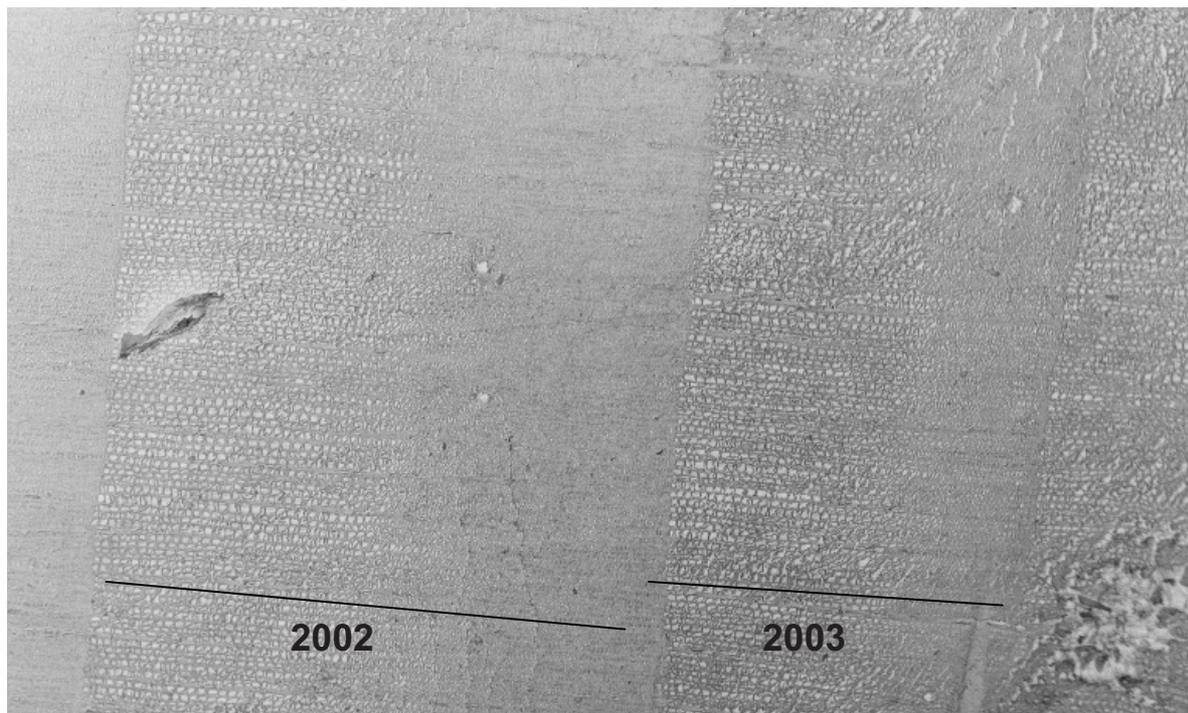


La forêt face aux événements climatiques extrêmes :

Etude de l'impact de la sécheresse de 2003 sur la croissance des arbres des forêts françaises à partir des données IFN



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Photo de la page de couverture :

Cerne de 2002 et 2003 de Douglas observé au microscope électronique à balayage.

Prise par Christophe Rose (INRA).

Condition : détecteur VPSE, EHT 20 kV, Chambre 78 Pa, Grossi 46 fois.

AgroParisTech — Formation des ingénieurs forestiers

Inventaire Forestier National
Institut National de Recherche Agronomique
Agence Nationale de la Recherche
Projet Dryade

**La forêt face aux évènements climatiques
extrêmes :**
**Etude de l'impact de la sécheresse de 2003 sur la
croissance des arbres des forêts françaises à partir
des données IFN**

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Quentin GIRARD
16^e Promotion
2006-2009

juin 2009

Remerciements

Je tiens à remercier mes maîtres de stage, Jean-Luc Dupouey et Marie Lecocq, pour leur encadrement et leur aide ainsi que les membres de l'IFN, de l'équipe de phytoécologie forestière et du Département santé des forêts, tout particulièrement Nathalie Bréda, qui m'ont aidé et conseillé tout au long de ce stage et avec qui j'ai eu grand plaisir à travailler.

Sommaire

Remerciements.....	1
Sommaire.....	3
1. Introduction	5
1.1. La sécheresse et la canicule de 2003.....	5
1.2. Contexte de l'étude.....	6
2. Présentation et calcul des données de l'IFN.....	7
2.1. Les données de l'IFN.....	7
2.1.1. Présentation de la récolte de données.....	7
2.1.2. Ajustement et calcul d'accroissement au statut des arbres.....	8
2.2. L'exception de 2004 : mesure de la dernière année.....	8
2.2.1. Mesure de l'accroissement radial de 2003.....	8
2.2.2. Calcul d'accroissement.....	9
2.2.3. Calcul des poids des placettes.....	10
2.2.4. Gestion des erreurs de saisie.....	10
3. Estimation de la perte en accroissement des forêts françaises au cours de la sécheresse de 2003...	11
3.1. Les précédents calculs d'estimation.....	11
3.2. Calcul de la perte globale.....	12
3.2.1. Choix de la référence.....	12
3.2.2. Définition de la formule d'estimation.....	14
3.2.3. Cas des arbres morts.....	17
3.2.4. Difficultés de lecture de certains cernes.....	18
3.3. Perte par région et par essence.....	21
3.4. Discussion.....	22
4. Etude des facteurs jouant un rôle dans l'effet de la sécheresse sur l'accroissement des arbres	25
4.1. Elaboration de la méthode.....	25
4.1.1. Principe.....	25
4.1.2. Exemple des départements.....	28
4.2. Détermination des facteurs principaux.....	28
4.2.1. Facteur sécheresse.....	28
4.2.2. Facteur peuplement.....	35
4.2.3. Facteur essence.....	39
4.2.4. Facteur station.....	48

4.2.5. Conclusion du modèle.....	55
4.3. Explication de différents facteurs par le modèle.....	57
4.3.1. Effet opérateur.....	57
4.3.2. Différence entre départements voisins.....	57
4.3.3. « Rôle » du propriétaire.....	58
4.3.4. Structure du peuplement.....	59
5. Conclusion et discussion.....	61
5.1. Résultats finaux.....	61
5.2. Avantage de ces résultats par rapport aux autres études.....	62
5.3. Les limites de l'étude et des mesures.....	63
5.3.1. Limites de l'étude.....	63
5.3.2. Amélioration des mesures possibles.....	64
5.4. Perspectives.....	64
Bibliographie.....	65
Liste des contacts.....	67
Table des annexes.....	69
Annexe 1. Les données récoltés et calculées par l'IFN pour chaque arbre et placette.....	70
Annexe 2. Description des statuts particuliers des arbres des les données IFN.....	73
Annexe 3. Comparaison des résultats de Verdier (2005a) avec les encadrements des pertes réalisés par essence et par départements pour les groupes suffisamment important.....	74
Annexe 4. Les valeurs utilisées pour les calculs de BILJOU.....	78
Annexe 5. Résultats des régressions univariées ($ir03brut = f(ir2_5brut ; \text{variable})$ sous différentes combinaisons) des variables climatiques, dendrométriques et environnementales pour tous les individus vivants lors de l'inventaire (à l'exception des données de mai 2004 de la Creuse).....	79
Annexe 6. L'anatomie du bois de certaines essences, observées au microscope électronique à balayage (source : Schweingruber, 1990).....	85
Annexe 7. Description des caractères du modèle pour les arbres en fonction de leur essence à partir de boîtes à moustache.....	87

1. Introduction

Les événements climatiques extrêmes ont des impacts sur les forêts. Les tempêtes ou les incendies peuvent entraîner des pertes plus ou moins massives d'arbres, les sécheresses et les canicules provoquent des dépérissements, des baisses de production et les périodes de gel intensif peuvent altérer le bois sur pied. Or, ces événements sont appelés à devenir plus fréquents au cours du XXI^e siècle en plus du réchauffement climatique. Le changement du climat et les événements extrêmes se trouvent donc au centre des problématiques forestières : santé des forêts, mutation des essences ou encore changements des méthodes de sylviculture. La tempête de janvier 2009 nous l'a rappelé, mettant à plat, 9 ans après le désastre de décembre 1999, les méthodes de production de la forêt landaise. Les incendies de plus en plus récurrents en raison des étés secs et chauds touchent également les forêts de production. De même, la sécheresse et la canicule de 2003 est toujours d'actualité en forêt en raison du dépérissement qu'elle a causé et de la menace d'événements similaires de plus en plus importante. L'accroissement courant, en augmentation globale depuis plusieurs décennies subit des baisses lors de ces sécheresses intensives, enregistrant cette perte dans les cernes des arbres.

De nombreux laboratoires ou organismes utilisent d'ailleurs ces enregistrements biologiques, de manière plus ou moins fine et à des échelles temporelles et spatiales plus ou moins grandes, à travers la dendrochronologie, afin d'étudier la réaction de croissance des essences et des forêts à ces événements climatiques. C'est le cas de l'Institut national de recherche agronomique (l'INRA). D'autres utilisent ces données simplement pour quantifier l'accroissement des forêts au fur et à mesure du temps, comme le fait l'Inventaire forestier national (l'IFN).

L'impact de la sécheresse constitue donc une des multiples facettes des conséquences du changement climatique sur la forêt et peut devenir primordial si ces événements se multiplient. Une prévision et une adaptation de la gestion à ces sécheresses et ces canicules passent donc par une étude d'un exemple type, celui de l'été 2003 en Europe et particulièrement en France. Une telle recherche permet ainsi d'expliquer et de comprendre la réponse de la forêt à ces sécheresses extrêmes du changement climatique (Van der Werf, 2007).

