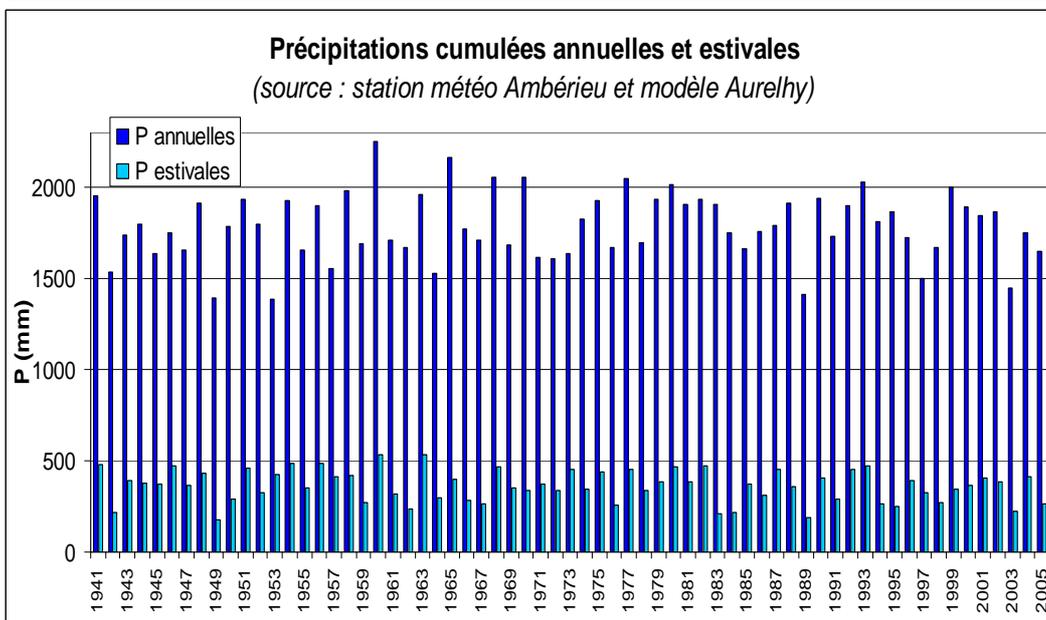
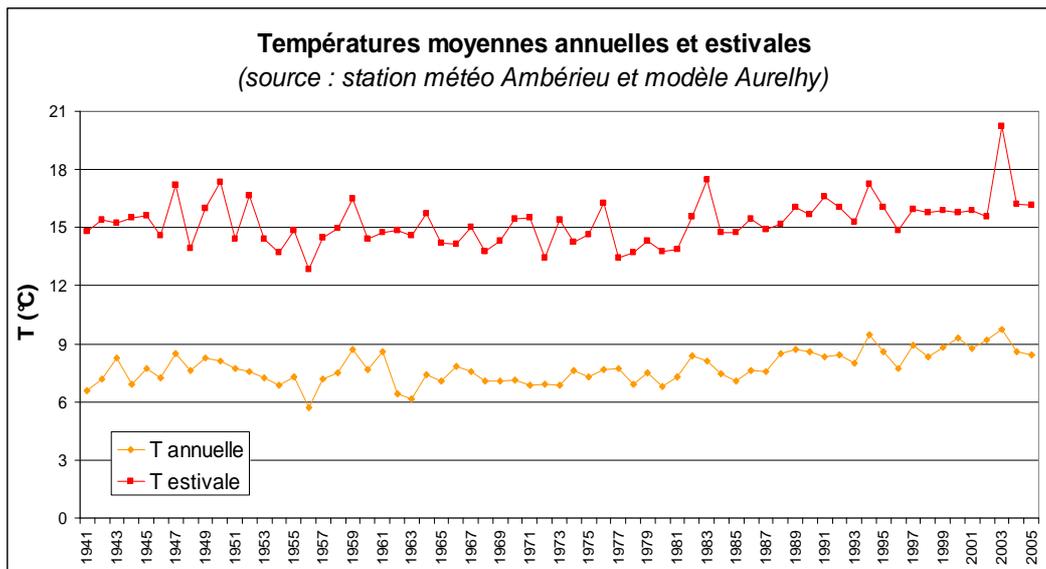
Données climatiques

Les graphiques qui suivent donnent les valeurs moyennes des paramètres climatiques sur l'ensemble des placettes de l'étude. La période estivale correspond aux mois de Juin, Juillet et Août.

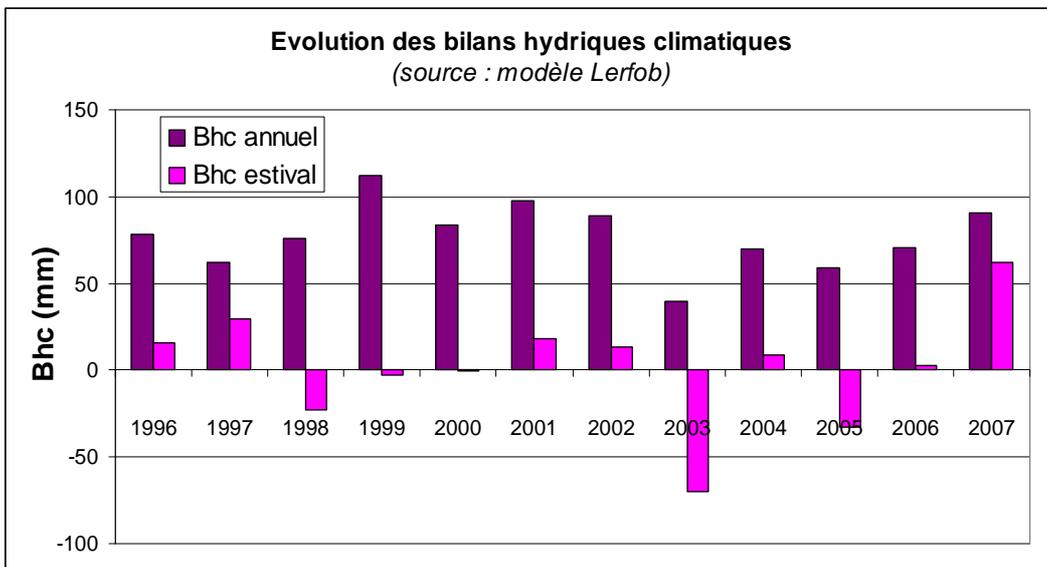
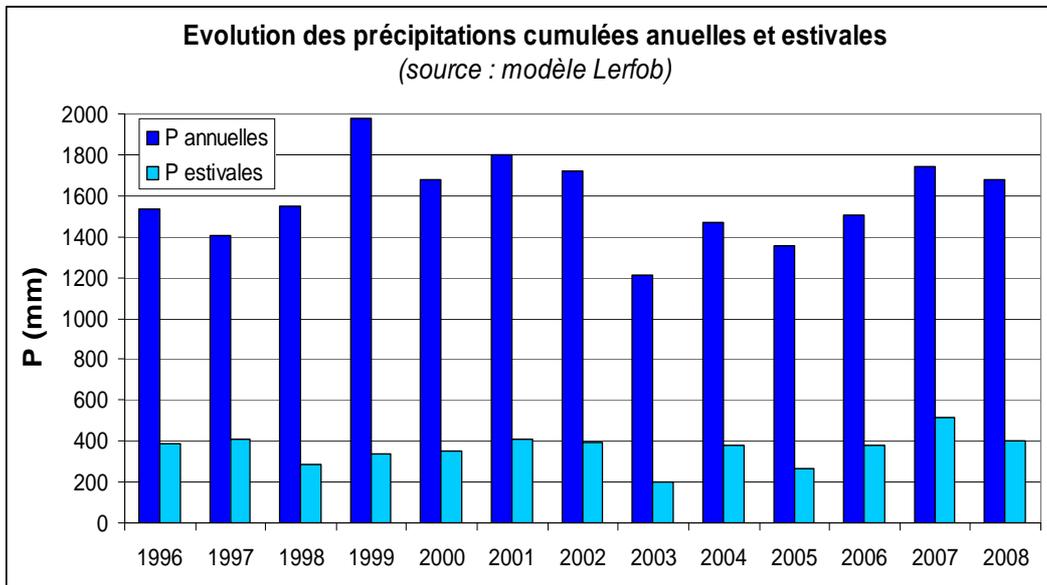
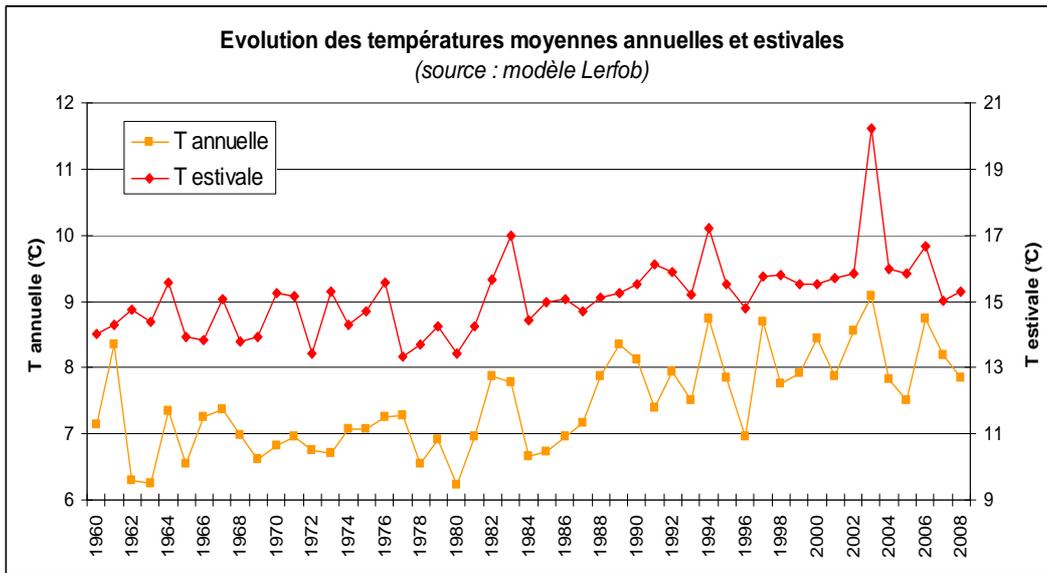
-Postes Météo-France de la zone d'étude



-Poste Météo-France d'Ambérieu-en-Bugey



-Modèle climatique du Lerfob



Annexe 2 : Inventaire IFN pour la région forestière Bugey central

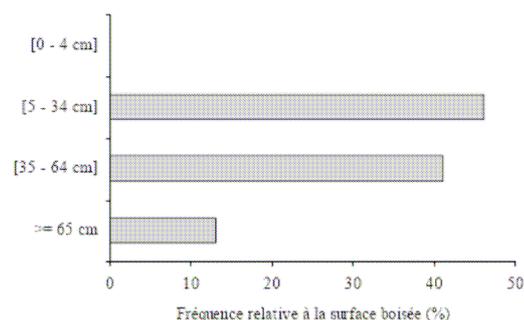
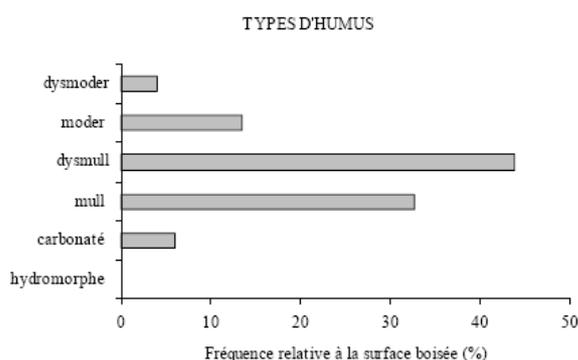
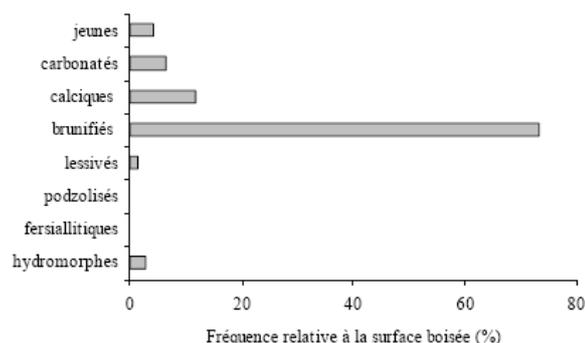
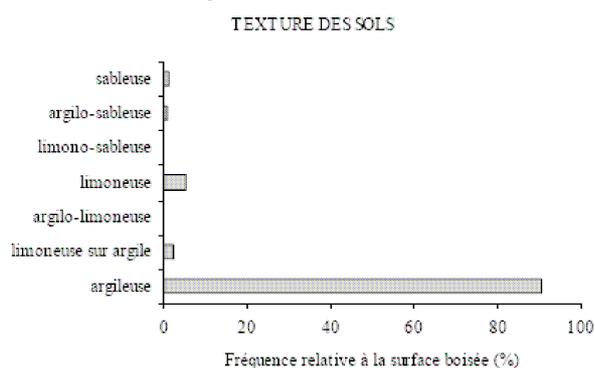
Types de peuplement et surfaces

Type de peuplement	Forêt soumise (ha)	Forêt privée (ha)	Total (ha)
Sapinières-pessières et pessières d'altitude	6 034	3 050	9 084
Jeunes sapinières-pessières	750	686	1 436
Futaies mixtes résineux-feuillus	6 811	3 728	10 539
Mélanges pins-feuillus	26	40	66
Chênaies mésophiles	645	428	1 073
Mélanges futaies-taillis de hêtre	1 907	3 586	5 493
Chênaies thermophiles	115	22	137
Boisements morcelés	38	1 623	1 661
Accrus et peuplements hygrophiles	192	1 397	1 589
Bosquets et boqueteaux		471	471
<i>Total surface des forêts de production</i>	16 518	15 031	31 549
Formations boisées autres que de production	500	301	801
<i>Total boisé de la région forestière</i>	17 018	15 332	32 350

Types de structure forestière et surfaces (ha)

Bugey central Structure forestière élémentaire	2 ^e inventaire			3 ^e inventaire		
	soumis	privé	total	soumis	privé	total
Futaie feuillue	1 022	2 323	3 345	3 745	3 164	6 909
Futaie conifères	11 153	8 193	19 346	9 747	7 430	17 177
<i>Total futaie</i>	12 175	10 516	22 691	13 492	10 594	24 086
Mélange futaie feuillue et taillis	1 606	2 107	3 713	1 009	1 575	2 584
Mélange futaie conifère et taillis	1 324	503	1 827	791	661	1 452
<i>Total mélange futaie-taillis</i>	2 930	2 610	5 540	1 800	2 236	4 036
<i>Total taillis</i>	875	2 790	3 665	1 226	2 201	3 427
<i>Total général</i>	15 980	15 916	31 896	16 518	15 031	31 549

Répartition des surfaces forestières selon différents critères édaphiques



Annexe 3 : Description des stations forestières 5.6 et 5.7 du guide de stations Alpes du Nord et montagnes de l'Ain

Hêtraies-sapinières drainées

5.6

LOCALISATION

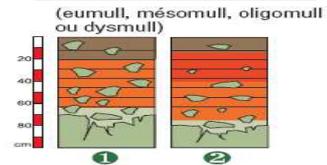
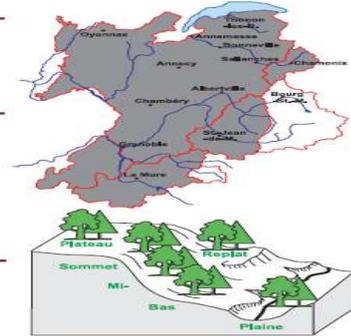
- Dans les secteurs externes ou intermédiaires.
- Entre 700 et 1550 m d'altitude.
- Sur plateaux, replats, ou pentes de toutes formes.
- Fréquente et pouvant couvrir plusieurs hectares.