1.1. *La sécheresse et la canicule de 2003*

Même dans la perspective du changement climatique, la sécheresse et la canicule de l'été 2003 reste un événement exceptionnel. Celle-ci a été caractérisée en France et en Europe par sa longue durée. Les températures, l'insolation et la sécheresse de l'air ont fortement augmenté par rapport à la normale, jusqu'à 4 à 7°C supplémentaires pour les températures de juin à août. En outre, les précipitations ont été inférieures à la normale de février 2003 à juin 2004 (Rebetez, 2006). La sécheresse a donc été très longue, contrairement à celle de 1976, et est venue à bout de toutes les réserves en eau du sol, pourtant pleines au début de cette année là (carte OIEAU). Elle était également d'une forte intensité et est intervenue plus tôt que d'habitude dans l'année (Bréda, 2004). Cette longue durée a exercé, par la sécheresse qu'ont provoquée ces caractéristiques, une pression et un stress chronique sur la végétation, provoquant des pertes de croissance et des dépérissements. En effet, le contrôle du fonctionnement hydrique des arbres se fait au niveau des stomates, par lesquels, lorsqu'ils sont ouverts, l'eau s'évapore, faisant ainsi circuler les flux hydriques, et le dioxyde de carbone pour la photosynthèse pénètre par les stomates. Lors d'un déficit hydrique et d'une sécheresse, les stomates se ferment, conservant ainsi l'eau restante dans l'arbre mais empêchant la synthèse de composés

organiques et limitant ainsi la croissance. Si la fermeture est prolongée, des risques d'embolie apparaissent, ce qui conduit à un affaiblissement de l'arbre, voire à un dépérissement (Bréda, 2003).

Cette sécheresse qui s'est manifestée partout en France a donc engendré une vague massive de dépérissement ainsi que des pertes de croissance pour les arbres qui la composent. Les études ne manquent pas concernant ces pertes. Ainsi, les pins sylvestres et les épicéas d'Autriche ont subi une baisse de croissance de 35 % par rapport à celle de 1998 à 2002 (Pichler, 2007). Jolly et Dobbertin (2005) observe une plus faible perte en altitude, expliquée par une remontée de l'optimum des essences. Une autre étude en Europe Centrale met également en évidence ce lien avec l'altitude, chiffrant la perte de croissance par rapport à l'année 2002 aux alentours de 40 % pour l'épicéa commun et de 65 % pour le hêtre à des altitudes d'environ 500 m. D'autres études se sont également penchées sur les flux de carbone au cours de l'été 2003 à partir de tours de mesure et de modélisation. Ainsi, certaines forêts sont devenues, le temps des mois de juillet, août et septembre 2003, des sources de carbone (Ciais, 2005, Viovy, 2005). Cependant, peu d'études ont été réalisées en France sur ce sujet. De plus, celles-ci sont souvent faites à petite échelle et étudient uniquement quelques facteurs environnementaux ou quelques caractéristiques des arbres. Les résultats de ces études restent donc limités.

1.2. Contexte de l'étude

A la suite de 2003, de nombreuses organisations se sont donc intéressées à la résistance des forêts françaises aux sécheresses, de nombreuses estimations climatiques prévoyant une récurrence croissante de ce type d'évènements extrêmes. C'est ainsi que l'Agence nationale de la Recherche (ANR) a lancé un appel d'offre à l'origine du projet DRYADE piloté par l'INRA et réunissant une dizaine de partenaires dont l'IFN ou encore l'ONF. Ses acteurs se sont donc lancés dans de nombreuses études. Des thèses et des stages concernés par cette problématique ont vu le jour pour étudier, souvent essence par essence, la résistance de la forêt française.

De plus, lors de la campagne de 2004 de relevés de terrains, l'IFN a mesuré exceptionnellement le cerne de 2003 afin d'étudier l'impact de la sécheresse sur la croissance des forêts françaises. Ces données ont déjà été étudiées en partie par l'IFN lors d'une première approche estimant la perte de croissance par départements et par essence par rapport aux quatre années précédant la sécheresse (Verdier, 2005a, 2005b). Ces premiers résultats avaient notamment permis de remarquer la disparité entre départements, même proches, comme la Haute-Vienne qui paraissait beaucoup moins touchée que la Creuse qui est pourtant un département limitrophe. De plus, les résineux semblaient avoir plus souffert de la sécheresse. Enfin, une relation avec l'état hydrique des sols des départements a été mise en évidence par comparaison visuelle avec des cartes de cumul de précipitation ou de température.

A la suite de ces résultats, l'IFN a voulu approfondir ces analyses et le projet de stage a été proposé en partenariat avec l'INRA dans le cadre de ce projet DRYADE avec également l'intention d'avoir des retours sur la pertinence de telles données. Ce stage a donc pour but d'évaluer la perte de croissance de la forêt française à partir des relevés exceptionnels de la campagne de 2004 de l'IFN pour en estimer l'intensité réelle à grande échelle.

Après une présentation de ces données et des méthodes de calcul d'accroissement de l'IFN, ce rapport traitera donc de l'estimation de la perte de la forêt française et de l'élaboration d'une méthode de calcul adaptée aux données de l'IFN. Il présentera ensuite les facteurs qui ont été les plus discriminants pour expliquer cette perte de croissance, que ce soit les variables descriptives de la sécheresse ou celle décrivant l'arbre, le peuplement et son environnement afin de déterminer les prédispositions de chaque individu à une perte.

2. Présentation et calcul des données de l'IFN

2.1. Les données de l'IFN

2.1.1. Présentation de la récolte de données

Depuis fin 2004, année de la mise en place de la nouvelle méthode d'inventaire, une campagne de mesures est organisée chaque année sur quelques milliers de placettes réparties de façon systématique sur l'ensemble de la France.

Pour cette étude, nous utiliserons des données issues de l'ancienne méthode d'inventaire (campagne de début 2003). Aussi, les paragraphes qui suivent se rapportent à l'ancienne méthode, quelques changements ayant eu lieu avec la nouvelle méthode.

Avant novembre 2004, l'IFN réalisait un inventaire département par département, et utilisait un échantillonnage stratifié. Il parcourait chaque année une dizaine de départements. Chaque département était ainsi inventorié tous les 12 ans environ. Pour chaque département, des zones de forêts jugées homogènes quant à la région forestière, la propriété et le type de formation végétale (identifié par photo-interprétation) étaient cartographiées. Ensuite, un certain nombre d'informations (ex. : utilisation du sol, composition...) étaient renseignées par cette photo-interprétation sur des points d'une grille systématique. Ensuite, pour chacune de ces zones homogènes, un échantillonnage systématique était réalisé et enfin, de nombreuses caractéristiques de ces points étaient décrites. Le poids statistique de chaque point, appelé surface d'extension (noté sx_2), était égal à la surface de la strate divisée par le nombre de points échantillonnés dans cette strate.

Sur le terrain, les agents prélèvent un certain nombre de données dendrométriques et stationnelles mais également sur les conditions d'exploitation (cf. annexe 1). Ces informations peuvent être des mesures continues, comme la circonférence à 1,30 m ou la hauteur de l'arbre, ou bien organisées en classes, comme la situation topographique ou le statut de l'arbre.

Les observations sont réalisées sur des placettes concentriques. Pour les informations prises sur les arbres, la taille de la placette dépend de la classe de diamètre de l'arbre (tableau 1). Le seuil de recensabilité est fixé à 7,5 cm à 1,30 m.

Classe de diamètre	Diamètre minimum	Diamètre maximum	Rayon de la placette
Petit bois	7,5 cm compris	22,5 cm	6 m
Bois moyen	22,5 cm compris	37,5 cm	9 m
Gros bois	37,5 cm compris	-	15 m
Arbres morts, souches ou chablis	7,5 cm compris	-	15 m

Tableau 1. : Classes de diamètre et taille des placettes dans les relevés IFN.

Chaque arbre est renseigné notamment sur son état de santé, son statut dans les peuplements pour les arbres vifs et l'estimation de la date de son arrêt de croissance pour les arbres morts et les chablis (annexe 2). De plus, l'IFN préfère mesurer la circonférence des arbres à 1,30 m ($C_{1,30}$) car celle-ci présente une meilleure précision. Le diamètre à 1,30 m ($D_{1,30}$) était ensuite calculé à l'IFN d'après la formule de Chevrou (Chevrou, 1975) issue d'une régression :

$$D_{1,30} = -\frac{5}{32} + \frac{5}{16} \times C_{1,30} \quad (D_{1,30} \text{ et } C_{1,30} \text{ en mètre})$$

Pour chacun de ces arbres, un carottage est réalisé à une position systématique, à 1,30 m de hauteur et au niveau de la tangente du tronc passant par le centre de la placette. Les longueurs des 5 et 10 derniers cernes, correspondant théoriquement à l'accroissement en diamètre des 5 et 10 dernières

années, sont mesurées. Ces accroissements associés au diamètre permettent de définir au cours de quelle période l'arbre est devenu recensable, c'est-à-dire à laquelle l'arbre a dépassé 7,5 cm de diamètre (au cours des 5 ou 10 années précédentes ou bien avant).

Toute cette récolte de données permet ensuite de calculer le volume total de bois fort, la densité ou encore des données de peuplements comme la surface terrière à l'hectare mais doit s'adapter au statut de chaque arbre (IFN, 1994, 2003).

2.1.2. Ajustement et calcul de accroissement au statut des arbres

En effet, si les accroissements des arbres vifs et déjà recensables il y a 5 ans n'ont pas besoin de réajustement, ceux qui le sont devenu au cours des cinq dernières années ont besoin d'être considérés différemment. L'IFN distingue ainsi pour ces arbres deux parties de l'accroissement en volume : (i) leur accroissement pendant la fraction de la période de 5 ans au cours de laquelle ils étaient recensables, correspondant à la moitié de leur accroissement sur les 5 ans (en effet, on admet qu'en moyenne ces arbres sont devenus recensables à mi-période), et (ii) le recrutement en volume, c'est-à-dire le volume des arbres au moment où ils sont devenus recensables, censé être à mi-période (calculé en soustrayant la moitié de l'accroissement des 5 dernières années au volume actuel). Pour cette étude, ce sera surtout le premier terme qui nous intéressera.

Le cas particulier des arbres présentant moins de 5 cernes demeure. Leur accroissement est renseigné sur les cernes visibles (irn). Pour cette étude, une valeur d'ir5 a été calculée à partir de cet irn et du nombre de cernes observés.

Les arbres morts, les chablis ou les arbres coupés, depuis moins de 5 ans, ne font pas l'objet de mesures d'accroissement mais uniquement de mesures de circonférences au niveau du sol. Ces arbres sont classés selon l'estimation de leur arrêt de croissance et la cause de cet arrêt (annexe 2). Leurs accroissements sont estimés d'après un tarif réalisé à chaque campagne à partir des accroissements des arbres vifs par essence, par classe de diamètre, par origine (taillis ou futaie) et par département. Ce tarif est réalisé à partir de la formule suivante

$$Ir5 = C0^2 (\text{arbre mort}) \times \frac{\text{SOMME (ir5) des arbres vifs}}{\text{SOMME (C0^2) des arbres vifs}} \quad (1)$$

Ces valeurs d'ir5 sont donc obtenues pour chaque arbre mort ou chablis. Elles sont ensuite multipliées par un coefficient représentant l'espérance de la durée au cours de laquelle l'arbre a produit du bois pendant les 5 dernières années, c'est-à-dire avant qu'il ne soit mort ou abattu (IFN, 1994, 2003).

2.2. L'exception de 2004 : mesure de la dernière année

2.2.1. Mesure de l'accroissement radial de 2003

Suite à la sécheresse de 2003, l'IFN a décidé de réaliser des mesures supplémentaires du cerne 2003 seul avec l'intention d'évaluer l'impact de cette sécheresse sur la production forestière. Ces mesures ont été faites pendant les mois de janvier à avril 2004 compris. Pour ces mesures, des loupes micrométriques de terrain ont été fournies aux équipes afin de mesurer ces accroissements, nommés ir03, au dixième de millimètre près (Instruction spéciale accroissement 2003). Si ces mesures n'ont pas été faites sur toutes les placettes de cette période, en revanche, elles l'ont été pour tous les arbres vifs des placettes mesurées, à l'exception des noyers qui, pour des raisons de pertes de valeur du bois, sont exempts de carottage. On ne conserve donc que les arbres des placettes ayant fait l'objet d'une mesure du cerne 2003, ce qui représente 30424 arbres dont 21532 vifs qui ont été carottés (sans compter les 9 noyers). En outre, certaines placettes ont été visitées entre janvier et avril 2004, mais ne présentaient pas d'arbres recensables. Au total, 2143 placettes sont concernées, dont 1947 présentent

des arbres recensables. On dispose donc pour ces arbres des accroissements ir10, ir5 et ir03, mesurés pour les arbres vifs, calculés par tarif pour les arbres morts.

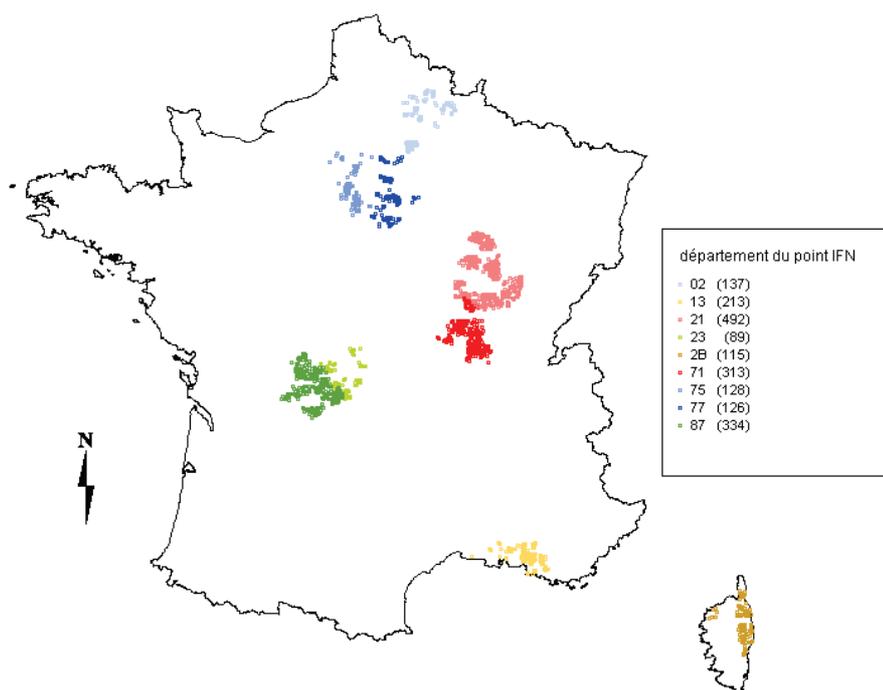


Figure 1. Localisation des points IFN présentant des mesures du cerne 2003

Les inventaires comprenant la mesure du cerne 2003 concernent les départements suivants (Figure 1) :

- de l'Aisne (02), avec 1878 arbres ;
- des Bouches du Rhône (13), avec 1790 arbres ;
- de Haute Corse (2B), avec 1560 arbres ;
- de Côte d'Or (21), avec 7792 arbres ;
- de la Creuse (23), avec 1589 arbres ;
- de Saône et Loire (71), avec 5764 arbres ;
- de Seine-et-Marne (77), avec 1601 arbres ;
- des départements franciliens autres que la Seine-et-Marne (noté « 75 ») avec 1433 arbres ;
- de Haute-Vienne (87), avec 7017 arbres.

En raison de la proximité géographique de certains, ils ont été regroupés pour l'analyse en quatre régions : la Bourgogne (21 et 71), le Limousin (23 et 87), la Méditerranée (13 et 2B) et le Nord (02, 75 et 77). On peut d'ors-et-déjà noter que cette base de données compte une très grande quantité d'arbres par rapport aux autres études.

2.2.2. Calcul d'accroissement

Les relevés dendrométriques permettent à l'IFN de calculer de manière assez précise le volume bois fort, le diamètre et la surface terrière à 1,30 m de chaque arbre. Pour les accroissements, le calcul de ceux en surface terrière et en volume seront utiles pour les estimations de perte. Afin de raisonner sur la même base, on accorde les valeurs des grandeurs et des accroissements du point de vue de l'écorce, les grandeurs de l'arbre étant données sur écorce et celle de l'accroissement en diamètre sous écorce. On prend donc le parti de faire des mesures sur écorce et les accroissements de l'écorce sont considérés comme étant proportionnels à ceux du bois sans l'écorce. On réalise donc la

transformation suivante, comme le fait habituellement l'IFN (ir : accroissement en diamètre, D13 : diamètre à 1,30 m) :

$$\text{Ir sur écorce} = \text{ir sous écorce} \times \frac{\text{D13}}{\text{D13 sous écorce}}$$

L'accroissement en surface terrière est nommée ign. En supposant que l'arbre soit circulaire de diamètre d_{2003} en 2003 et d'accroissement radial (du rayon et non du diamètre) irn au cours des n dernières années, ign s'exprime de la manière suivante (IFN, 2003) :

$$\text{ign} = g_{2003} - g_{(2003-n)} = \pi \times \text{irn} \times (d_{2003} - \text{irn}) \quad (2)$$

L'accroissement en volume prend quant à lui en compte l'accroissement en radial mais aussi en hauteur. On part cette fois du principe que :

$$V_{2003} = k \times f_{2003} \times D_{2003}^2 \times H_{2003}$$

où f et H sont respectivement le coefficient de forme et la hauteur et k un coefficient multiplicateur fixe comprenant notamment π .

A partir de cette formule, en considérant le coefficient de forme constant dans le temps, l'accroissement en volume se définit de la manière suivante :

$$\text{ivn} = V_{2003} \times \left(1 - \frac{(D_{2003} - \text{irn})^2}{D_{2003}^2} \times \frac{(H_{2003} - \text{ihn})}{H_{2003}} \right) \quad (3)$$

où ihn est l'accroissement en hauteur de l'arbre au cours des n dernières années et V_{2003} est le volume calculé par un cubage complet (IFN, 1985). Cette méthode montre bien les limites du calcul de l'accroissement en volume : il nécessite des approximations et se base sur l'accroissement en hauteur qui est difficile à estimer sur le terrain (IFN, 1990). Avant une certaine date, l'accroissement en volume se calculait d'ailleurs sans cette valeur de hauteur.

Pour les accroissements des arbres morts, on réalise un tarif pour les accroissements en surface terrière et en volume de la même manière que l'accroissement en diamètre à partir des arbres vifs et des C0. Pour qu'il y ait une homogénéité entre les estimations d'accroissement des arbres morts et abattus, on ne réalise ces tarifs qu'à partir des arbres ayant un $ir03$ afin d'avoir le même échantillon de base pour ces valeurs (IFN, 2003).

2.2.3. Calcul des poids des placettes

Chaque placette possède normalement un poids, nommé $sx2$ par l'IFN, correspondant à la surface dont elle est représentative. La suppression de la majorité des placettes réalisées en 2004 en raison de l'absence de mesures de l' $ir03$ rend les poids statistiques des placettes faux. Les surfaces des différentes strates sont donc divisées par le nombre de placettes pour lesquelles les cernes 2003 ont été mesurés. On obtient ainsi des $sx2$ corrigés. Or, certaines placettes ne présentent pas d'arbres mesurés et donc aucune mesure permettant de dire si ces placettes étaient dans le plan d'échantillonnage de l' $ir03$. On conserve ces placettes qui n'ajoutent rien aux valeurs d'accroissements globaux mais qui permettent de réajuster les poids des autres placettes. Toutefois, certaines strates n'ont aucune placette où l' $ir03$ a été mesuré. La perte de ces strates n'est donc pas prise en compte dans l'étude. Ces strates non représentées sont réparties un peu partout en France. De plus, pour les strates représentées, certaines placettes peuvent avoir un poids statistique important, et donc être surreprésentées, ce qui soumet les résultats à des risques de biais.