ESSENCES ET PEUPELEMENTS

- **Formation végétale potentielle** : hêtraie-sapinière, mélangée d'épicéas ou d'érables sycomores.
- **Peuplements observés** : futaie, mélange futaie-taillis ou, plus rarement, taillis (Hêtre).
- **Principaux sylvo-faciés** : peuplements purs et réguliers d'épicéas, de sapins ou de hêtres. Certaines pessières sont des phases dynamiques (accrus).

SOLS ET SUBSTRATS

- **Humus** : feuilles, débris de bois... (OL), pouvant présenter un niveau à fragments et matières fines (OF), disposés sans transition sur un horizon organo-minéral foncé (A), grumeleux (agrégats arrondis).
- **Sol** : horizons bruns structurés (agrégats polyédriques), à texture équilibrée (sables, limons et argiles).
- **Profil évolué « brunifié »** : l'altération engendre des argiles et des oxydes de fer.
- **Principaux matériaux** : calcaires massifs, calcaires marneux, calcschistes, gneiss, micaschistes, amphibolites, grès, conglomérats, ou anciens dépôts stabilisés (moraines, éboulis, colluvions...).



PLANTES CARACTÉRISTIQUES



- Flore essentiellement **mésophile**.
- Présence de plantes **acidoclines** (GE.14 : Ronce des bois, luzules, Grande Fétuque, Millet diffus, Houlique molle...) ou **neutroclines** (GE.15 : Gaillet odorant, Orge d'Europe, Laïche des bois, Mélèque uniflore, Framboisier...).
- Présence possible, mais toujours avec un faible recouvrement, de plantes neutrocalcicoles (GE.16 : Mercuriale pérenne, cardamines...).

VARIANTES

- 1 Sol brun : hêtraie-sapinière à Orge d'Europe (flore neutro-calcicline).
- 2 Sol brun acide ou ocreux : hêtraie-sapinière à Véronique à feuilles d'ortie et Prénanthe (flore acidocline).

RISQUES DE CONFUSION

- avec les US 5.5 ou 5.7 développées sur sols frais (argileux ou profonds) ;
- avec l'US 6.3 continentale (Alpes internes).

Alpes du Nord et montagnes de l'Ain - 09/2016

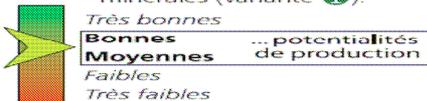
MONTAGNARD EXTERNE

81

5.6

CROISSANCE DES ARBRES : CONTRAINTES ET AVANTAGES DE LA STATION

- Durée de la saison de végétation satisfaisante ;
- Alimentation en eau satisfaisante, mais limitée certaines périodes ;
- Bonne disponibilité en éléments nutritifs et bases minérales (variante 1).



- Faible disponibilité en bases minérales (variante 2).

Stations du montagnard externe, mésophiles, neutres à assez acides

Très sec						
Sec						
Drainé			2	1		
Frais						
Assez humide						
Humide						
Inondé						
Milieu	Très acide	Acide	Assez acide	Peu acide	Neutre	Calcaire

CHOIX DES ESSENCES

ESSENCES PRINCIPALES	ESS. D'ACCOMPAGNEMENT
Hêtre	Érable sycomore
Sapin pectiné	Érable plane (c)
Épicéa commun	Frêne commun
-----	Merisier
Mélèze d'Europe (a)	Bouleau, Tremble
Mélèze hybride (a)	Sorbier des oiseleurs
Douglas (a) (b)	Saules
	Pin sylvestre

OBSERVATIONS
 (a) possible en reboisement ou enrichissement ; la prise en compte de la région de provenance des plants (ou graines) est impérative.
 (b) sauf présence de calcaire en profondeur (variante 1).
 (c) uniquement jusqu'à 1100 m.
 L'accentuation du réchauffement climatique limitera l'adaptation de l'Épicéa commun dans les stations de basses altitudes.

ENJEUX / GESTION ET SYLVICULTURE

ENJEUX	ELEMENTS ET RECOMMANDATIONS
PRODUCTION <ul style="list-style-type: none"> • Bois d'œuvre de bonnes qualités (résineux et feuillus). • Régénération naturelle concurrencée (ronces, épilobes...). • Acidification des humus (2). 	<ul style="list-style-type: none"> • Travailler au profit des arbres de qualité. • Éviter les ouvertures importantes. • Favoriser le mélange des essences (2). • Maintenir des essences feuillues (2). • Conserver des épicéas de qualité (dynamique importante du Sapin et du Hêtre).
PROTECTION <ul style="list-style-type: none"> • Protection contre les avalanches, chutes de blocs ou les glissements de terrain. 	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenir l'état boisé. • Favoriser un peuplement stable (essences et structure). • Rajeunir par petites trouées, en exploitant les gros bois. • Se référer au « Guide des Sylvicultures de Montagne ».
ENVIRONNEMENT <ul style="list-style-type: none"> • Correspondance avec les habitats des : <ol style="list-style-type: none"> 1 hêtraies, hêtraies-sapinières calciclines à Orge d'Europe [9130-9] ; 2 hêtraies, hêtraies-sapinières acidoclines à Millet diffus [9130-7]. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se référer aux « Cahiers d'habitats » ou, en site NATURA 2000, au « Document d'objectifs ». • Habitat de la Buxbaumie verte, du Sabot de Vénus, de la Rosalie des Alpes et du Lucane Cerf-volant.

82

Alpes du Nord et montagnes de l'Ain - 09/2016

LOCALISATION

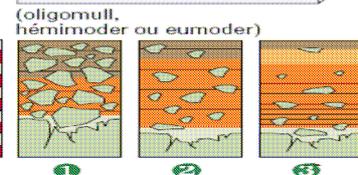
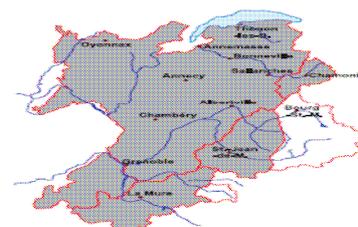
- Dans les secteurs externes ou intermédiaires.
- Entre 700 et 1550 m d'altitude.
- Sur plateaux, replats, ou pentes de toutes formes.
- Fréquente et pouvant couvrir plusieurs hectares.

ESSENCES ET PEUPELEMENTS

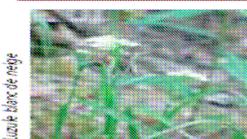
- **Formation végétale potentielle** : hêtraie-sapinière, mélangée d'épicéas ou d'érables sycomores.
- **Peuplements observés** : futaie, mélange futaie-taillis ou, plus rarement, taillis (Hêtre).
- **Principaux sylvofaciès** : peuplements purs et réguliers d'épicéas, de sapins ou de hêtres. Certaines pessières sont des phases dynamiques (accrus).

SOLS ET SUBSTRATS

- **Humus** : feuilles, débris de bois... (OL), fragments et matières fines (OF), pouvant reposer sur un niveau noir (OH), disposés progressivement sur un horizon organo-minéral (A), peu épais (quelques cm) et sans agrégats arrondis nets.
- **Sol** : horizons bruns (argiles et oxydes de fer) structurés (agrégats polyédriques), à texture à dominante limoneuse.
- **Profil** évolué « brunifié », pouvant être lessivé ou appauvri (entraînement des argiles et oxydes en profondeur ou hors du profil).
- **Principaux matériaux** : calcaires massifs, calcaires marneux, calcschistes, gneiss, micaschistes, amphibolites, grès, conglomérats, ou anciens dépôts stabilisés (moraines, éboulis, colluvions...).



PLANTES CARACTÉRISTIQUES



Luzule blanc de neige

- Flore essentiellement **mésohydrocline** (GE.6) ou **mésophile**.
- Présence de plantes **acidoclines** (GE.14 : Ronce des bois, Luzules, Grande Fétuque, Millet diffus, Houlque molle...) ou **neutroclines** (GE.15 : Gaillard odorant, Orge d'Europe, Laiche des bois, Mélèque uniflore, Framboisier...).
- Présence possible, mais toujours avec un faible recouvrement, de plantes acidiphiles (GE.13 : Myrtille, Mélampyre des prés, Mélampyre des forêts...), ou de plantes neutroclinales (GE.16 : Mercuriale pérenne, cardamines...).

VARIANTES

- 1 Sol pierreux et humifère : hêtraie-sapinière à cardamines.
- 2 Sol aéré limoneux : hêtraie-sapinière à Millet diffus et Ronce des bois.
- 3 Sol lessivé (surface), tassé en profondeur : hêtraie-sapinière à Luzules et Grande Fétuque.

RISQUES DE CONFUSION

- avec les US 5.5 ou 5.6 développées sur des terrains drainés ;
- avec l'US 6.3 continentale (Alpes internes).

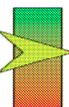
MONTAGNARD EXTERNE

5.7

CROISSANCE DES ARBRES : CONTRAINTES ET AVANTAGES DE LA STATION



- Durée de la saison de végétation satisfaisante ;
- Bonne alimentation en eau ;
- Bonne disponibilité en éléments nutritifs (variantes 1 et 2).



Très bonnes
Bonnes ... potentialités
Moyennes de production
Faibles
Très faibles



- Faible disponibilité en bases minérales (variante 3).

Stations du montagnard externe, mésohydroclines, neutres à assez acides

Très sec						
Sec						
Draine						
Frais						
Assez humide						
Humide						
Inondé						
Milieu	Très acide	Acide	Assez acide	Peu acide	Neutre	Calcaire

CHOIX DES ESSENCES

ESSENCES PRINCIPALES :

- Hêtre
- Sapin pectiné
- Épicéa commun
-
- Mélèze d'Europe (a)
- Mélèze hybride (a)
- Douglas (a) (b)

ESS. D'ACCOMPAGNEMENT

- Érable sycamore
- Érable plane (c)
- Orme des montagnes
- Tilleul à petites feuilles (c)
- Frêne commun
- Merisier
- Bouleau, Tremble
- Sorbier des oiseleurs
- Pin sylvestre

OBSERVATIONS

- (a) possible en reboisement ou enrichissement ; la prise en compte de la région de provenance des plants (ou graines) est impérative.
- (b) sauf présence de calcaire en profondeur (variante 1).
- (c) uniquement à jusqu'à 1100 m.
- L'accentuation du réchauffement climatique limitera l'adaptation de l'Épicéa commun sur sols pierreux de basses altitudes (variante 1).

ENJEUX / GESTION ET SYLVICULTURE

ENJEUX

- Bois d'œuvre de bonnes qualités (résineux et feuillus).
- Terrain sensible au tassement (2 et 3).
- Régénération naturelle concurrencée (ronces, sénéçons, épilobes...).
- Acidification des humus (3).

PRODUCTION

- Protection contre les avalanches, chutes de blocs ou les glissements de terrain.

PROTECTION

ENVIRONNEMENT

- Correspondance avec les habitats des :
 - 1 sapinières-hêtraies à Dentaire pennée [9130-12] ;
 - 2 hêtraies, hêtraies-sapinières acidoclines à Millet diffus [9130-7] ;
 - 3 hêtraies du Luzulo-Fagetum [9110-2 et 9110-3].

ELEMENTS ET RECOMMANDATIONS

- Travailler au profit des arbres de qualité.
- Limiter la circulation des engins (2 et 3).
- Éviter les ouvertures importantes.
- Favoriser le mélange des essences (3).
- Maintenir des essences feuillues (3).
- Conserver des épicéas de qualité (dynamique importante du Sapin et du Hêtre).
- Maintenir l'état boisé.
- Favoriser un peuplement stable (essences et structure)
- Rajeunir par petites trouées, en exploitant les gros bois.
- Se référer au « Guide des Sylvicultures de Montagne ».
- Se référer aux « Cahiers d'habitats » ou, en site NATURA 2000, au « Document d'objectifs ».
- Habitat de la Buxbaumie verte, du Sabot de Vénus (1 et 2), de la Rosalie des Alpes et du Lucané Cerf-volant.

Annexe 4 : Légende et définition des variables mesurées

Les codes qui suivent correspondent à ceux utilisés dans les fichiers informatiques. Toutes les données correspondantes sont géoréférencées.

Légende de la table relative aux placettes

N_Placette : numéro de placette. 1 à 18
X : coordonnée X en Lambert II étendu
Y : coordonnée Y en Lambert II étendu
Z : altitude (m)

Massif : nom du massif forestier
N_parcelle : numéro de parcelle
D_placette : diamètre de la placette, correspondant à la distance entre les 2 arbres carottés les plus éloignés (m)

Topo : position topographique selon la codification de l'IFN

Conf : confinement

- 0 : nul
- 1 : faible
- 2 : moyen
- 3 : fort

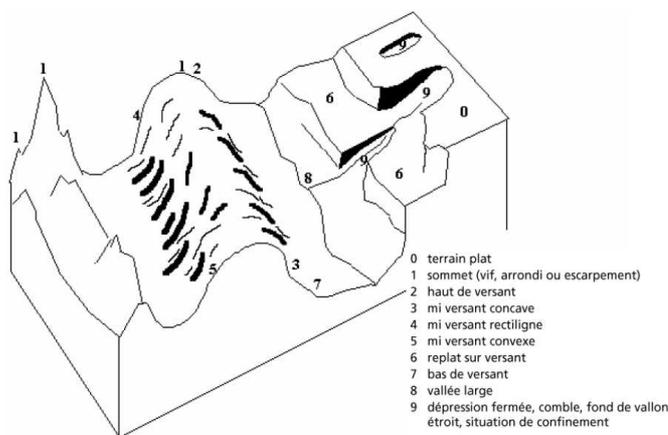
Expo : exposition (radian)

Pente : pente (%)

Gtotal : surface terrière totale en moyenne de 3 points de relevé (m²/ha)

Gsap : surface terrière en sapin en moyenne de 3 points de relevé (m²/ha)

Ghet : surface terrière en hêtre en moyenne de 3 points de relevé (m²/ha)



PB_sap : proportion de Petits Bois (17.5cm < d < 27.5cm) de sapin, en moyenne de 3 points de relevé, en % du nombre total de bois de sapin

BM_sap : proportion de Bois Moyens (27.5cm < d < 47.5cm) de sapin, en moyenne de 3 points de relevé, en % du nombre total de bois de sapin

GB_sap : proportion de Gros Bois (d > 47.5cm) de sapin, en moyenne de 3 points de relevé, en % du nombre total de bois de sapin

PB_het : proportion de Petits Bois (17.5cm < d < 27.5cm) de hêtre, en moyenne de 3 points de relevé, en % du nombre total de bois de hêtre

BM_het : proportion de Bois Moyens (27.5cm < d < 47.5cm) de hêtre, en moyenne de 3 points de relevé, en % du nombre total de bois de hêtre

GB_het : proportion de Gros Bois (d > 47.5cm) de hêtre, en moyenne de 3 points de relevé, en % du nombre total de bois de hêtre

Type_peupl : type de peuplement

dp_... : selon la topologie des Futaies Résineuses Jardinées du Deuxième Plateau et des Pentas Intermédiaires du Massif Jurassien dans le cas de peuplements avec G résineux > 70% G

fi_... : selon la typologie Feuillus Irréguliers de Franche-Comté dans le cas de peuplements avec G feuillus > 30% G

Type_peupl_amgt : type de peuplement figurant sur la carte de l'aménagement courant

Humus : type d'humus déterminé selon la clé utilisée par l'IFN (d'après Jabiol) et codifié selon la même clé

Materiau : code de la couche géologique correspondante relevée sur la carte géologique vectorisée harmonisée (InfoTerre). Les différents matériaux sont regroupés en 3 classes.

- 1 : calcaires durs
- 2 : calcaires argileux et marnes
- 3 : éboulis et calcaires à débit en plaquettes

Pendage : pendage de la couche géologique relevé sur la carte géologique BRGM de Saint Rambert en Bugey, de Nantua (codé en X_n, X exposition, n degré de pendage)

Affleurement : proportion de l'affleurement rocheux selon la codification de l'IFN (table de 0 à 10)

Prof_sol_max : profondeur de sol maximale relevée à la tarière à vis (cm)

Prof_sol_moy : profondeur de sol relevée à la tarière à vis en moyenne sur un minimum de 3 relevés (cm)

Cause_arret : cause d'arrêt du sondage à la tarière à vis, selon la nomenclature de l'IFN (table de 0 à 10)

- 2 : sur cailloux
- 3 : sur compacité

Pierrosite : pierrosité moyenne du profil, codifié selon la nomenclature IFN

Vol_sol : volume de sol prospectable par les racines pour une surface de 1m².

$$\text{Vol_sol (m}^3/\text{m}^2) = \text{Prof_sol_max (m)} \times (1 - \text{Pierrosite (\%)})$$

Type_sol : type de sol déterminé à partir de la clé IFN et codé selon la même typologie

- 15 : lithosol sur éboulis
- 22 : sol humocalcique
- 23 : rendzine humifère
- 26 : rendzine brunifié
- 32 : sol brun calcique
- 33 : sol brun
- 34 : sol brun acide
- 42 : sol brun lessivé

Classe_sol : classe de sol déterminée selon le volume de sol prospectable et validée par ACP

- 1 : sols superficiels riches en éléments grossiers
- 2 : sols peu profonds avec une charge en éléments grossiers moyenne
- 3 : sols profonds à faible charge en éléments grossiers

D_moy_sap : diamètre moyen des 3 sapins sélectionnés sur la placette (cm)

D_et_sap : écart-type du diamètre des 3 sapins sélectionnés sur la placette

D_moy_het : diamètre moyen des 3 hêtres sélectionnés sur la placette (cm)

D_et_het : écart-type du diamètre des 3 hêtres sélectionnés sur la placette

H_moy_sap : hauteur moyenne des 3 sapins sélectionnés sur la placette (m)

H_et_sap : écart-type de la hauteur des 3 sapins sélectionnés sur la placette

H_moy_het : hauteur moyenne des 3 hêtres sélectionnés sur la placette (m)

H_et_het : écart-type de la hauteur des 3 hêtres sélectionnés sur la placette

Age_moy : âge moyen des 6 arbres carottés sur la placette (ans)

Age_moy_het : âge moyen des 3 hêtres carottés sur la placette (ans)

Age_moy_sap : âge moyen des 3 sapins carottés sur la placette (ans)

H100_moy : Hauteur dominante à 100 ans, moyennée pour les 3 sapins de la placette, calculée à partir des tables de production des Alpes du Nord (m)

CODE	LIBELLE
10	Mor
21	Dysmoder
20	Moder
22	Hémi-moder
42	Amphimull
30	Dysmull
31	Oligomull
40	Mésomull
50	Eumull
15	Mor carbonaté
25	Moder carbonaté
45	Mull carbonaté épais
55	Mull carbonaté
18	Hydromor
28	Hydromoder
48	Hydromull
81	Anmoor
80	Tourbe
99	Autre ou absence

CODE	LIBELLE
0	0 ≤ valeur < 5%
1	5% ≤ valeur < 15%
2	15% ≤ valeur < 25%
3	25% ≤ valeur < 35%
4	35% ≤ valeur < 45%
5	45% ≤ valeur < 55%
6	55% ≤ valeur < 65%
7	65% ≤ valeur < 75 %
8	75% ≤ valeur < 85%
9	85% ≤ valeur < 95%
10	95% ≤ valeur < 100%

Mortalites : arbres morts présents sur la placette, codé

0 : pas d'arbres morts sur la placettes

ou X_Y

X=1 si l'arbre mort est un sapin

X=2 si l'arbre mort est un hêtre

Y : stade de décomposition de l'arbre (d'après protocole MEDD)

1 écorce présente sur tout le tronc

2 écorce présente sur plus de 50% de la surface

3 écorce présente sur moins de 50% de la surface

4 absence d'écorce

PA_ess : essences des produits accidentels martelés entre 1995 et 2009

0 : pas de produits accidentels martelés

1 : sapin

2 : hêtre

PA_nbtiges : nombre de tiges marquées en produits accidentels sur la période 1995 - 2009

PA_vol : volume marqué en produits accidentels sur la période 1995 - 2009 (m3/ha)

Stat_amgt : station figurant dans l'aménagement, codé

orl_hb_n si issu de l'ORLAM Bugey Central Haut Bugey

ana_n si issu du catalogue Alpes du Nord Montagnes de l'Ain

Stat_ana : station équivalente dans le catalogue Alpes du Nord Montagnes de l'Ain

Légende de la table relative aux carottes

N_Placette : numéro de placette. 1 à 18

N_carotte : numéro de carotte, codé N.n (N : numéro de placette, n : numéro de carotte. 1 à 6)

Essence : S : Sapin pectiné, H : Hêtre commun

D : Diamètre de l'arbre (cm)

H : Hauteur de l'arbre (m)

H_houp_amont : Hauteur de la base du houppier en amont (m)

H_houp_aval : Hauteur de la base du houppier en aval (m)

D_houp_amont : Diamètre du houppier en amont (m)

D_houp_aval : Diamètre du houppier en aval (m)

Branches_mortes : % de branches mortes, selon la codification de l'IFN

0 : absence

1 : 1 à 5%

2 : 5 à 25%

3 : 25 à 50%

4 : 50 à 95%

5 : >95%

Gui : abondance de gui, selon la classification de l'IFN

0 : absence

1 : présence (1 à 2 boules)

2 : présence significative (3 à 5 boules)

3 : présence forte (>5 boules)

Nb_cernes : nombre de cernes mesurés sur la carotte, à 1,30m du sol (ou âge de l'arbre)

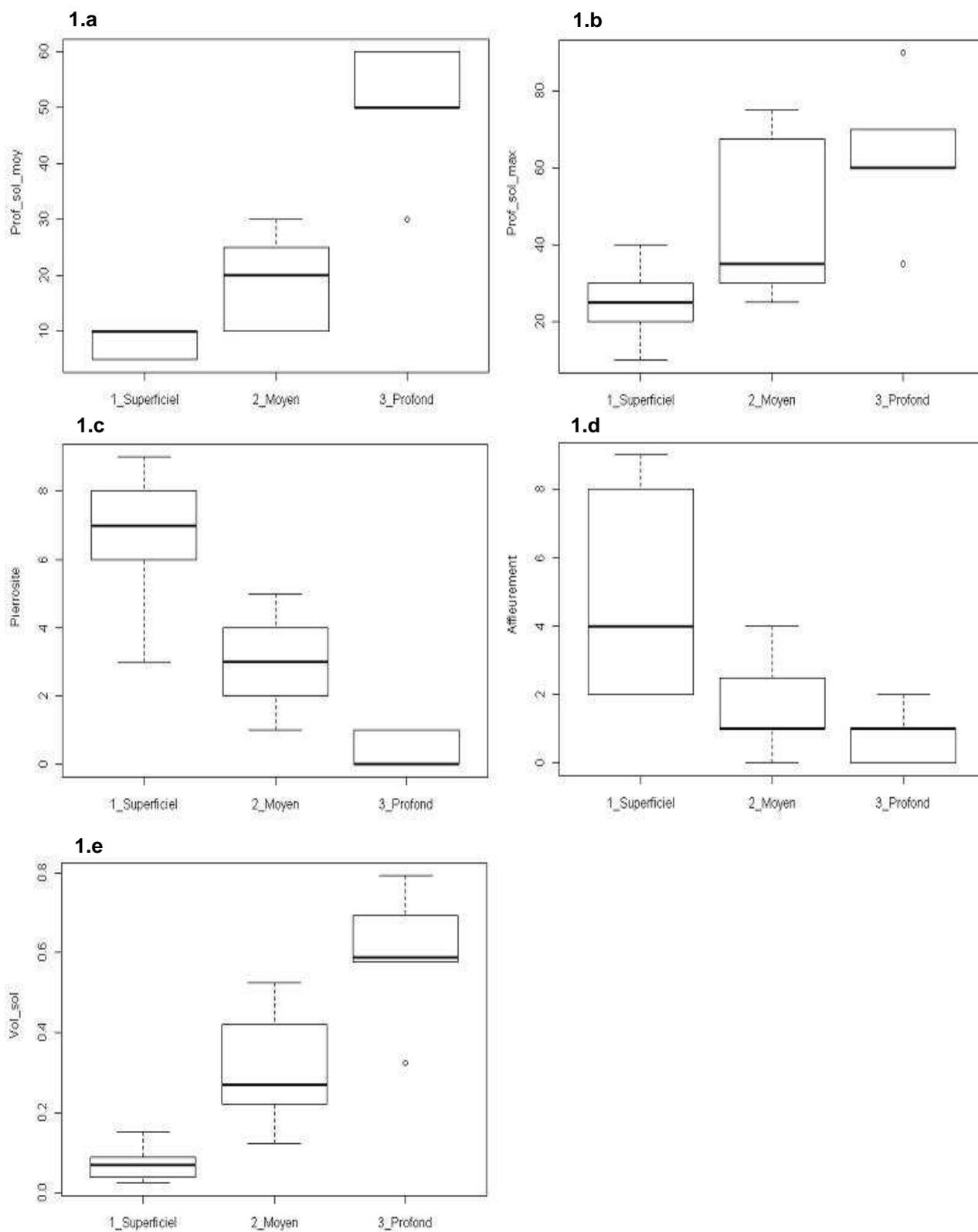
H100 : Hauteur dominante à 100 ans, calculée à partir des tables de production des Alpes du Nord (m)

Commentaires : commentaires variés sur l'arbre (blessure, présence importante de lichen...)

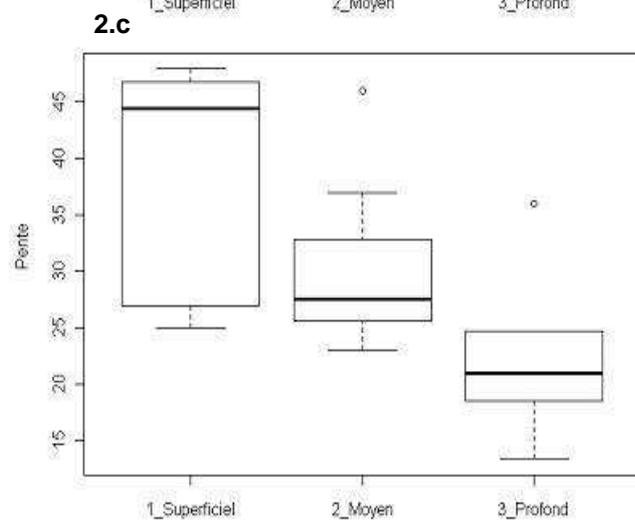
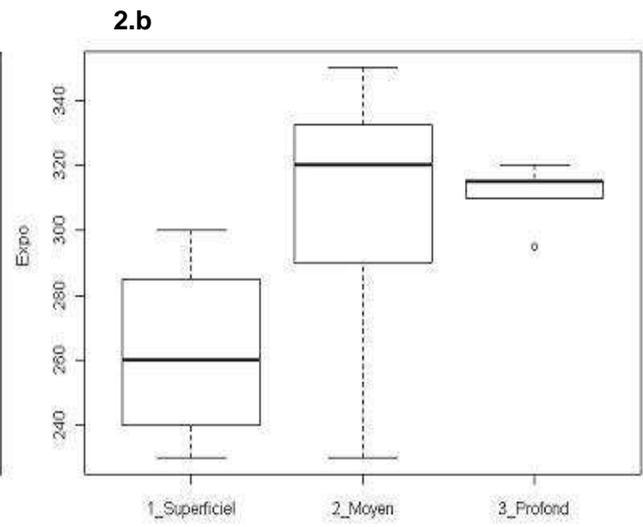
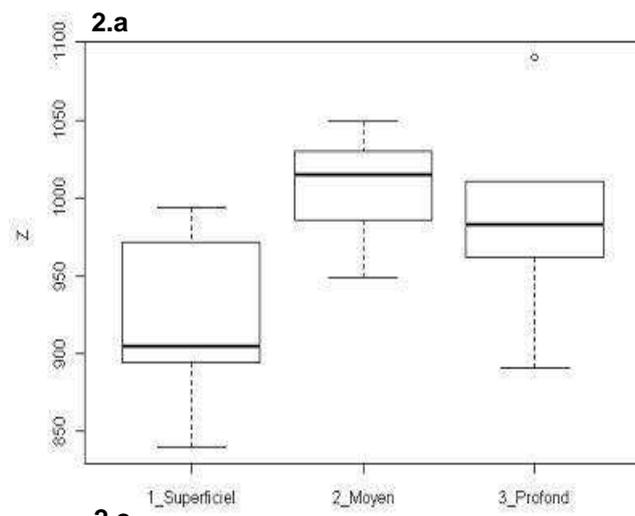
Annexe 5 : Distribution des variables mesurées