2.2.4. Gestion des erreurs de saisie

Une fois relevées sur le terrain, les données sont vérifiées, et corrigées le cas échéant, avant d'être enregistrées dans les bases de données de l'IFN. Malgré ces procédures, quelques erreurs de saisies ont cependant été mises à jour au cours de ce stage. Par exemple, certains arbres présentent un $ir5$ inférieur à l' $ir03$. Face à ces points ayant échappé aux vérifications, la politique de l'IFN est de les

conserver malgré leurs valeurs aberrantes. En effet, ces points ne sont que la face visible d'autres erreurs de saisie potentielles. Les supprimer reviendrait à créer un biais dans les résultats finaux. Ces erreurs étant très peu nombreuses par rapport à la quantité de données, on les conservera donc dans un premier temps.

Des relevés présentant des ir03 ont été réalisés au mois de mai 2004, bien que les instructions précisent qu'elles devaient être faites entre janvier et avril. Ces mesures tardives ont été réalisées uniquement en Haute-Corse. Malgré les risques de confusion entre les cernes de 2003 et 2004 à cette période de l'année, les conserver permettrait de compléter le jeu de données, d'autant plus que ce département présente peu de ces mesures par rapport aux autres. Ces placettes seront donc conservées. Cette mesure a été prise en compte dans les résultats donnés précédemment.

3. Estimation de la perte en accroissement des forêts françaises au cours de la sécheresse de 2003.

3.1. *Les précédents calculs d'estimation.*

Il existe plusieurs travaux sur la perte de croissance de 2003. Ils utilisent souvent la même méthode, simple et qui semble la plus évidente, de la comparaison de l'accroissement 2003 avec l'accroissement moyen des années précédentes. Cependant, certaines limites sont atteintes par ces méthodes :

- Tout d'abord, l'accroissement évolue avec l'âge. En effet, la croissance radiale d'un arbre à partir d'un certain âge, dans les mêmes conditions climatiques et de concurrence, diminue dans le temps par un processus purement physiologique alors que l'accroissement en surface terrière et en volume augmente puisqu'ils intègrent le diamètre dans leur formule (formule 2 et 3). Pour les arbres les plus âgés, il y a une stabilisation des longueurs de cerne. La comparaison de l'accroissement en diamètre 2003 avec l'accroissement moyen des années précédentes est donc légèrement biaisée.

- Par ailleurs, la croissance varie d'une année sur l'autre en fonction des conditions climatiques. Ainsi, la prise en compte d'une période plus courte risque aussi de présenter des biais à cause des variations de croissance d'une année sur l'autre. En particulier, l'année 2002 avait été déjà plus sèche que les années précédentes (Pichler, 2007).

Il est donc possible qu'il y ait, dans les études existantes, (i) une surestimation liée à la non prise en compte de l'évolution de la croissance avec l'âge, et (ii) une sous-estimation de la perte, une des années de référence étant déjà plus sèche que d'habitude. Une première nécessité se présente donc dans cette estimation de la perte de croissance dans les départements étudiés : celle de prendre une durée de référence raisonnable ou bien de trouver une autre référence qui nous permette de mieux approcher la réalité.

Ensuite, il se pose la question de l'échelle spatiale ainsi que de la formule à utiliser. Dans son étude, Verdier (2005a) calcule les pertes par essence et par département, ce qui ne donne pas de chiffre de perte globale pour l'ensemble du territoire inventorié.

Enfin, l'IFN ne mesure que l'accroissement des arbres vifs et extrapole cet accroissement aux chablis et aux arbres morts ou coupés sur les 5 années précédant l'inventaire. L'accroissement théorique de ces arbres sur ces 5 ans est calculé à partir d'un tarif réalisé pour un groupe d'arbre appartenant à la même essence, au même département, à la même origine (taillis ou futaie) et à la

même classe de diamètre (Formule 1). Cette méthode pose cependant deux problèmes importants. En effet, (i) on ne connaît pas exactement leur date d'arrêt de croissance et (ii) leur accroissement est basé sur celui des arbres vifs, ce qui crée un biais pour les arbres morts puisqu'ils n'avaient pas la même vigueur juste avant de mourir.

Cette étude a pour but, tout d'abord, de quantifier la perte de la forêt inventoriée. La solution d'étudier celle-ci uniquement sur certains arbres, par exemple les plus âgés pour avoir une stabilité de croissance de cerne d'une année sur l'autre, ne reflète donc pas cette perte globale. Nous allons donc procéder à l'élaboration de la formule de l'estimation de la perte de croissance.

3.2. Calcul de la perte globale.

Le principe de cette estimation est de comparer la croissance de 2003 avec la croissance qu'il y aurait eu sans la sécheresse. Cela nécessite avant tout la définition d'un accroissement de référence.

3.2.1. Choix de la référence.

Nous connaissons les accroissements des 5 et 10 dernières et de la dernière année, nommé respectivement ir_5 , ir_{10} et ir_{03} pour le rayon, ig_5 , ig_{10} et ig_{03} pour la surface terrière et iv_5 , iv_{10} et iv_{03} pour le volume. Quand nous parlerons de l'accroissement en général, nous utiliserons les termes Acc_5 , Acc_{10} et Acc_{03} . L'accroissement annuel sur la période entre 1999 et 2002 est calculé par une simple différence entre Acc_5 et Acc_{03} , puis par une division par les quatre années. Cette moyenne en général sera appelée Acc_{2_5} . Nous utiliserons enfin les termes ir_{2_5} pour l'accroissement en diamètre, ig_{2_5} pour celui en surface terrière et enfin iv_{2_5} pour celui en volume.

Comme il a été dit précédemment, la comparaison de Acc_{03} avec un accroissement en 2003 qui aurait été égal à Acc_{2_5} sans la sécheresse est soumis à un certain nombre de biais notamment une surestimation pour l'accroissement en diamètre et une sous-estimation pour celui en surface terrière et en volume en raison de l'évolution naturelle de la croissance avec l'âge. Cette évolution peut être constatée aisément en représentant les accroissements en fonction de l'âge sur un graphique. La figure 3 en montre un exemple en représentant la courbe de l' ir_{2_5} et ig_{2_5} des chênes sessiles en fonction de l'âge. Cette courbe a été obtenue en réalisant une régression cubique et quadratique à partir des données de l'IFN mesurées sur les placettes utilisées dans l'étude. L'âge a été mesuré sur des individus de la ou des essences dominantes, ayant accès à la lumière. Cette mesure est faite sur un ou deux arbres par classe de diamètre et par placette, tiré de manière aléatoire systématique. Ces courbes représentent donc l'évolution globale des accroissements en fonction de l'âge pour les arbres dominants ou codominants.

Une solution pour la prise en compte de l'évolution de l'accroissement en fonction de l'âge serait de définir une valeur de référence représentant l'accroissement que devrait avoir l'arbre au cours de l'année 2003 dans des conditions météorologiques normales. Une telle valeur peut s'obtenir par interpolation linéaire à partir de l'accroissement entre 1994 et 1998 et celui entre 1999 et 2002. Elle correspond alors à la somme de Acc_{2_5} et de la variation annuelle de l'accroissement entre l'accroissement annuel entre 1994 et 1998, Acc_{6_10} (milieu 1996), et Acc_{2_5} (début 2001) multiplié par les 2,5 années entre début 2001 et milieu 2003 (Figure 2). La formule de cet accroissement théorique, nommé Acc_{03th} , serait donc :

$$Acc_{03th} = Acc_{2_5} + 2,5 \times \frac{(Acc_{2_5} - Acc_{6_10})}{4,5}$$

On obtient ainsi une estimation de l'accroissement qu'aurait eu l'arbre en 2003 si sa croissance avait continué sur sa dynamique et si le climat avait évolué de la même façon qu'entre les deux périodes précédentes.

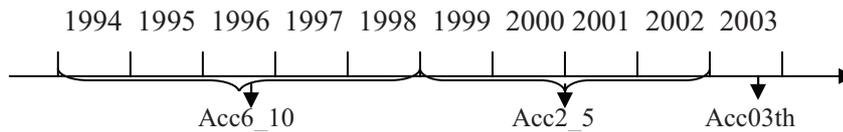


Figure 2. Période de calcul des accroissements pour l'interpolation linéaire de Acc03th.