Distributions par groupe de sol

Distribution des critères édaphiques

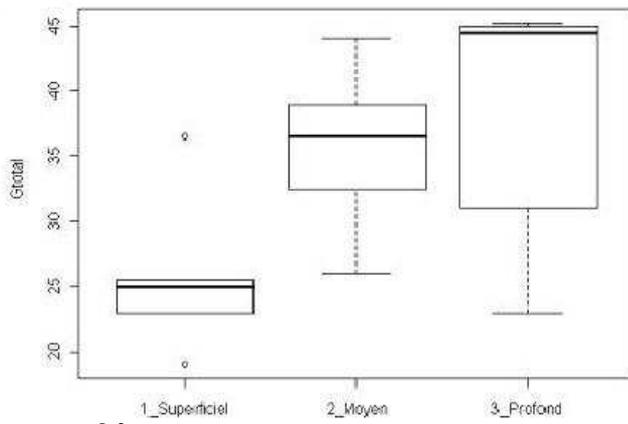


Distribution des autres critères stationnels

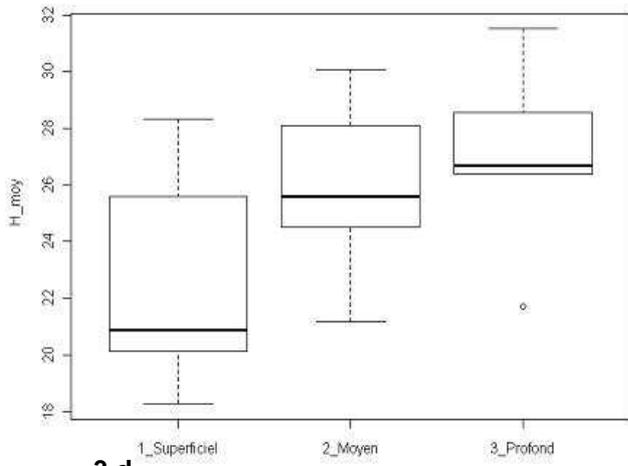


Distribution des critères de peuplement

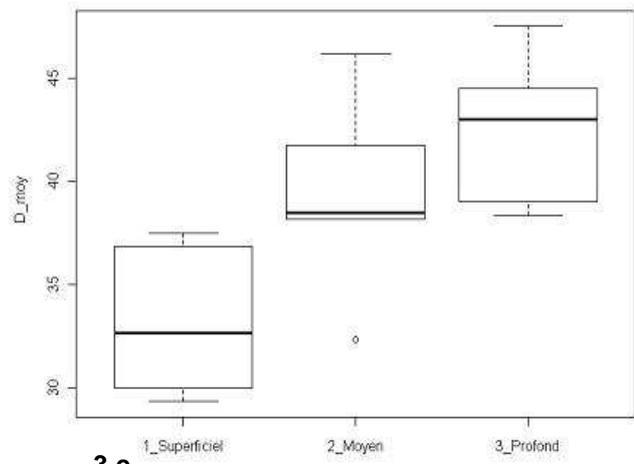
3.a



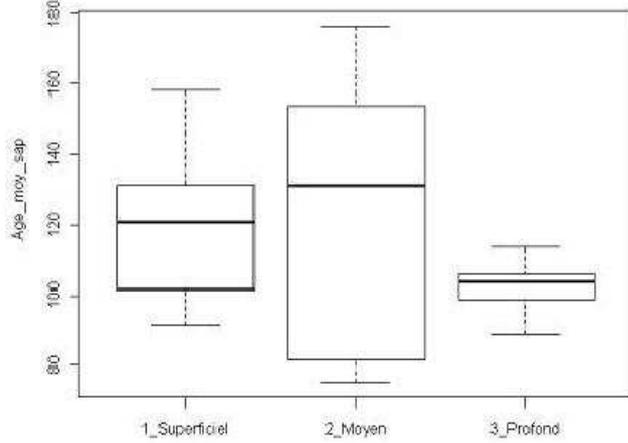
3.b



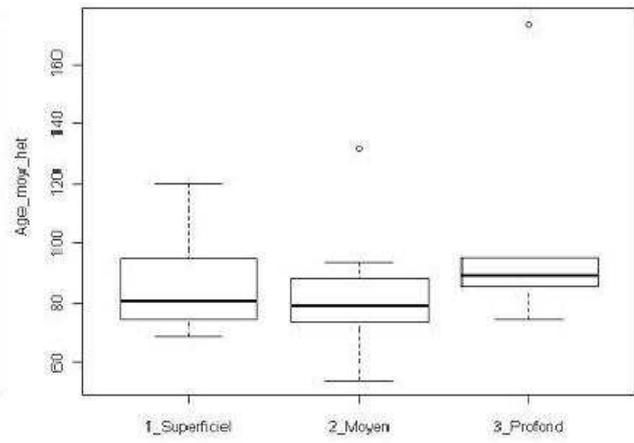
3.c



3.d

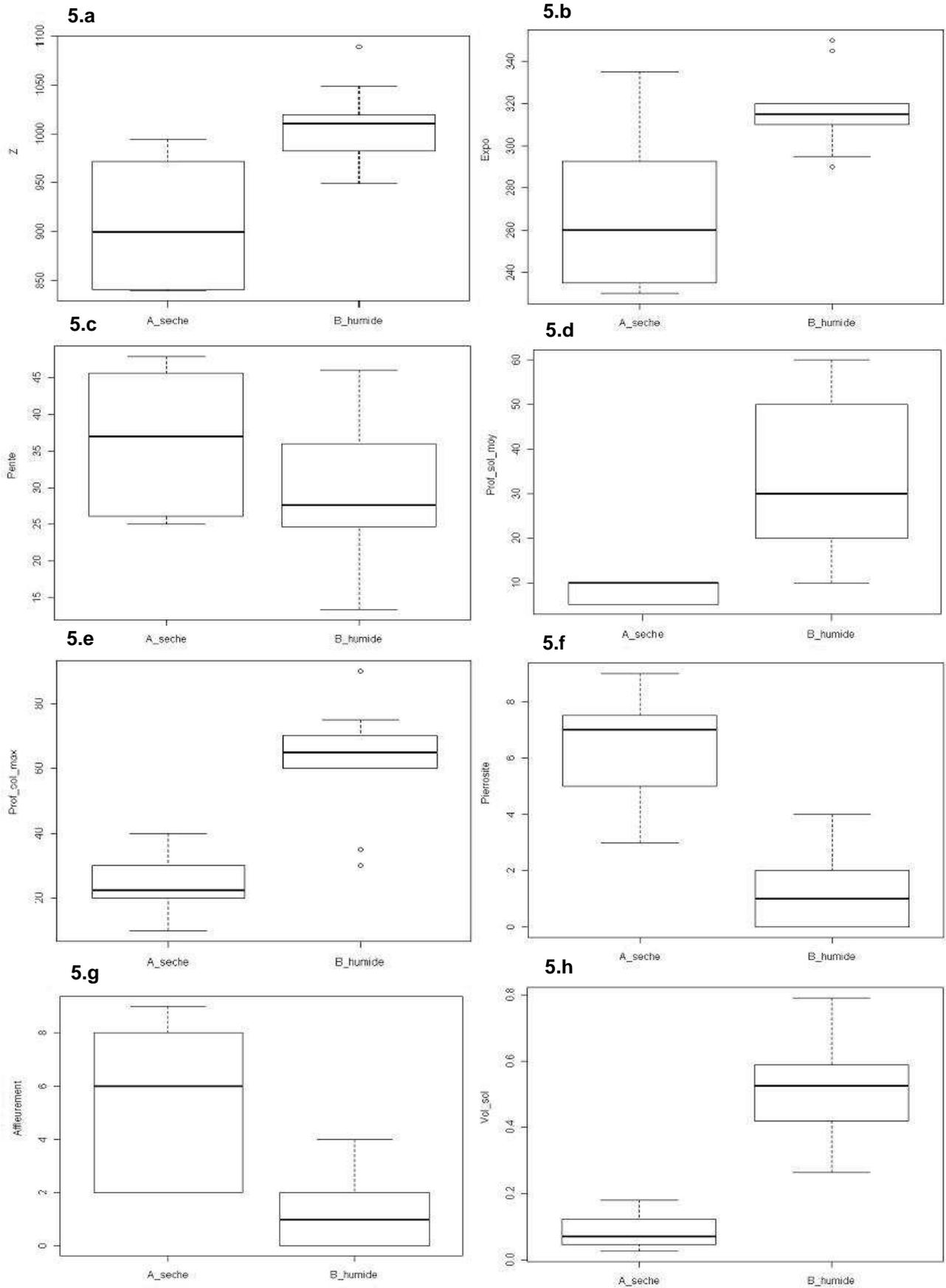


3.e



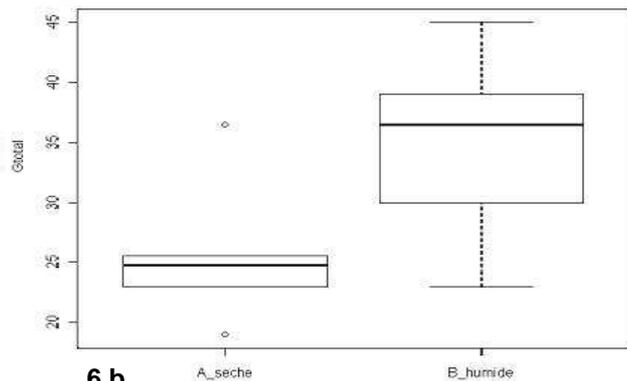
Distributions par groupe stationnel

Distribution des critères stationnels

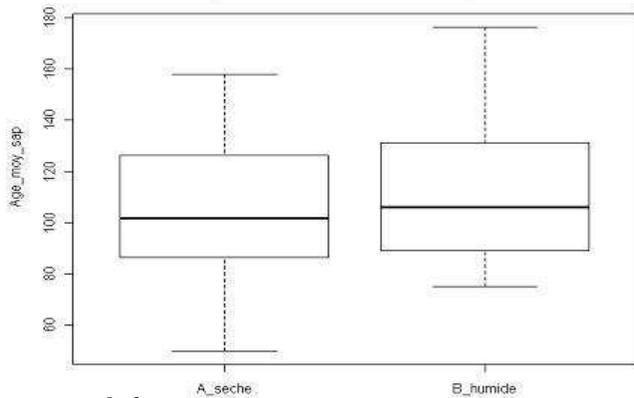


Distribution des critères de peuplement

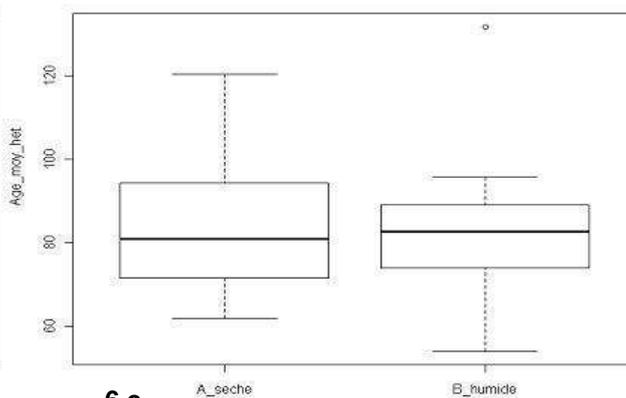
6.a



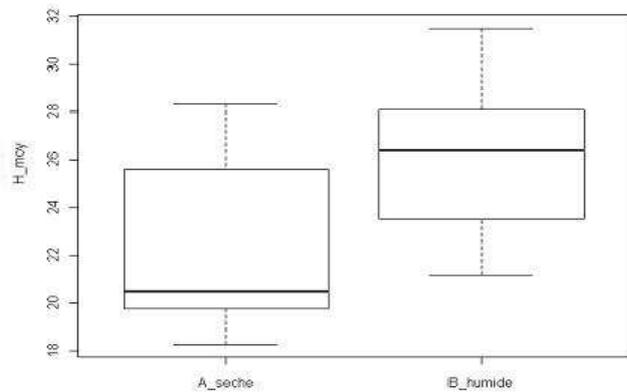
6.b



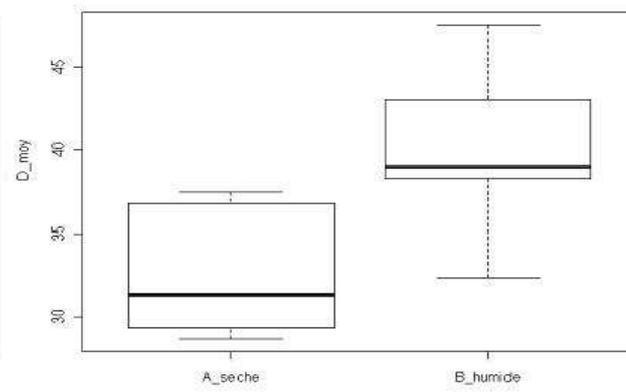
6.c



6.d



6.e



Annexe 6 : Caractéristiques des placettes

Groupe 1 (5 placettes)

N_Placette	Z	Expo	Pente	Gtotal	D_moy	H_moy	Age_moy	Prof_moy	Prof_max	Pierrosite	Affleurement	Vol_sol
1	905	285	25	25	33	21	83	10	10	3	2	0.07
4	994	240	27	23	29	18	139	10	40	6	2	0.152
11	840	300	47	19	37	26	91	10	30	7	4	0.09
16	972	260	44	36.5	38	28	113	5	20	8	8	0.04
18	894	230	48	25.5	30	20	95	5	25	9	9	0.025

Groupe 2 (7 placettes)

N_Placette	Z	Expo	Pente	Gtotal	D_moy	H_moy	Age_moy	Prof_moy	Prof_max	Pierrosite	Affleurement	Vol_sol
3	1020	290	26	30	40	21	154	20	65	3	4	0.422
6	1015	320	28	39	38	24	68	10	75	4	2	0.42
8	1049	320	46	36.5	32	25	101	30	30	1	0	0.27
9	983	230	25	44	44	28	88	10	30	4	1	0.18
13	989	350	37	39	39	28	122	20	35	2	3	0.262
14	1040	290	23	35	38	26	113	10	25	5	1	0.125
17	949	345	29	26	39	22	75	30	70	2	1	0.525

Groupe 3 (5 placettes)

N_Placette	Z	Expo	Pente	Gtotal	D_moy	H_moy	Age_moy	Prof_moy	Prof_max	Pierrosite	Affleurement	Vol_sol
5	962	310	36	45	45	29	89	50	60	0	0	0.576
7	891	320	21	45.2	46	30	136	30	35	1	1	0.325
10	1011	295	19	23	48	26	99	60	60	0	1	0.588
12	983	315	25	31	38	27	89	50	90	1	2	0.792
15	1090	315	13	44.5	43	32	101	60	70	0	0	0.693

Groupe A (6 placettes)

N_Placette	Z	Expo	Pente	Gtotal	D_moy	H_moy	Age_moy	Prof_moy	Prof_max	Pierrosite	Affleurement	Vol_sol
1	905	285	25	25	33	21	83	10	10	3	2	0.07
2	839	335	37	24.5	29	20	56	10	20	7	8	0.05
4	994	240	27	23	29	18	139	10	40	6	2	0.152
11	840	300	47	19	37	26	91	10	30	7	4	0.09
16	972	260	44	36.5	38	28	113	5	20	8	8	0.04
18	894	230	48	25.5	30	20	95	5	25	9	9	0.025

Groupe B (9 placettes)

N_Placette	Z	Expo	Pente	Gtotal	D_moy	H_moy	Age_moy	Prof_moy	Prof_max	Pierrosite	Affleurement	Vol_sol
3	1020	290	26	30	40	21	154	20	65	3	4	0.422
5	962	310	36	45	45	29	89	50	60	0	0	0.576
6	1015	320	28	39	38	24	68	10	75	4	2	0.42
8	1049	320	46	36.5	32	25	101	30	30	1	0	0.27
10	1011	295	19	23	48	26	99	60	60	0	1	0.588
12	983	315	25	31	38	27	89	50	90	1	2	0.792
13	989	350	37	39	39	28	122	20	35	2	3	0.262
15	1090	315	13	44.5	43	32	101	60	70	0	0	0.693
17	949	345	29	26	39	22	75	30	70	2	1	0.525

Annexe 7 : Hypothèses testées

Problématique générale :



Dans ce contexte, et face aux prévisions du changement climatique, deux questions se posent :

- le sapin est-il réellement condamné dans le Bugey ?
- le hêtre peut-il être considéré comme une alternative au sapin ?

Hypothèses tirées de la **bibliographie** :



Hypothèse 1 :

Le sapin est fortement affecté par les sécheresses estivales sur sol superficiel.



Hypothèse 2 :

Le hêtre, moins affecté que le sapin, est une bonne essence de substitution.



Hypothèse 3 :

Les cernes des années 1976, 1989 et 2003 sont plus fins que la moyenne, aussi bien pour le hêtre que pour le sapin.



Hypothèse 4 :

La perte de croissance radiale en année sèche est plus forte chez le sapin que chez le hêtre.

Hypothèses tirées des **fonctions de corrélation** obtenues dans l'étude :



Hypothèse 5 :

Le hêtre a accusé une perte de croissance importante lors des sécheresses de 1976, 1989 et 2003, en particulier sur sol superficiel.