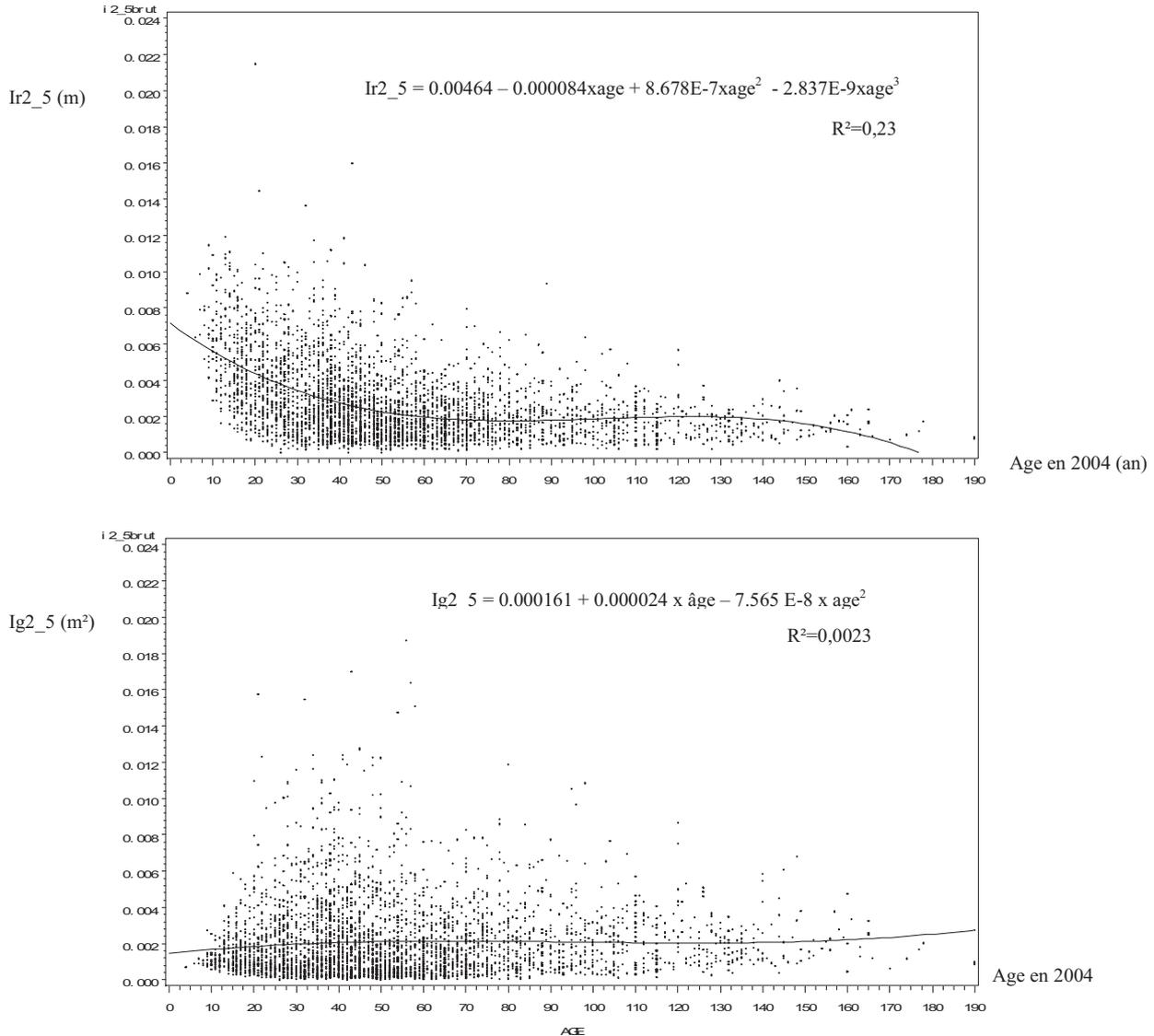


Figure 3. Relation âge-Acc2_5 pour le diamètre et la surface terrière pour le chêne sessile

Cependant Acc03th, comme toutes les références est à l'origine de certaines imprécisions :

- la relation entre l'accroissement et l'âge n'étant pas linéaire, ir03th sous-estime cette croissance théorique alors que ig03th et iv03th la surestime ;
- il peut y avoir des estimations de Acc03th négatives ;
- le climat n'ayant pas été constant au cours des neuf années précédentes (1998, 1997 et 1994 ont subi des vagues de chaleur assez importante au cours de la première période (Verdier, 2005b) alors que la suivante n'en a présenté qu'une en 2002 (Pichler, 2007)), la croissance de 1994 à 1998 a été inférieure à celle de 1999 à 2002. Ceci crée une surestimation de ir03th ;
- le boostage de la croissance des arbres ayant survécu à la tempête de 1999 dans les années qui ont suivi en raison de la baisse de la concurrence biaise l'estimation d'Acc03th ;

- Acc03th est une estimation alors que Acc2_5 est une valeur réelle.

On compare ces deux valeurs de référence, Acc2_5 et Acc03th, pour une estimation de la perte par individu.

➤ *prise en compte de l'effet âge sur l'accroissement*

A partir d'une série d'accroissement-type d'un arbre au cours de sa vie, réalisé par des suites mathématiques donnant la forme générale dans des conditions climatiques constantes de l'évolution des longueurs de cernes avec l'âge, Acc03th et Acc2_5 sont calculés. Ces deux estimations présentent un décalage dans le temps avec l'accroissement réel car la référence se situe dans la période passée, mais également en amplitude pour ir03th dans le jeune âge de l'arbre (Figure 4).

On simule ensuite une perte de 20 % de la croissance réelle pour chaque année, puis on estime la perte de l'arbre par un ratio de l'accroissement réel avec la valeur de référence. La courbe de la figure 4 montre donc les valeurs qu'auraient les estimations de perte s'il y avait eu une perte réelle de 20% à l'âge n. Or, si les deux estimations de la perte sont très différentes dans le jeune âge des arbres (cela est dû à la forme de la courbe d'accroissement), l'estimation d'après Acc03th tend beaucoup plus vite vers la valeur réelle.

De plus, pour les trois types d'accroissement, on voit que la perte réelle est comprise entre les pertes d'après Acc2_5 et Acc03th. Ainsi, on conservera Acc03th et Acc2_5 comme références pour comparer les résultats et parce qu'ils semblent faire un encadrement de la perte réelle.

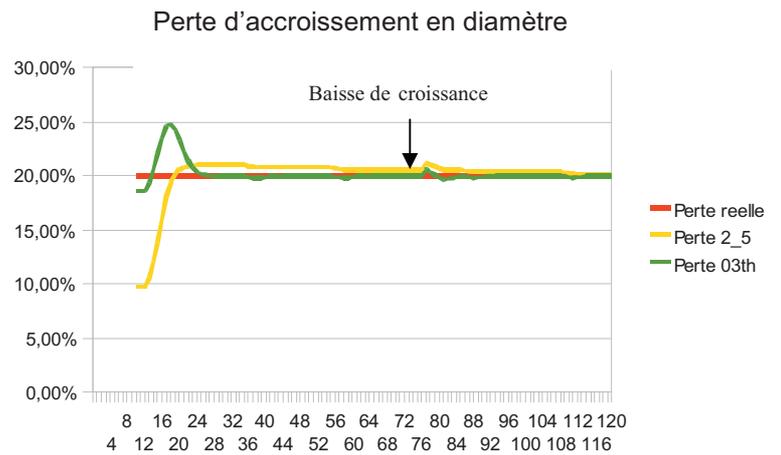
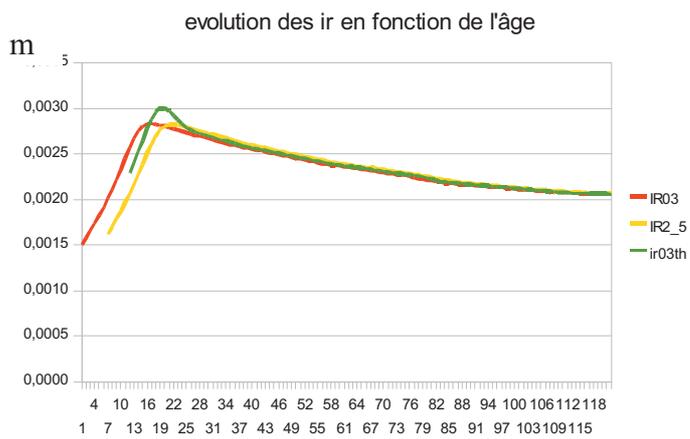
3.2.2. Définition de la formule d'estimation.

La formule de la perte moyenne peut se faire soit à partir d'une moyenne de l'estimation de la perte pour chaque arbre (calculée à partir du ratio de la croissance en 2003 sur la perte de référence), soit en faisant un ratio de la somme des accroissements de 2003 de tous les arbres sur la somme des accroissements de référence. La première méthode donne le même poids aux pertes relatives de chacun des arbres, quelle que soit leur perte en valeur absolue, alors que la deuxième estime la perte relative globale de la forêt, en tenant compte de la valeur absolue de chaque perte. De plus, la deuxième méthode permet de lisser les valeurs extrêmes. En effet, si un cas théorique de croissance a été présenté dans le paragraphe précédent, dans la réalité les valeurs de Acc6_10 et Acc2_5 peuvent être très différentes et donner des valeurs de Acc03th négatives ou bien des valeurs très élevées. Ainsi, les estimations de perte par arbre peuvent être très variées mais surtout, que ce soit en utilisant Acc2_5 ou Acc03th en référence, sont théoriquement distribuées sur un intervalle allant de 0 à plus l'infini. Cette dissymétrie surestimerait la perte au moment du calcul de la moyenne. On préférera donc le ratio des sommes pour estimer la perte globale.

Il faut, lors de l'addition des accroissements, pondérer ceux-ci par le coefficient de pondération de chaque arbre (« pond » dans les tables IFN) qui prend en compte la surface des sous placettes de mesure des arbres (en fonction de leur catégorie de diamètre). Il faudra aussi pondérer avec la surface représentée par chaque placette (sx2 corrigé). On arrive donc à la formule suivante :

$$\text{Perte} = 1 - \frac{\text{SOMME par placette } i (\text{sx}2i * \text{SOMME par arbre } j (\text{poids}j * i03j))}{\text{SOMME par placette } i (\text{sx}2i * \text{SOMME par arbre } j (\text{poids}j * i_referencej))}$$

Sx2i : poids de la placette i
Poidsj : poids de l'arbre dans la placette
I03j : accroissement de l'arbre j en 2003
I_referencej : accroissement de référence de l'arbre j.



evolution des ig en fonction de l'âge

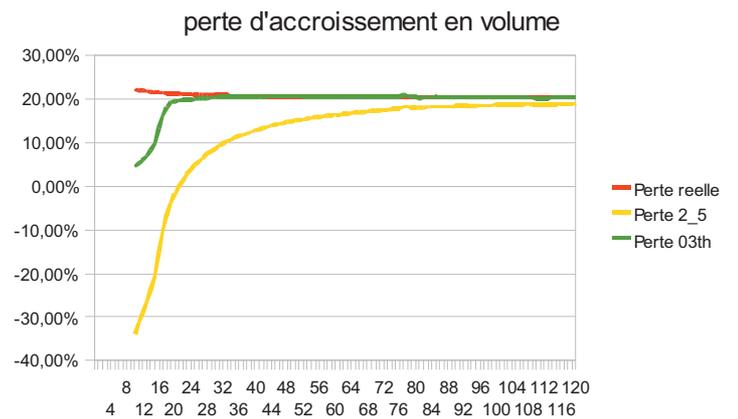
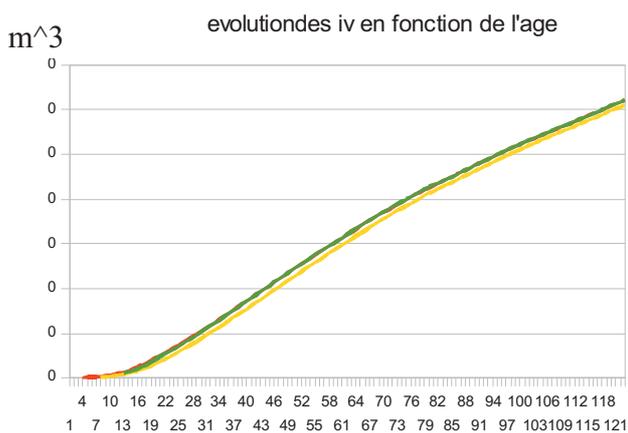
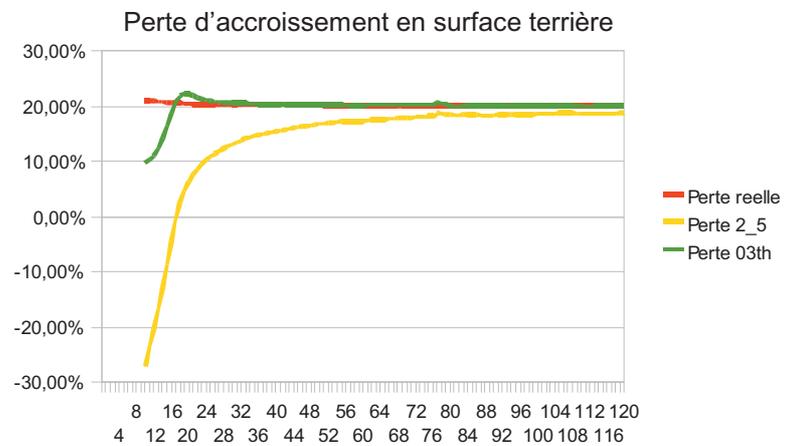
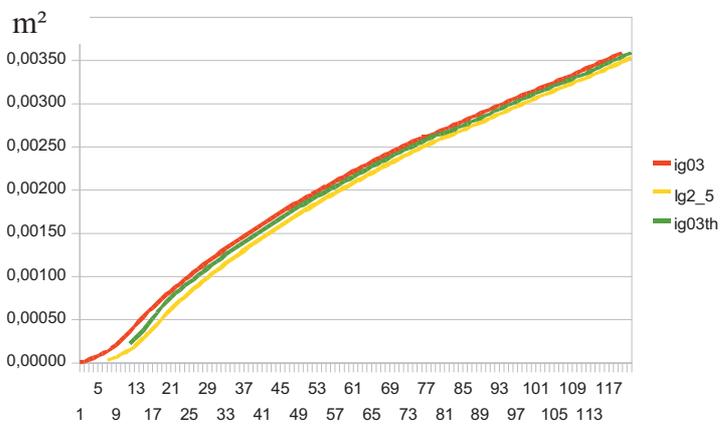


Figure 4. Evolution des accroissements avec l'âge et estimation des pertes d'accroissement pour les différentes références.

Il reste encore à définir la valeur de chaque accroissement qui sera intégrée à la formule. En effet, les valeurs brutes d'accroissement créent des biais qu'il faut supprimer en considérant les accroissements uniquement à partir du diamètre précomptable ou avant que l'arbre n'arrête sa croissance. Il y a donc trois groupes à considérer :

- les arbres vifs déjà précomptables au début de l'année 2003. On garde pour ceux-là les valeurs brutes ;
- les arbres passés à la futaie au cours de l'année 2003. On calcule dans ce cas la différence entre la fin de la période et le diamètre (ou la surface terrière) précomptable ;
- les arbres morts, coupés ou chablis au cours de la période de croissance. En effet, comme ils ont été coupés au cours des 5 ou 2 dernières années, leur contribution à l'accroissement de 2003, réel ou de référence, n'est pas égale à tout leur accroissement brut.

La solution est de multiplier l'accroissement par la probabilité qu'il a d'avoir poussé cette année-là. Ces coefficients s'adaptent donc aux différents cas (Tableau 2).

cas	Acc03	i_reference
Arrêt de la croissance entre 1999 et 2001	0	0
Arrêt de la croissance entre 2002 et 2003	1/4 (Acc03 estimé par tarif)	1/4 (Acc03th estimé par tarif) ou 1/4 (Acc2_5 estimé par tarif)
Arrêt de la croissance entre 1999 et 2003	1/10 (Acc03 estimé par tarif)	1/10 (Acc03th estimé par tarif) ou 1/10 (Acc2_5 estimé par tarif)

Tableau 2. : Coefficient multiplicateur des accroissements des arbres morts ou coupés et des chablis.

La formule peut donc être appliquée afin d'obtenir une estimation de la perte de croissance en diamètre, surface terrière et volume de la forêt des départements inventoriés par rapport à la croissance qu'elle aurait eu en 2003 si les arbres avaient poussés dans les mêmes conditions climatiques moyennes qu'au cours des neuf années précédentes et en conservant sa dynamique de croissance pour la méthode avec Acc03th, ou que si sa croissance avait été la même qu'au cours des 4 années précédentes et sans tenir compte de la dynamique de croissance avec celle avec Acc2_5 (Tableau 3).

	Perte Acc03th	Perte Acc2_5
Ir	20,2 %	22,7 %
Ig	20,1 %	15,4 %
Iv	20,4 %	11,9 %

Tableau 3. : Perte de croissance estimée d'après les données IFN, tout statut d'arbre confondu

Au cours de la phase de terrain, certains arbres n'ont pas eu de mesure d'accroissement au cours des 10 dernières années ou d'ir03. Par conséquent, ces arbres n'ont pas non plus de Acc03th. Afin, que le dénominateur et le numérateur soit équilibré en effectif, ces 737 arbres ont été supprimés. Ce résultat est donc donné sur les 29158 arbres des 2129 placettes représentatives de 417 530 hectares de forêts.

On remarque que les estimations de perte d'après la méthode utilisant Acc03th sont approximativement les mêmes pour le diamètre, la surface terrière et le volume des arbres, ce qui n'est pas le cas avec Acc2_5 comme référence. Ces tendances rejoignent celles des simulations de croissance étudiées ci-dessus où la perte d'un arbre par rapport à Acc03th tend rapidement vers la

perte réelle qui est la même pour chacune des dimensions de l'arbre à quelques dixièmes de pourcent près dans le jeune âge. De même, la perte par rapport à Acc2_5 dans les simulations tend plus lentement avec l'âge vers la perte réelle pour la surface terrière que pour le diamètre et encore plus pour le volume. Enfin, la perte d'après Acc2_5 est plus forte que celle d'après Acc03th pour le diamètre mais plus faible pour la surface terrière et le volume. Ces moyennes sont donc cohérentes avec les résultats de la simulation. On peut donc raisonnablement penser que les pertes d'après Acc03th et Acc2_5 encadrent la valeur réelle de la perte.

Cependant, ces deux méthodes présentent encore des limites, notamment pour ce qui est de l'accroissement et la prise en compte des arbres morts et des chablis et de la distinction des cernes.

3.2.3. Cas des arbres morts.

En effet, le calcul des accroissements d'arbres morts, coupés ou chablis se base sur l'hypothèse d'un accroissement courant similaire pour toutes les catégories de santé des arbres. Or, ce postulat est faux pour les arbres morts, puisque la mort d'un arbre est précédée d'un dépérissement au cours duquel la croissance est plus faible que pour un arbre normal. De plus, on a également supposé que les arrêts de croissance étaient répartis de façon homogène dans le temps, ce qui est également faux puisque, pour la méthode utilisant Acc2_5, la majorité des chablis est tombée dès 1999 avec la tempête qui a frappé la forêt française.

Afin de quantifier les incertitudes nées de ces deux limites, les contributions des arbres en fonction de leur santé ont été comparées pour le numérateur (Acc03) et les dénominateurs (Acc03th et Acc2_5) des deux méthodes (Tableau 4). Ainsi, entre 2 et 2,4 % de l'accroissement courant de la forêt étudiée au cours de l'année 2003 correspond à celle des chablis et des arbres coupés alors que les arbres morts ne correspondent qu'à 0,13 % de la valeur totale de l'accroissement. Les pourcentages sont approximativement les mêmes pour l'accroissement théorique de 2003 et celui moyen entre 1999 et 2002. Enfin, dans tous les cas, la contribution des arbres morts, coupés ou chablis est plus importante pour la croissance radiale car ces arbres sont majoritairement des petits bois qui présentent, pour un même accroissement radial qu'un gros bois, un accroissement en surface terrière et en volume moins important en raison de ses dimensions.