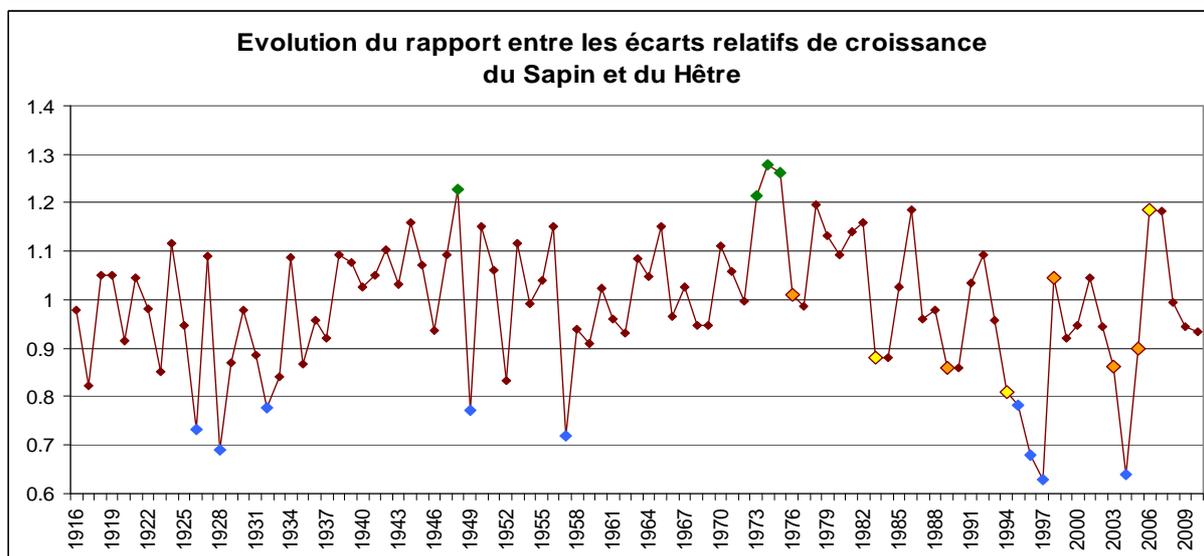
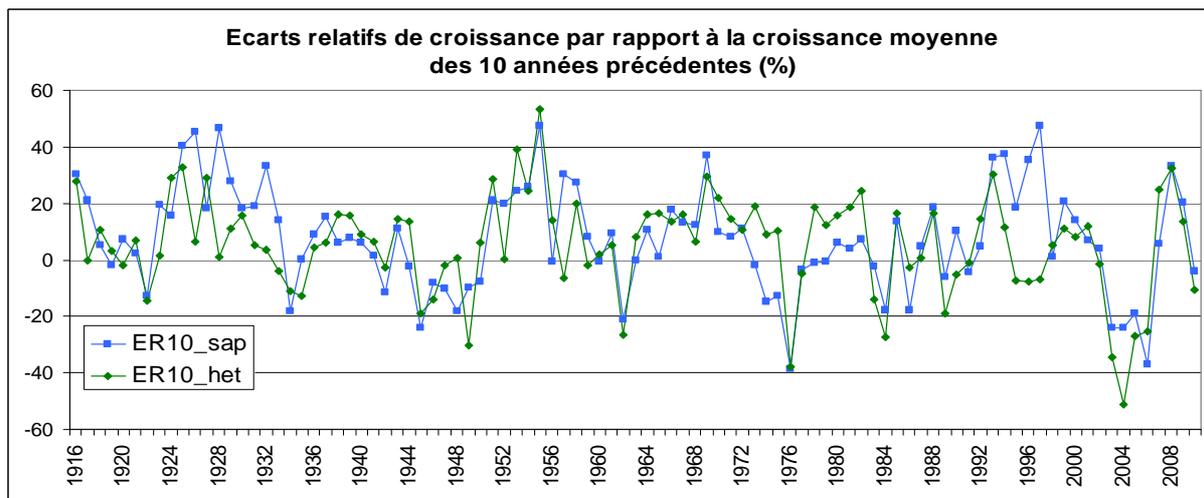


Hypothèse 6 :

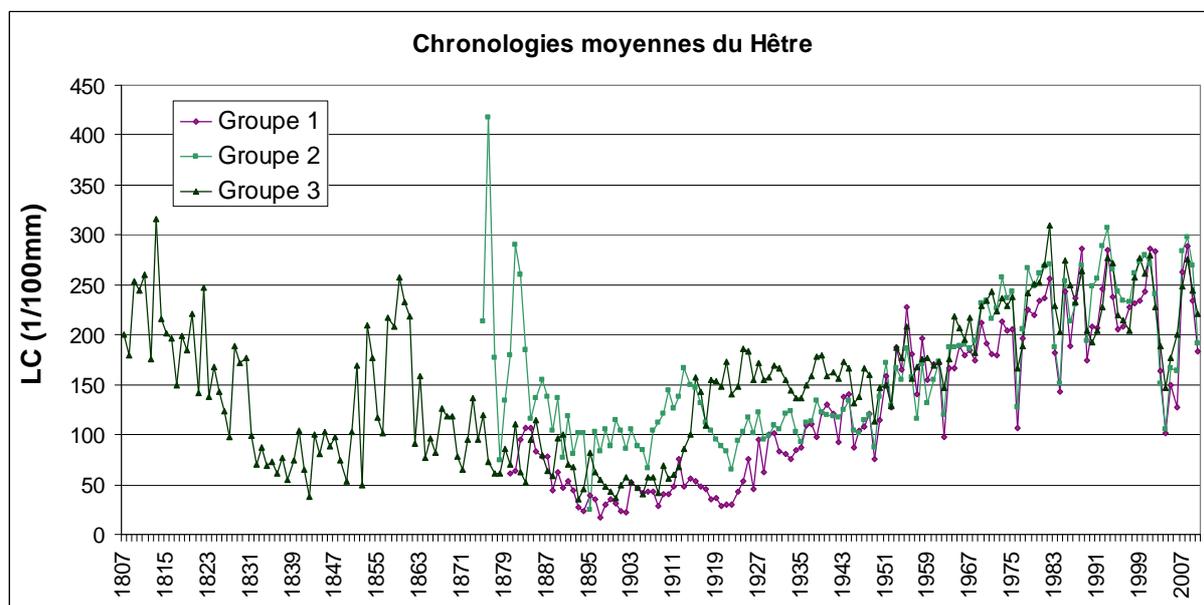
La croissance du sapin n'a pas été affectée par les sécheresses de 1976, 1989 et 2003.

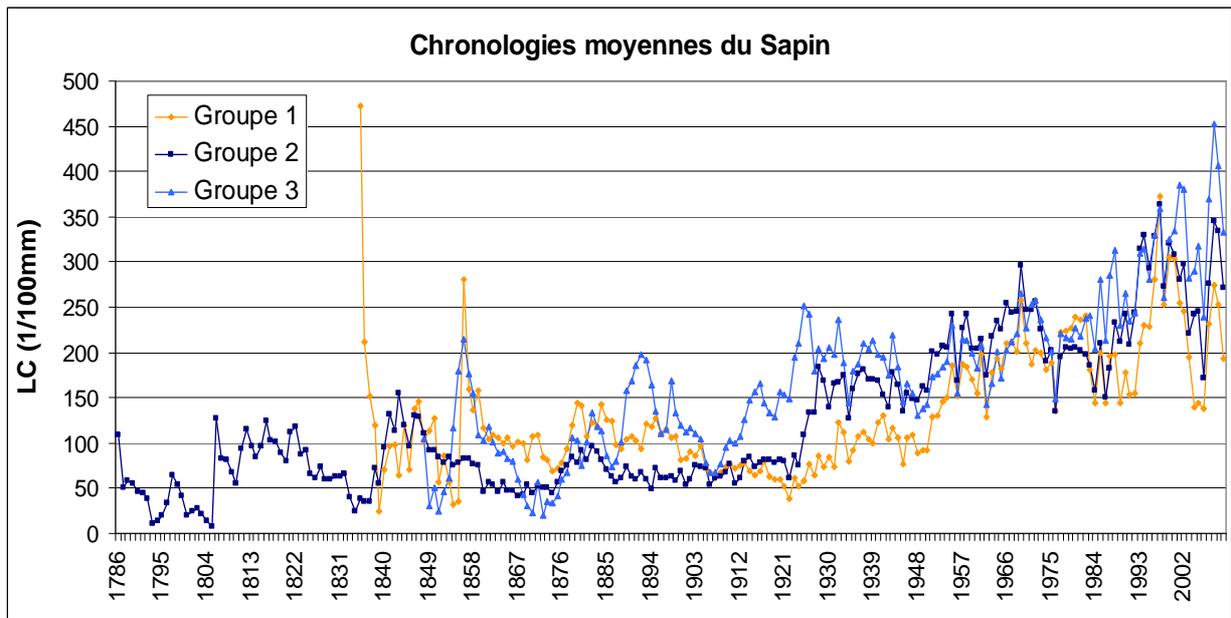
Annexe 8 : Chronologies moyennes complètes

- Ecart relatif de croissance

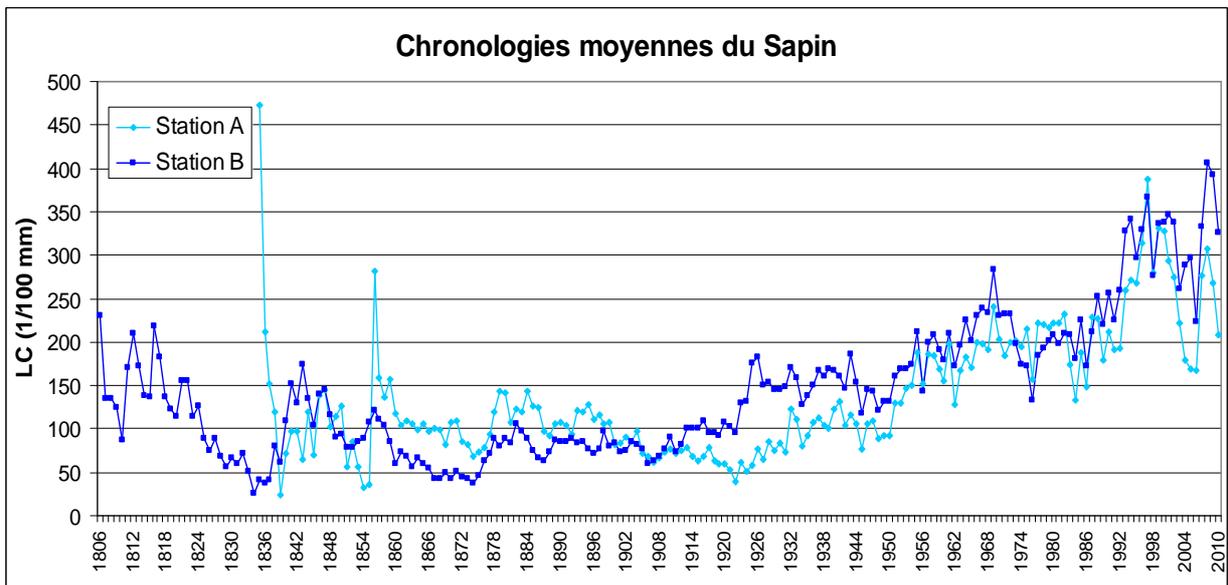
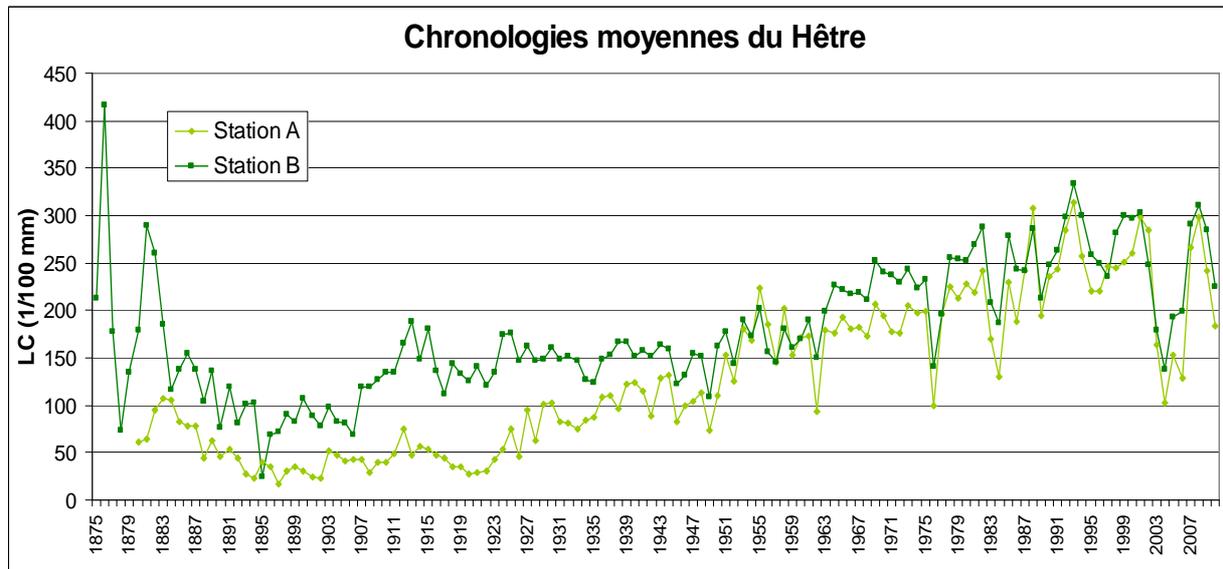


- Par groupe de sol

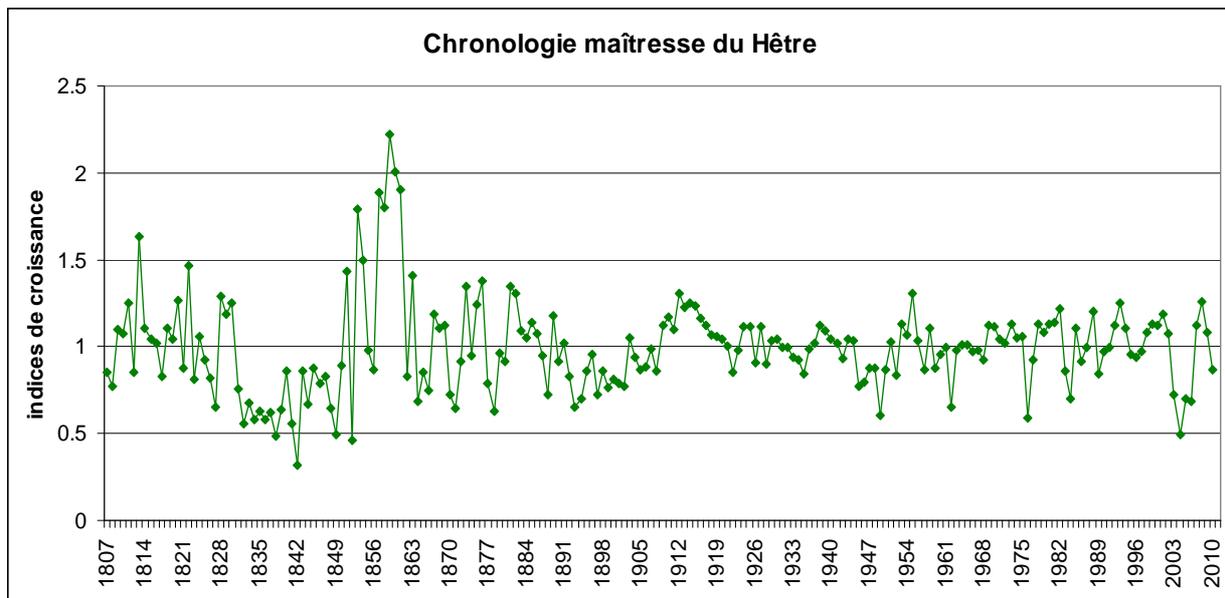
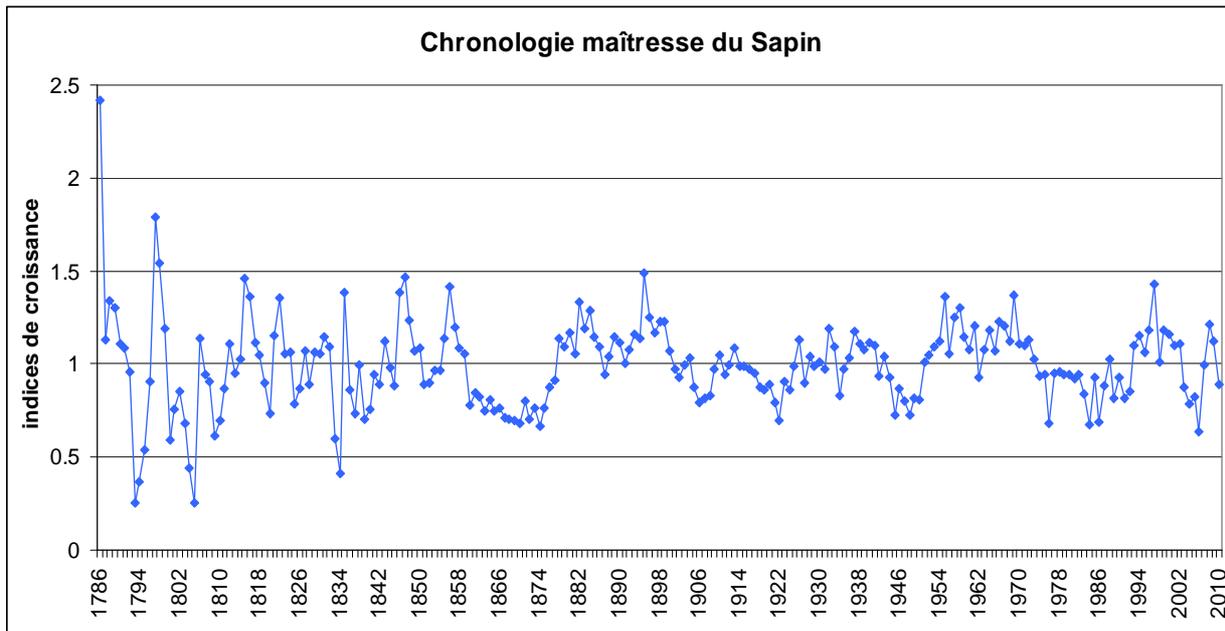