Ir	Acc03	Acc03th	Acc2_5
Chablis et coupés	2,33 %	2,69 %	2,28 %
Mort	0,13 %	0,16 %	0,14 %
Vif	97,54 %	97,15 %	97,58 %

Ig	Acc03	Acc03th	Acc2_5
Chablis et coupés	2,14 %	2,15 %	2,00 %
Mort	0,13 %	0,15 %	0,14 %
Vif	97,72 %	97,70 %	97,86 %

Iv	Acc03	Acc03th	Acc2_5
Chablis et coupés	2,11 %	2,03 %	1,96 %
Mort	0,13 %	0,13 %	0,12 %
Vif	97,77 %	97,84 %	97,92 %

Tableau 4. : Pourcentage de contribution des arbres à l'accroissement global selon leur statut

L'élimination des arbres morts n'apportera donc pas de grand changement à l'estimation vu leur faible contribution. De plus, cela permettra de supprimer les imprécisions dues à l'hypothèse de croissance similaire entre les arbres vifs et morts. Toutefois, si certains arbres sont morts au cours de l'année 2003 à cause de la sécheresse de 2003, les retirer reviendrait à créer un biais en ne prenant pas en compte leur arrêt de croissance due à 2003. Or, d'après le département de santé des forêts (L.M. Nageleisen), les arbres morts à cause de 2003 et inventoriés comme mort lors de la campagne IFN entre janvier et avril 2004 étaient des arbres déjà dépérissants et que la sécheresse de 2003 a achevé, alors que ceux qui sont morts uniquement à cause de 2003 ont quand même poussé au début de cette année et ne pouvaient pas être inventorié comme morts au début de l'année 2004. La contribution des arbres morts peut donc être enlevée des sommes d'accroissement Acc03 et Acc03th.

L'élimination de la contribution des arbres coupés ou chablis est plus délicate car, même si elle est faible, elle n'est plus négligeable. Leur croissance est estimée à partir des arbres vifs, mais elle est probablement similaire. Leur élimination du calcul est moins évidente. Toutefois, l'estimation de la croissance des chablis présente d'autres problèmes. En effet :

- on considère que l'accroissement qu'aurait eu l'arbre au cours de toute la période d'étude est celle d'un arbre ayant sa circonférence au niveau du sol à la fin de la période égale à celle où l'arbre a été abattu. La croissance estimée de l'arbre coupé ou du chablis sur la période d'étude devrait donc être celle d'un arbre plus gros qu'au moment de sa chute.
- il est très délicat de prendre en compte à la fois cet accroissement mais aussi la limite de passage à la futaie. Or, ce facteur n'est pas négligeable puisque la majorité des chablis sont du petit bois. La conservation des chablis et des arbres coupés crée donc un biais.

Pour pouvoir supprimer ces arbres de la formule d'estimation afin de s'affranchir des estimations d'accroissement et de date d'arrêt de croissance, il vaut mieux redéfinir la perte estimée comme celle des arbres vifs à la fin de l'année 2003. La démarche est donc différente de celle de l'IFN : on n'estime pas les pertes de bois formé au cours d'une année mais celle des arbres vifs.

3.2.4. Difficultés de lecture de certains cernes.

Un problème se pose également au sujet de la lecture des cernes. En effet, la lecture des cernes est difficile sur le terrain. Lors de la campagne de 2004, cette étape était d'autant plus difficile que les accroissements étaient très fins, augmentant le risque de confusion entre les cernes de 2002 et de 2003. Une solution pour ce problème de lecture est l'utilisation de nombreux moyens au retour de terrain ainsi qu'une comparaison des cernes avec des séries de référence pour vérifier la synchronisation des années. C'est la méthode d'interdatation (Fritts, 1976, Lebourgeois, 1997). Enfin, selon l'anatomie des espèces, la lecture est plus ou moins simple.

Si, globalement, les bois européens ont des limites de cernes distinguables à l'œil nu ou à la loupe (Schweingruber, 1990), la différenciation des cernes devient en effet plus délicate pour certaines essences. On distingue donc quatre groupes d'arbres d'après l'anatomie de leur bois (annexe 6) :

- les arbres à bois homogènes ou à petit vaisseaux (Hêtre, Charme, Bouleau, Aulne). Ils présentent, les années de faible croissance, des cernes très petits qui sont peu visibles. Les cernes du charme sont particulièrement durs à identifier ;
- les arbres à bois poreux ou hétérogène forment ces années là qu'une fine couche de vaisseaux visibles en raison de la taille des vaisseaux mais pouvant être confondu avec le cerne de l'année suivante. Dans le cas de la campagne de 2004, les mois au cours desquels ont été faits les inventaires évitent une confusion avec le cerne de 2004. Toutefois, comme il y a déjà eu des sécheresses avant, il peut y avoir des confusions entre les cernes précédents, ce qui surestimerait l'accroissement des cinq années précédentes ;

qui ne se retrouve nulle part ailleurs. Afin d'éviter ces risques dans les résultats, en particulier à cause du chêne vert, on donnera les résultats pour la région méditerranéenne et pour les autres départements.

Les résultats obtenus, suite à la modification des groupes d'arbres, sont présentés dans les tableaux 5 et 6.

Référence	Région non méditerranéenne		Région méditerranéenne	
	Acc03th	Acc2_5	Acc03th	Acc2_5
Ir	20,3 %	22,7 %	16,3 %	22,4 %
Ig	20,3 %	15,3 %	18,0 %	17,2 %
Iv	20,6 %	11,9 %	18,0 %	12,7 %

Tableau 5. : Perte calculée à partir des 20399 arbres vivants à la fin de l'année 2003

Référence	Région non méditerranéenne		Région méditerranéenne	
	Acc03th	Acc2_5	Acc03th	Acc2_5
Ir	20,6 %	22,7 %	16,3 %	22,3 %
Ig	20,4 %	15,2 %	17,9 %	17,2 %
Iv	20,5 %	11,6 %	18,0 %	12,7 %

Tableau 6. : Perte estimée sur l'ensemble de l'année 2003 à partir des arbres vivants, coupés ou des chablis (27584 individus)

La deuxième méthode reste plus proche de la réalité physiologique et est plus proche de certaines méthodes comme le calcul du carbone fixé.

Les pertes entre les arbres vifs et le groupe contenant les arbres vifs et les arbres coupés ou chablis donne pratiquement le même résultat dans tous les cas. Les tendances des courbes d'accroissement théorique se retrouvent à nouveau (perte d'après Acc03th proche pour le diamètre, la surface terrière et le volume), de même que l'ordre d'importance des pertes d'après Acc2_5 pour les différentes grandeurs de l'arbre ainsi qu'entre les estimations de pertes d'après Acc03th et Acc2_5, les plus grands écarts étant notés pour l'accroissement en volume. Quant à l'opposition entre la perte de la région méditerranéenne et celle des autres régions, la région méditerranéenne semble moins touchée, sachant que les mesures de ces accroissements peuvent être fortement biaisées.

On peut donc calculer différentes pertes d'accroissement selon la référence que l'on choisit ou les arbres que l'on prend en compte. Les méthodes utilisant Acc03th semblent être plus stables mais la perte d'après Acc2_5 est complémentaire, donnant ainsi un intervalle contenant la valeur réelle. Les valeurs semblent cependant plus stables pour la perte d'après Acc03th et plus proche de la réalité. De plus, le calcul prenant en compte uniquement les arbres vifs présente l'avantage de n'utiliser que des valeurs propres à l'arbre. Ce sera celle que l'on retiendra pour les estimations de perte par groupe d'arbres. Ce choix sera discuté plus loin.

En conclusion, la perte d'accroissement des forêts des départements non méditerranéens (aux mesures de cerne plus sûres) qui ont été inventoriées entre janvier et avril 2004, par rapport à la croissance qu'elles auraient eu dans les mêmes conditions climatiques moyennes que les neuf années précédentes et en conservant sa dynamique de croissance, est comprise entre 20,3 % et 22,7 % pour le diamètre, entre 15,3 et 20,3 % pour la surface terrière et entre 11,9 et 20,6 % pour le volume pour les arbres encore vivants à la fin de l'année 2003.

3.3. Perte par région et par essence.

A partir de cette méthode, la perte d'accroissement peut être calculée par groupes d'arbres. Comme indiqué ci-dessus, nous encadrerons la perte réelle des seuls arbres vifs par les deux estimations complémentaires.

Tout d'abord, on regroupe, comme avait fait Verdier (2005a) dans son rapport, les arbres par département afin d'estimer les pertes locales (Tableau 7).

	02	13	2B	21	23	71	75	77	87
Nb arbres	1446	1500	1313	5811	828	3703	1116	1169	3513
Ir	30,3/ 30,6 %	23,1/ 21,7 %	13,1/ 20,2 %	26,6/ 28,6 %	12,4/ 18,4 %	27,9/ 33,2 %	23,4/ 24,1 %	17,8/ 14,1 %	5,9/ 8,7 %
Ig	27,2/ 20,4 %	23,7/ 21,7 %	14,9/ 14,9 %	28,1/ 24,4 %	12,7/ 7,4 %	29,9/ 26,9 %	23,7/ 17,5 %	15,5/ 5,3 %	2,7/ - 3,8 %
Iv	25,1/ 15,1 %	24,8/ 18,5 %	14,9/ 10,1 %	28,6/ 21,7 %	12,1/ 1,4 %	30,6/ 22,7 %	22,0/ 14,1 %	13,0/ 1,3 %	1,7/ - 8,7 %

Tableau 7. : Estimation des pertes de croissance de 2003 en pourcentage pour le diamètre, la surface terrière et le volume d'après Acc03th/Acc2_5 par département

Tout d'abord, la stabilité des pertes de croissance en diamètre, surface terrière est vérifiée à quelques pourcents près pour la perte d'après Acc03th. De plus, les intervalles d'estimations de la perte d'après les deux références restent assez précis à l'exception du volume dans certains cas, donnant un intervalle de plus de 10 % d'étendue. Toutefois, les écarts sont plus importants que pour la totalité des arbres en raison du nombre plus faible d'arbres par groupe.