- Par groupe stationnel



- Séries standardisées générales



Annexe 9 : Paramètres statistiques utilisés en dendrochronologie

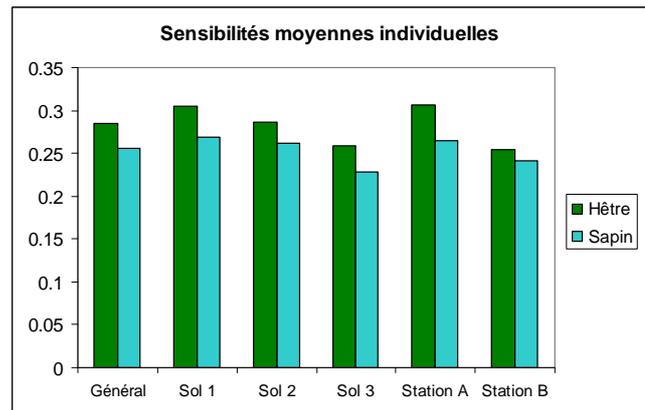
Sensibilité moyenne (SM)

$$SM = \frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^{n-1} \frac{2(X_{i+1} - X_i)}{(X_{i+1} + X_i)}$$

n : nombre de cernes par carotte

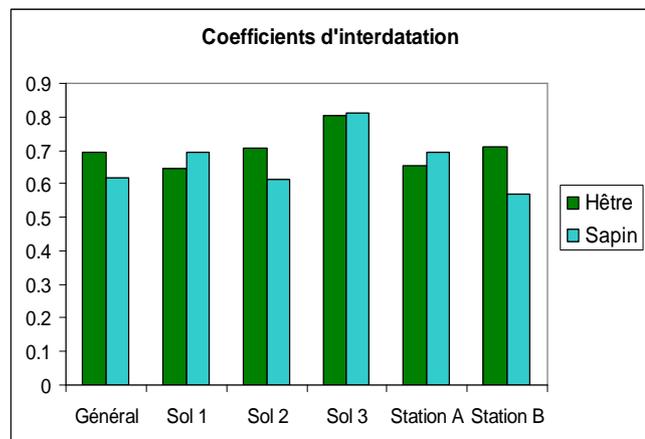
X_i : largeur du cerne numéro i

X_{i+1} : largeur du cerne numéro $i+1$



Coefficient d'interdatation (SR)

$$SR = \frac{SM \text{ chronologie maîtresse}}{\text{Moyenne des SM individuelles}}$$



Coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 (AC1)

$$AC1 = \frac{1}{\sigma^2(n-2)} \times \sum_{i=1}^{n-1} (X_i - \langle X \rangle) \times (X_{i-1} - \langle X \rangle)$$

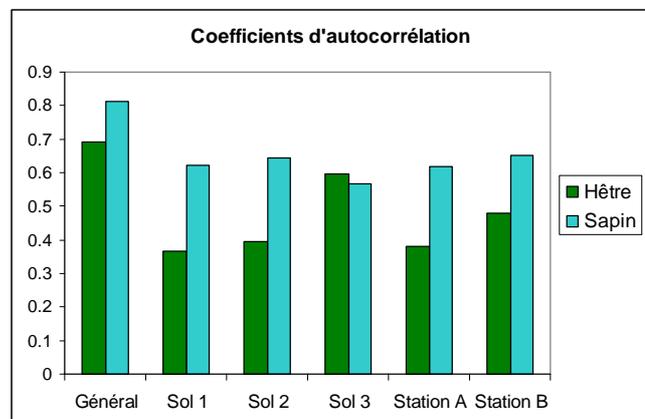
σ^2 : variance des largeurs de cerne X_i

n : nombre de cernes par carotte

X_i : largeur du cerne numéro i

$\langle X \rangle$: moyenne des largeurs de cerne par arbre

X_{i-1} : cerne numéro $i-1$



Annexe 10 : Tableaux de résultats des corrélations simples

	pvalue < 0.1
	pvalue < 0.05
	pvalue < 0.01

Résultats généraux

IC_H	pvalue	coeff corrélation
temp1.	0.0811	-0.22
temp4.	0.0752	-0.22
temp6.	0.0772	-0.22
temp7.	0.0399	-0.26
temp1	0.0960	0.21
temp4	0.0962	-0.21
temp6	0.0580	-0.24
temp7	0.0059	-0.34
temp10	0.0545	-0.24
prec6	0.0005	0.42
prec7	0.0001	0.48

IC_S	pvalue	coeff corrélation
temp7.	0.0371	-0.26
temp8.	0.0227	-0.28
temp9.	0.0378	-0.26
temp2	0.0428	0.25
temp7	0.0267	-0.27

Résultats par groupe de sol

Corrélations simples entre indices de croissance et données météo d'Ambérieu

IC_H1	pvalue	coeff corrélation
temp3.	0.0790	0.22
temp1	0.0530	0.24
temp6	0.0442	-0.25
temp7	0.0007	-0.41
prec6	0.0018	0.38
prec7	0.0000	0.58

IC_H2	pvalue	coeff corrélation
temp3.	0.0569	0.24
temp4.	0.0845	-0.22
temp6.	0.0678	-0.23
temp6	0.0780	-0.22
temp7	0.0050	-0.34
temp10	0.0099	-0.32
prec6	0.0005	0.42
prec7	0.0001	0.46

IC_H3	pvalue	coeff corrélation
temp6.	0.0680	-0.23
temp7.	0.0117	-0.31
temp4	0.0972	-0.21
prec6.	0.0363	0.26
prec6	0.0083	0.32
prec7	0.0098	0.32

IC_S1	pvalue	coeff corrélation
temp4.	0.0224	-0.28
temp6.	0.0999	-0.21
temp7.	0.0010	-0.40
temp8.	0.0003	-0.44
temp9.	0.0058	-0.34
temp2	0.0156	0.30
temp7	0.0162	-0.30
temp8	0.0659	-0.23
prec1.	0.0415	0.25
prec7.	0.0719	0.22
prec9.	0.0814	0.22
prec1	0.0572	0.24
prec6	0.0751	0.22
prec7	0.0444	0.25

IC_S2	pvalue	coeff corrélation
temp9.	0.0398	-0.26
temp2	0.0660	0.23
temp7	0.0835	-0.22

IC_S3	pvalue	coeff corrélation
temp7.	0.0282	-0.27
temp8.	0.0134	-0.31
temp9.	0.0462	-0.25
temp2	0.0576	0.24
temp7	0.0675	-0.10
prec8.	0.0588	0.24
prec9.	0.0333	0.26
prec6	0.0744	0.22
prec7	0.0872	0.21

Corrélations simples entre écarts relatifs de croissance et données météo d'Ambérieu

ER10_H1	pvalue	coeff corrélation
temp1.	0.0713	-0.23
temp1	0.0810	0.22
temp6	0.0189	-0.29
temp7	0.0005	-0.42
prec6	0.0007	0.41
prec7	0.0000	0.52

qER10_1	pvalue	coeff corrélation
temp1.	0.0438	-0.25
temp7.	0.0798	0.22
temp8.	0.0204	0.29
prec1.	0.0682	-0.23
prec6	0.0302	0.27
prec7	0.0046	0.35

ER10_S1	pvalue	coeff corrélation
temp4.	0.0242	-0.28
temp7.	0.0092	-0.32
temp8.	0.0048	-0.35
temp9.	0.0082	-0.33
temp12.	0.0546	0.24
temp7	0.0106	-0.31
temp8	0.0304	-0.27
prec9.	0.0831	0.22
prec6	0.0360	0.26
prec7	0.0636	0.23

ER10_H2	pvalue	coeff corrélation
temp1.	0.0527	-0.24
temp6.	0.0535	-0.24
temp4	0.0915	-0.21
temp6	0.0454	-0.25
temp7	0.0112	-0.31
temp10	0.0110	-0.31
prec6.	0.0935	0.21
prec6	0.0002	0.45
prec7	0.0015	0.39

qER10_2	pvalue	coeff corrélation
temp4.	0.0576	-0.24
temp12.	0.0668	-0.23
temp4	0.0181	-0.29
temp6	0.0945	-0.21
temp7	0.0119	-0.31
temp10	0.0112	-0.31
prec2.	0.0611	0.23
prec3	0.0540	0.24
prec6	0.0588	0.24
prec7	0.0038	0.35
prec8	0.0334	0.26

ER10_S2	pvalue	coeff corrélation
prec9.	0.0491	0.25
prec6	0.0189	0.29

ER10_H3	pvalue	coeff corrélation
temp6.	0.0801	-0.22
temp7.	0.0056	-0.34
temp8.	0.0924	-0.21
temp4	0.0950	-0.21
temp7	0.0557	-0.24
temp10	0.0973	-0.21
prec6.	0.0406	0.25
prec6	0.0045	0.35
prec7	0.0143	0.30

qER10_3	pvalue	coeff corrélation
temp10	0.0120	-0.31
prec6.	0.0951	0.21
prec1	0.0648	0.23

ER10_S3	pvalue	coeff corrélation
prec9.	0.0254	0.28
prec6	0.0634	0.23
prec7	0.0776	0.22

Résultats par groupe stationnel

Corrélations simples entre indices de croissance et données météo d'Ambérieu

IC_HA	pvalue	coeff corrélation
temp7	0.0013	-0.39
prec6	0.0036	0.36
prec7	0.0000	0.57

IC_SA	pvalue	coeff corrélation
temp7.	0.0038	-0.35
temp8.	0.0101	-0.32
temp9.	0.0141	-0.30
temp2	0.0061	0.34
temp7	0.0587	-0.24
prec7.	0.0226	0.28
prec9.	0.0429	0.25
prec6	0.0770	0.22
prec7	0.0418	0.25

IC_HB	pvalue	coeff corrélation
prec6	0.0021	0.38
prec7	0.0010	0.40

IC_SB	pvalue	coeff corrélation
temp7	0.0884	-0.21

Corrélations simples entre écarts relatifs de croissance et données météo d'Ambérieu

ER10_HA	pvalue	coeff corrélation
temp4	0.0590	-0.24
temp6	0.0446	-0.25
temp7	0.0022	-0.37
prec6	0.0003	0.44
prec7	0.0000	0.50

qER10_A	pvalue	coeff corrélation
temp7.	0.0926	0.21
temp8.	0.0495	0.24
prec9.	0.0745	-0.22
prec6	0.0223	0.28
prec7	0.0018	0.38

ER10_SA	pvalue	coeff corrélation
temp7.	0.0271	-0.27
temp8.	0.0253	-0.28
temp9.	0.0290	-0.27
temp12.	0.0807	0.22
temp2	0.0735	0.22
temp7	0.0348	-0.26
prec6	0.0199	0.29
prec7	0.0817	0.22
prec7.	0.0965	0.21
prec9.	0.0659	0.23

ER10_HB	pvalue	coeff corrélation
prec6	0.0009	0.40
prec7	0.0009	0.40

ER10_SB	pvalue	coeff corrélation
prec9.	0.0804	0.22
prec6	0.0542	0.24

qER10_B	pvalue	coeff corrélation
temp12.	0.0618	-0.23
temp7	0.0930	-0.21
temp8	0.0766	-0.22
temp10	0.0707	-0.23
prec3	0.0145	0.30
prec7	0.0327	0.27
prec8	0.0978	0.21

Annexe 11 : Tests statistiques utilisés dans l'analyse

Tous les tests statistiques ont été réalisés à l'aide du logiciel R.

Comparaison de moyennes

Test de Shapiro : il permet de vérifier qu'une variable suit une loi normale

Test de Student apparié : il permet de comparer des moyennes appariées, c'est-à-dire mesurées sur le même échantillon, et suivant une loi normale.

→ Les pertes de croissance du Sapin et du Hêtre en année sèche sont-elles différentes ? Comparaison des écarts relatifs de croissance moyens. Les données sont appariées par placette.

→ Le Sapin et le Hêtre mettent-ils autant de temps à retrouver leur croissance initiale après une sécheresse ? Comparaison des temps moyens de récupération. Les données sont appariées par placette.

Test de Wilcoxon apparié : il permet de comparer des moyennes appariées pour des variables qui ne suivent pas une loi normale.

→ La perte de croissance en année sèche est-elle significative ? Comparaison de l'indice de croissance moyen des 5 ou 10 années précédant la sécheresse à l'indice de croissance de l'année sèche. Les données sont appariées par individu.

→ Les pertes de croissance du Sapin et du Hêtre en année sèche sont-elles différentes ? Dans le cas où la différence entre les pertes de croissance ne suit pas une loi normale, ce test remplace le test de Student apparié.

→ Le Sapin et le Hêtre mettent-ils autant de temps à retrouver leur croissance initiale après une sécheresse ? Dans le cas où la différence entre les temps de récupération ne suit pas une loi normale, ce test remplace le test de Student apparié.

ANOVA (Analyse de la variance) à un facteur : il correspond à la généralisation du test de Student pour comparer plus de deux variables.

→ Les sapins qui présentent plus de 5% de branches mortes, moins de 5% de branches mortes ou qui n'en présentent pas ont-ils eu la même perte de croissance en 2003 ? Comparaison des trois écarts de croissance relatifs moyens.

Comparaison de fréquences

Test du khi2 de McNemar : il permet de comparer deux fréquences appariées.

→ Les proportions de sapins et de hêtres n'ayant pas retrouvé leur croissance initiale 8 ans après la sécheresse sont-elles différentes ? Les données sont appariées par placette. On considère que les arbres d'une placette n'ont pas retrouvé leur croissance initiale si au moins un des 3 arbres n'a pas retrouvé sa croissance initiale. Pour des raisons d'effectifs, ce test n'est appliqué que dans le cas général.

Test du khi2 : il permet de comparer deux fréquences non appariées.

→ Les proportions de sapins et de hêtres n'ayant pas retrouvé leur croissance initiale 8 ans après la sécheresse sont-elles différentes au sein des groupes ? Ce test est réalisé sous l'hypothèse (lourde) que les séries Sapin et Hêtre sont indépendantes. Dans le cas, fréquent pour cette étude, d'effectifs inférieurs à 5, une correction de continuité est réalisée.

Comparaison de deux modèles linéaires

Test de Davis : il permet de comparer un modèle linéaire simple (droite) à un modèle linéaire segmenté (droite brisée).

→ La réponse en croissance du Hêtre en fonction du bilan hydrique climatique présente-t-elle une rupture de pente significative ?

Résultats des tests

Essence la plus touchée : selon le cas, la différence d'écart relatif de croissance ou la différence de proportion d'arbres n'ayant pas retrouvé leur croissance est significative.

non : test non significatif

*** : pvalue<0.001

** : pvalue <0.01

* : pvalue <0.05

" : pvalue <0.1

2003

	Général	1	2	3	A	B
ER5 Sapin	***	**	***	**	***	***
ER5 Hêtre	***	**	***	**	***	***
ER10 Sapin	***	***	**	**	***	**
ER10 Hêtre	***	***	***	*	***	***
Essence la plus touchée (5 ans) ER5 Hêtre - ER5 Sapin (%)	Hêtre** 14,5	12,8	Hêtre* 21,4	3,5	Hêtre" 13,6	Hêtre* 16,3
Essence la plus touchée (10 ans) ER10 Hêtre - ER10 Sapin (%)	9,9	6	Hêtre" 17,6	2,7	7,7	13,9
	Général	1	2	3	A	B
Essence la plus lente Ecart H-S (ans)	Hêtre" 0,8	1,1	0,8	0,1	0,6	0,9
Essence la plus touchée Prop hêtres NR (%)	24,1	26,7	14,3	20,0	22,2	22,2
Prop sapins NR (%)	31,5	46,7	33,3	6,7	44,4	29,6

2003-2006

	Général	1	2	3	A	B
ER5 Sapin	***	***	***	***	***	***
ER5 Hêtre	***	***	***	**	***	***
ER10 Sapin	***	***	***	***	***	***
ER10 Hêtre	***	***	***	**	***	***
Essence la plus touchée (5 ans) ER5 Hêtre - ER5 Sapin (%)	Hêtre** 13,5	10,6	Hêtre* 16,1	7,6	12,4	Hêtre 14,4
Essence la plus touchée (10 ans) ER10 Hêtre - ER10 Sapin (%)	9,2	5	12,8	0,9	7,1	11,1

1989

	Général	1	2	3	A	B
ER4 Sapin	*	**	non	**	*	non
ER4 Hêtre	***	**	***	*	**	**
ER10 Sapin	*	**	non	*	*	non
ER10 Hêtre	***	*	***	**	non	***
Essence la plus touchée (5 ans) ER4 Hêtre - ER4 Sapin (%)	Hêtre" 12,6	0,4	Hêtre" 24,4	2,6	5,9	16,4
Essence la plus touchée (10 ans) ER10 Hêtre - ER10 Sapin (%)	Hêtre" 12,1	-8,6	Hêtre* 25,1	10,2	-2,3	Hêtre 17,4
	Général	1	2	3	A	B
Essence la plus lente Ecart H-S (ans)	-0,4	-0,1	-0,3	-0,3	-0,5	-0,4
Essence la plus touchée Prop hêtres NR (%)	14,8	6,7	4,8	13,3	11,1	7,4
Prop sapins NR (%)	3,7	6,7	0,0	0,0	5,5	0

1976

	Général	1	2	3	A	B
ER5 Sapin	***	***	***	***	***	***
ER5 Hêtre	***	***	***	***	***	***
ER10 Sapin	***	***	***	**	***	***
ER10 Hêtre	***	***	***	**	***	***
Essence la plus touchée (5 ans) ER5 Hêtre - ER5 Sapin (%)	Hêtre* 12,4	Hêtre** 20,7	Hêtre" 11,2	-5,6	Hêtre* 27,4	6,3
Essence la plus touchée (10 ans) ER10 Hêtre - ER10 Sapin (%)	6,5	Hêtre" 10,8	5,6	Hêtre* 9,3	21,5	2,1
	Général	1	2	3	A	B
Essence la plus lente Ecart H-S (ans)	0,2	-0,2	-0,4	0,9	0	0,2
Essence la plus touchée Prop hêtres NR (%)	Sapin* 13,0	13,3	14,3	13,3	11,1	11,1
Prop sapins NR (%)	35,2	40,0	28,6	33,3	38,9	29,6

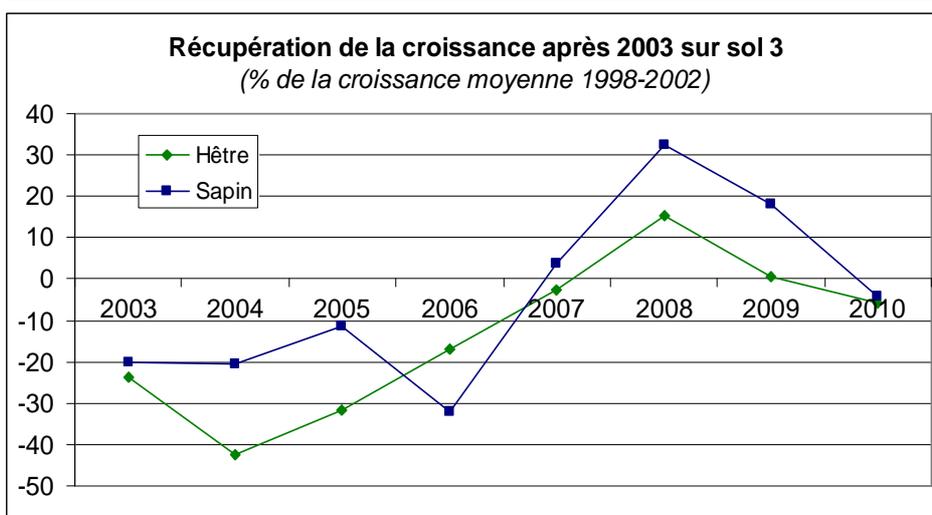
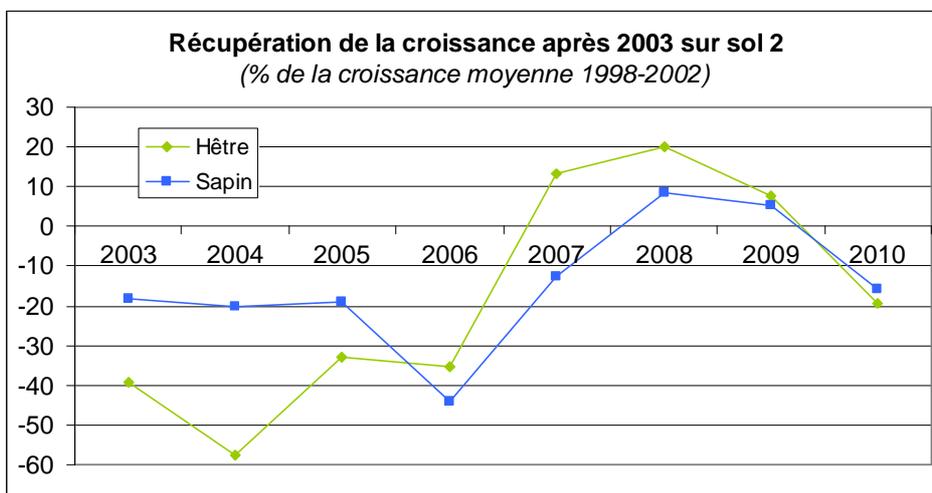
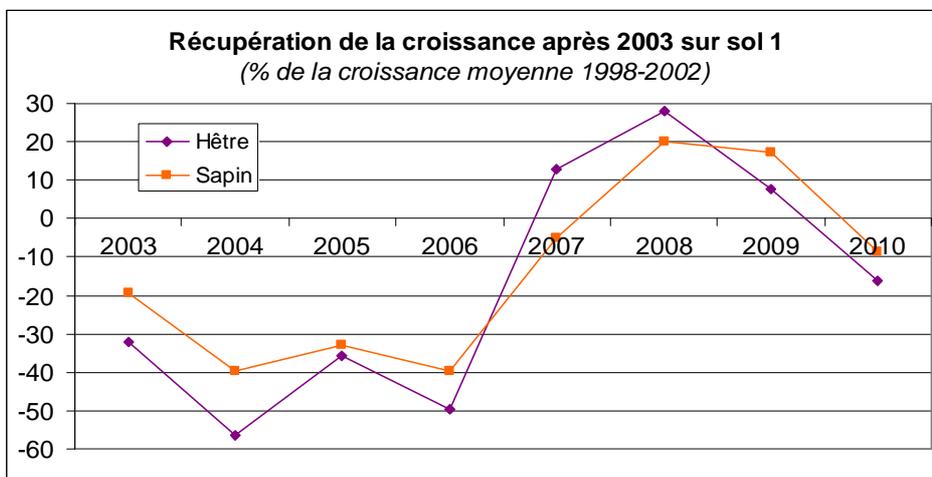
Réponse du hêtre au bilan hydrique climatique

	Général	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Station A	Station B
Pvalue	0.01326 *	0.05415 "	0.001687 **	0.1746	0.02965 *	0.01064 *
Modèle	linéaire segmenté	linéaire segmenté	linéaire segmenté	linéaire	linéaire segmenté	linéaire segmenté
R ²	0.4364	0.4543	0.4606	0.1933	0.4574	0.3576
Point de rupture	-14.8	-16.3	-14.5		-16.6	-23.8

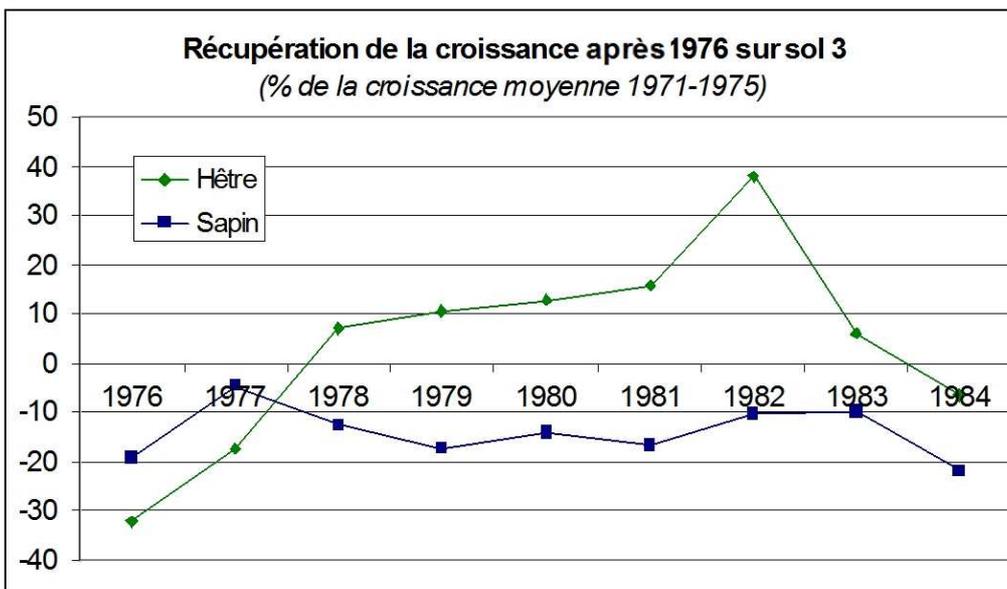
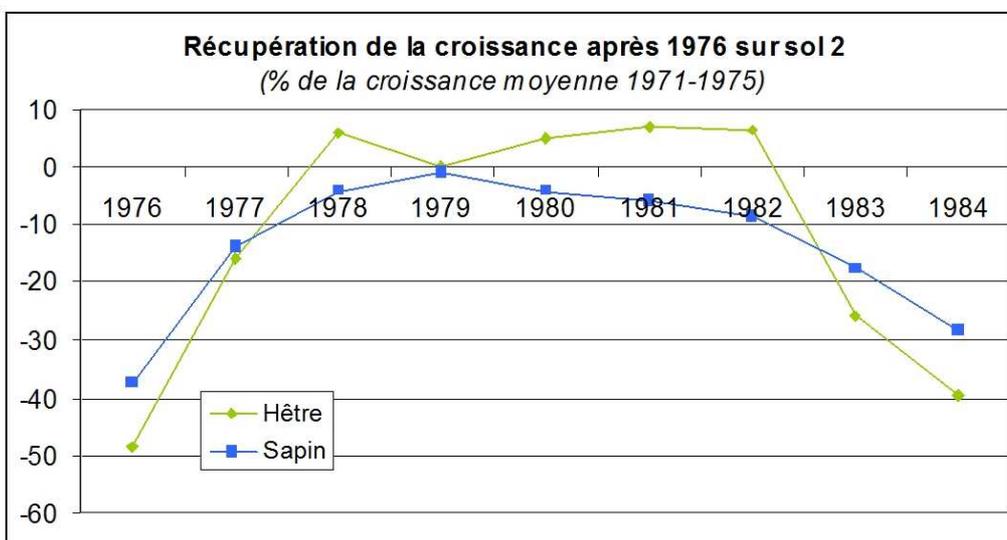
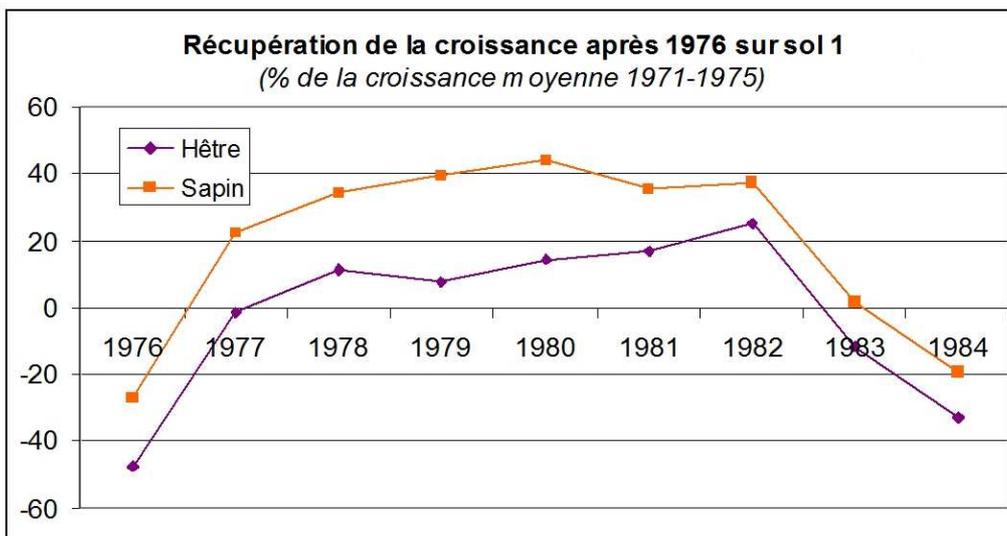
Annexe 12 : Retour à la croissance initiale par groupe

Reprise après une sécheresse en fonction du type de sol

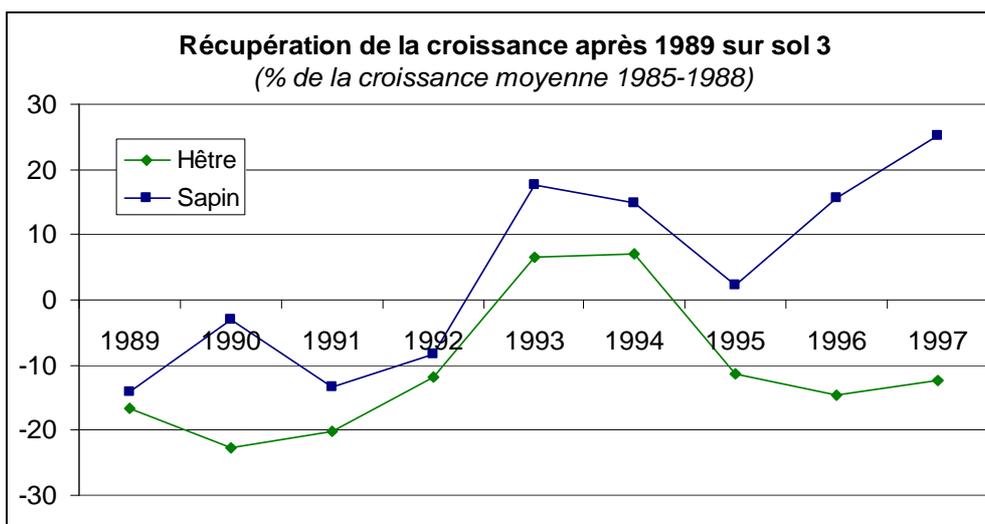
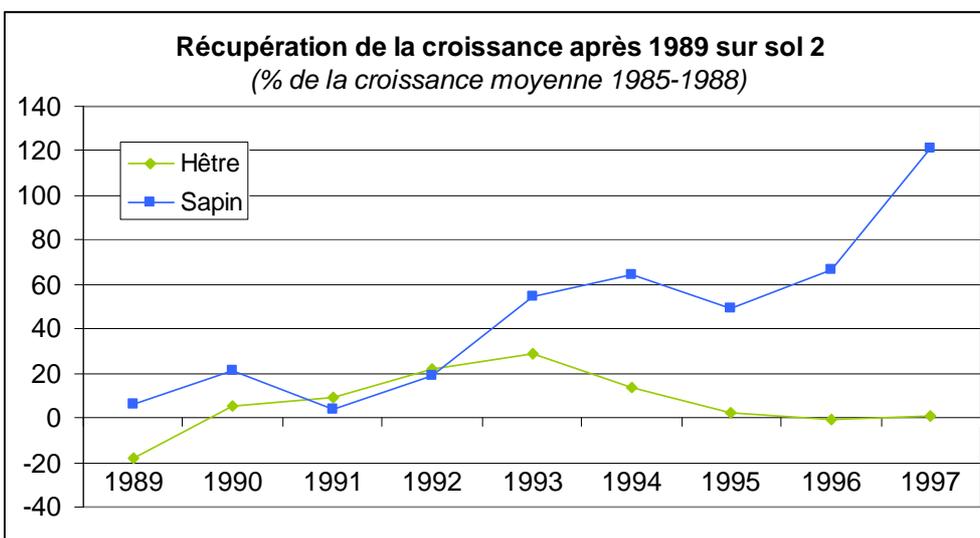
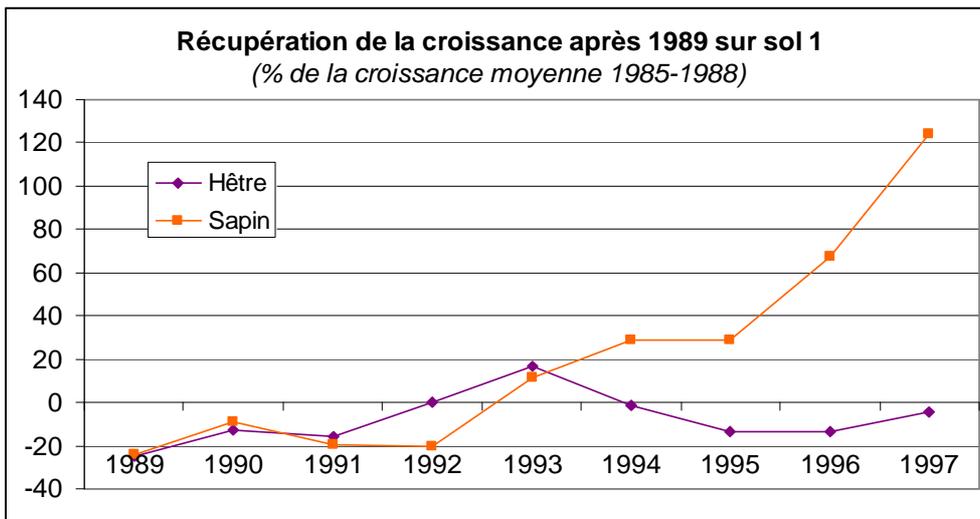
Après la sécheresse de 2003



Après la sécheresse de 1976

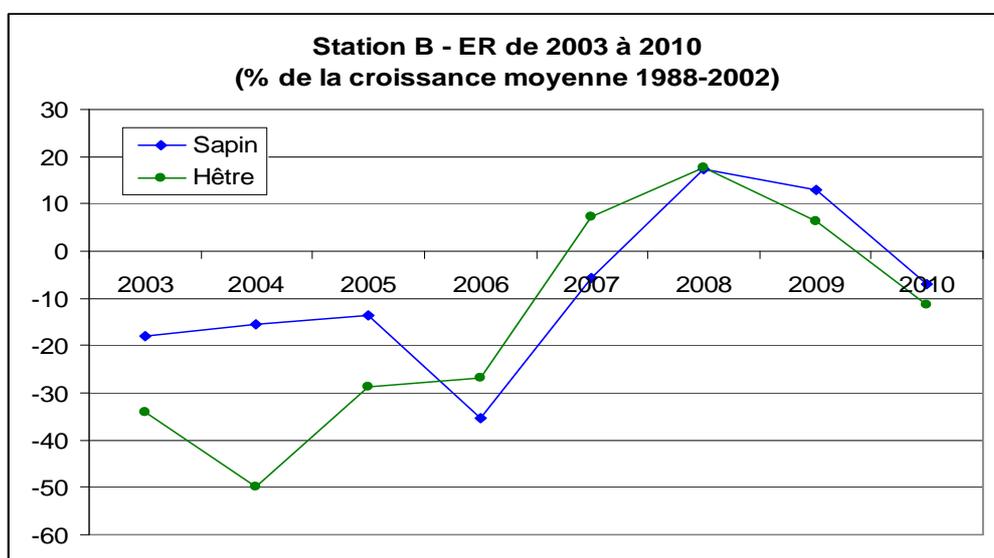
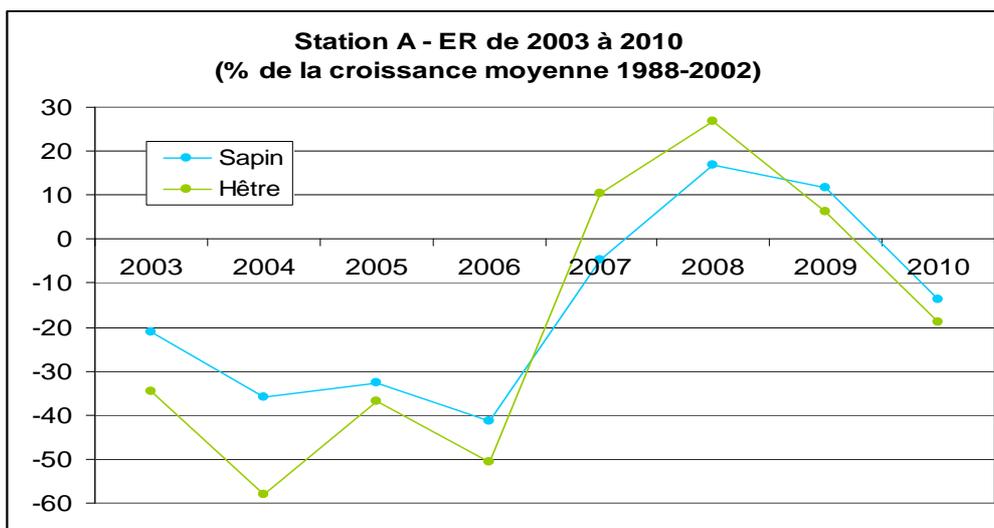


Après la sécheresse de 1989 :

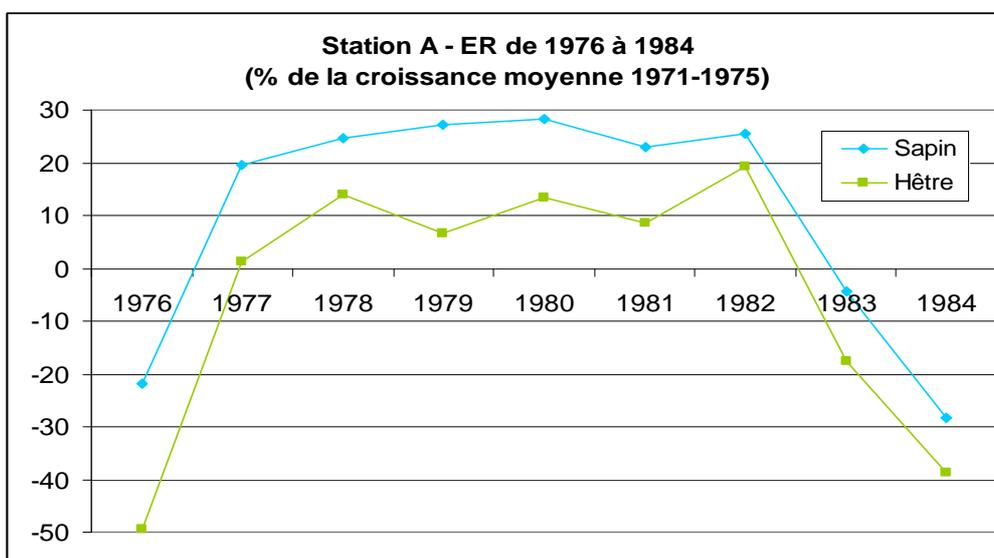


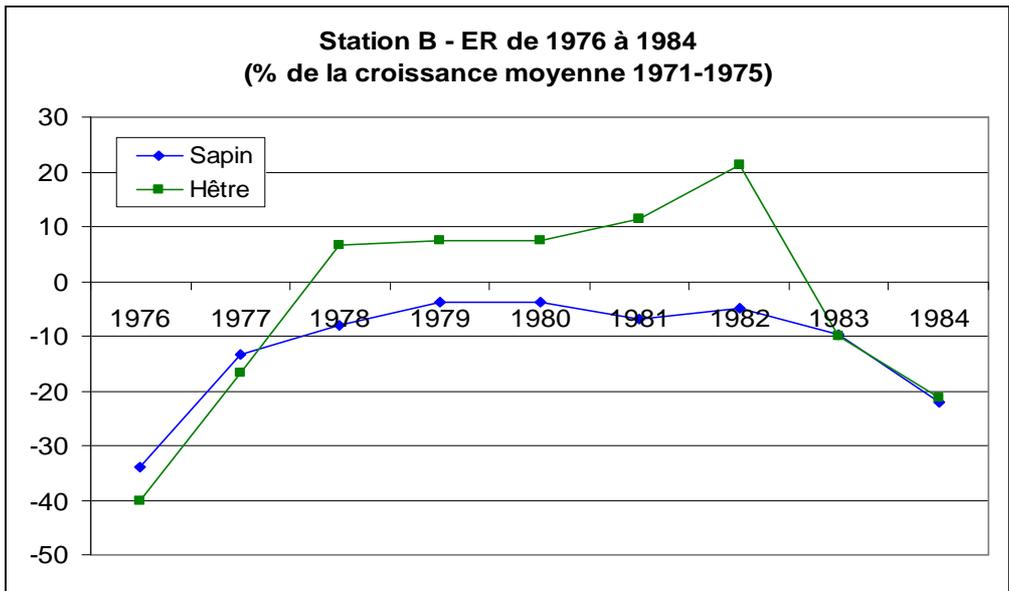
Récupération après une sécheresse en fonction de la station

Après la sécheresse de 2003 :

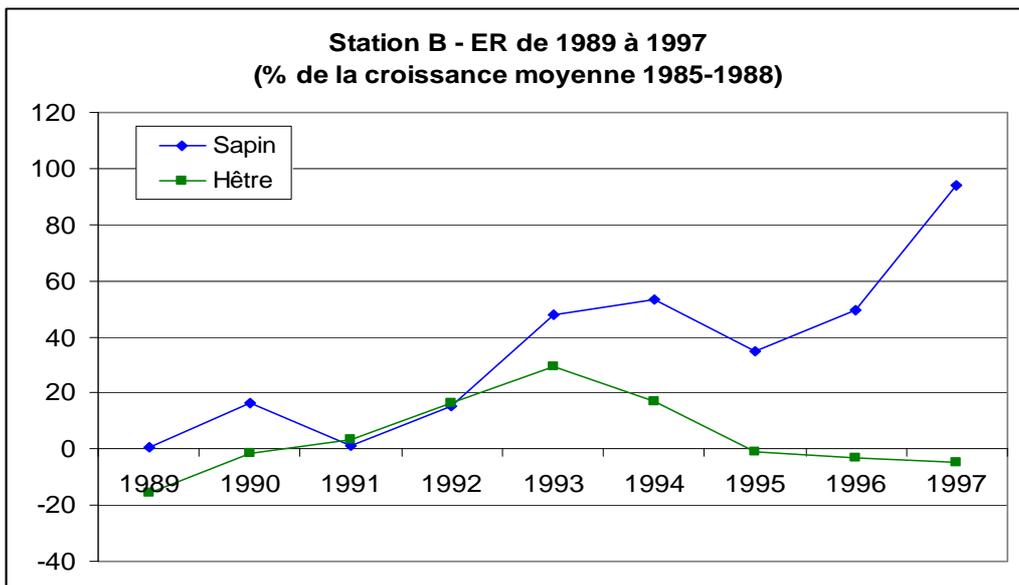
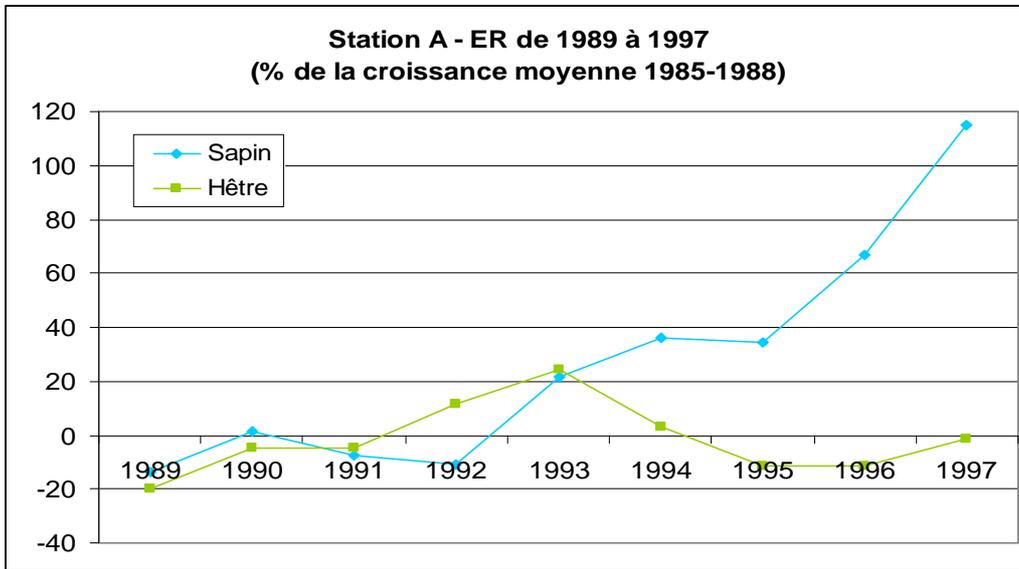


Après la sécheresse de 1976





Après la sécheresse de 1989



Résumé

L'étude vise à comparer les croissances du hêtre et du sapin pectiné lors des sécheresses estivales, dans le Bugey, pour différentes conditions de réserve utile et de station. Pour ce faire, une analyse dendrochronologique est réalisée en peuplements mélangés, à l'étage du montagnard inférieur et en exposition chaude. La réserve utile est qualifiée à partir de la profondeur et de la teneur en éléments grossiers du sol évalués à la tarière à spirale. Les données disponibles liées au dépérissement ne suffisent pas à faire le lien entre la perte de croissance et l'état sanitaire. Cependant, les fonctions de corrélation établies permettent de différencier les facteurs impliqués dans la croissance du hêtre à ceux du sapin. Le bilan hydrique climatique estival est déterminant pour la croissance du hêtre, tandis que les températures de la fin de l'été précédent conditionnent la croissance du sapin sur les stations à faible réserve utile. L'étude de la croissance en année sèche (1976, 1989 et 2003) ne permet pas de considérer le hêtre comme une essence de substitution pour le sapin adaptée aux enjeux du changement climatique.