Ensuite, un classement des départements peut être dressé. Les départements les plus touchés sont ceux de l'Aisne, de la Saône-et-Loire et de la Côte-d'Or pour lesquels la croissance en diamètre a baissé d'environ 30%. Ensuite, les Bouches-du-Rhône et l'Ile-de-France-Ouest ont subi une perte entre 22 et 24 % de croissance radiale. Puis la croissance en Seine-et-Marne a eu une baisse comprise entre 14 et 18 % en diamètre alors que celles de Haute-Corse et de la Creuse ont perdu entre 12 et 20 %. Enfin, la perte de croissance en diamètre en Haute-Vienne est comprise entre 6 et 9 % et n'a pratiquement subi aucune perte en accroissement de surface terrière et de volume. On retrouve à peu près l'ordre du rapport de Verdier dans lequel les seuls départements n'ayant pas subi de perte de croissance pour certaines essence sont la Haute-Vienne et la Seine-et-Marne. Cependant, nous constatons que la Creuse est peu touchée, contrairement au résultat du rapport Verdier en raison de certains points de mai 2004 que les agents avaient remplis avec des ir03 nuls qui avaient été malencontreusement pris en compte dans ce rapport. L'erreur créée est alors énorme, la perte en croissance radiale étant de 30 % si ces points ne sont pas supprimés. Il y a donc des similitudes entre départements voisins, à l'exception de la Seine et Marne mais également une forte disparité entre région plus éloignée, la Bourgogne étant la région la plus touchée à l'opposé du Limousin. La région méditerranéenne semble avoir bien supporté la sécheresse, même s'il y a un risque de problème d'identification de cernes.

Dans son rapport Verdier, avait réalisé une estimation des pertes essence par essence et département par département pour les groupes de plus de 50 arbres. L'estimation des pertes avec cette nouvelle méthode pour ces mêmes groupes (annexe 3), si elle ne représente pas la même chose les calculs de Verdier n'étant pas pondéré, sont relativement proches. La seule exception est la Creuse dont les pertes sont erronées chez Verdier en raison de l'erreur systématique de certaines données de ce département. Ainsi, l'essence globalement la plus touchée au niveau local est l'épicéa commun en Côte d'Or avec une perte de croissance en diamètre comprise entre 43,1 et 44,8 %. La moins touchée

est, comme l'avait présenté Verdier, le chêne pédonculé en Haute-Vienne avec un gain de croissance évalué entre 13,8 et 22,1 %

Ensuite, la perte selon la classe de diamètre est étudiée (Tableau 8). Pour s'affranchir du problème des arbres méditerranéens, on estime la perte uniquement sur les arbres vifs des autres régions.

	Petit bois	Bois moyen	Gros bois
Nb arbre	9653	4367	3566
Ir	20,7 %/ 23,5 %	20,0 %/ 21,6 %	17,2 %/ 18,4 %
Ig	21,3 %/ 14,8 %	20,4 %/ 16,4 %	17,2 %/ 14,8 %
iv	20,8 %/ 9,7 %	21,4 %/ 13,3 %	19,0 %/ 13,4 %

Tableau 8. : Estimation des pertes de croissance de 2003 en pourcentage pour le diamètre, la surface terrière et le volume d'après Acc03th/Acc2_5 par classe de diamètre

La perte de croissance est donc plus forte chez le petit et le moyen bois. On constate aussi la plus forte valeur de perte en surface terrière par rapport au diamètre pour les petits bois.

Enfin, une approche de la perte par espèce est effectuée. Comme les essences ont des effectifs très variés et parfois insuffisants, un regroupement a été réalisé entre les résineux d'une part et entre les feuillus d'autre part. On réalise cette régression à nouveau pour les arbres vifs de région non méditerranéenne (Tableau 9).

	caducifoliés	résineux
Nb arbre	14219	3367
Ir	19,0 %/ 20,3 %	25,3 %/ 31,4 %
Ig	17,9 %/ 12,3 %	27,3 %/ 23,9 %
iv	16,9 %/ 8,8 %	28,7 %/ 19,1 %

Tableau 9. : Estimation des pertes de croissance de 2003 en pourcentage pour le diamètre, la surface terrière et le volume d'après Acc03th/Acc2_5 par groupe d'essence

3.4. Discussion

Ces résultats donnent donc une idée assez précise de la perte mais présentent toutefois certaines limites. Tout d'abord, au niveau du choix de la référence, celle-ci s'est faite par compromis. Le choix d'Acc03th est avantageux au niveau de la prise en compte de la dynamique de croissance de l'arbre avec l'âge, de la proximité des valeurs de perte de croissance en surface terrière et en diamètre qui semble être une réalité, et de l'homogénéité entre la valeur réelle et la valeur de référence dans la formule globale de la perte, ce que l'on n'avait pas avec Acc2_5. En revanche, cette référence présente aussi un certain nombre d'approximations et de défauts qui se traduisent par des biais (Tableau 11). La meilleure solution semble donc être celle de l'encadrement.

Ensuite, le choix de tenir compte uniquement des arbres vifs traduit un point de vue qui est plus celui d'un producteur de bois plutôt que celui d'un physiologiste qui s'intéresse plus à la fixation de carbone. Pour ce dernier cas, il vaut mieux conserver les arbres coupés et chablis au cours de l'année 2003 en faisant un compromis sur la précision du résultat. La méthode ne comptabilisant que les arbres vifs montre plus l'impact de la sécheresse sur la variation de stock sur pied entre deux dates. Pour compléter l'estimation de l'effet de la sécheresse sur la forêt, il faut étudier en parallèle l'évolution de l'état sanitaire à partir du printemps 2004. Enfin, pour les arbres coupés par l'exploitation, cette estimation de la perte se base sur la supposition que les coupes, d'une placette à

	Perte d'accroissement radial	Perte d'accroissement en surface terrière	Perte d'accroissement en volume
Cause d'une sous estimation de la perte	<ul style="list-style-type: none"> - sous estimation d'ir03th par l'interpolation linéaire (amplifié pour les jeunes arbres, inverse chez les arbres très jeunes); - absence de la prise en compte des arbres morts au début de 2004 => perte sous estimée. 	<ul style="list-style-type: none"> - absence de la prise en compte des arbres morts au début de 2004 => perte sous estimée ; 	<ul style="list-style-type: none"> - absence de la prise en compte des arbres morts au début de 2004 => perte sous estimée.
Cause d'une surestimation de la perte	<ul style="list-style-type: none"> - années sèches entre 1994 et 1998 => baisse de ir6_10 => ir03th surestimé ; - boostage de la croissance après la tempête de 1999 => croissance en 1999 inférieure à la nouvelle dynamique post-tempête => baisse de ir6_10 => ir03th surestimé. 	<ul style="list-style-type: none"> - surestimation d'ig03th par l'interpolation linéaire (amplifié chez les arbres jeunes, inverse chez les arbres très jeunes) ; - années sèches entre 1994 et 1998 => baisse de ig6_10 => ig03th surestimé ; - boostage de la croissance après la tempête de 1999 => croissance en 1999 inférieure à la nouvelle dynamique post-tempête => baisse de ig6_10 => ig03th surestimé. 	<ul style="list-style-type: none"> - surestimation d'iv03th par l'interpolation linéaire (amplifié chez les arbres jeunes, inverse chez les arbres très jeunes) ; - années sèches entre 1994 et 1998 => baisse de iv6_10 => iv03th surestimé ; - boostage de la croissance après la tempête de 1999 => croissance en 1999 inférieure à la nouvelle dynamique post-tempête => baisse de iv6_10 => iv03th surestimé.
Autre incertitude	<ul style="list-style-type: none"> - effet des éclaircies sur la croissance : effet variable sur le calcul d'ir03th selon le moment ; - passage à la futaie : la différence entre Acc03 et Acc03th est amplifié pour les arbres passé à la futaie dont on supprime une partie de l'accroissement ; - <i>arbre mort dont la croissance est basée sur celle des arbres vifs</i> ; - <i>répartition homogène des chablis dans le temps</i> ; - pour le volume, problème d'estimation de la croissance des branches. 		

Tableau 10. : Les sources de biais et d'imprécision dans l'estimation de la perte d'après Acc03th (en italique : celles évitées par la suppression des arbres morts, coupés et chablis).

l'autre, se répartissent de manière homogène dans le temps, ce qui n'est pas le cas, notamment en ce qui concerne la gestion des chablis de 1999. Toutefois, les résultats avec ou sans les chablis donnent des résultats similaires, la contribution de ceux-ci à l'accroissement global étant faible.

L'estimation de perte en volume n'est quant à elle pas très précise. En effet, si les accroissements en diamètre et en surface terrière sont justes dans la mesure où la section d'un arbre à 1,30 m est supposée circulaire, l'accroissement en volume se base quant à lui sur des approximations : (i) utilisation d'une formule très simplifiée du volume pour l'accroissement et (ii) estimation de l'accroissement en hauteur en mesurant au suunto les cinq derniers verticilles, souvent peu visibles. Pour ce dernier inconvénient, les anciennes directives de l'IFN demandaient d'ailleurs aux agents de noter l'accroissement en longueur uniquement si la mesure était sûre. De plus, une mesure de l'accroissement en volume en négligeant la variation de hauteur ne présente aucune stabilité, une étude de l'IFN ayant montré que la suppression de cette composante n'est pas négligeable. Celle-ci entraîne en effet une baisse de l'estimation de l'accroissement en volume de 20 à 30 % pour les feuillus et de 25 à 35 % pour les résineux (lettre ministère). Les pertes d'accroissement en volume sont donc moins fiables que les pertes en diamètre ou en surface terrière. De plus, l'évolution de l'accroissement en volume est telle que l'intervalle défini par les pertes par rapport à Acc03th et Acc2_5 est plus large que pour les deux autres grandeurs.

Enfin, une réduction importante des effectifs retire de la qualité à ces estimations, les pertes en diamètre, surface terrière et volume par rapport à Acc03th étant de plus en plus distinctes et l'intervalle formé par les deux valeurs de pertes étant de plus en plus large. Il faut donc se méfier des estimations de pertes des petits groupes qui sont plus soumis à des valeurs extrêmes d'Acc03th.

Ces formules de calcul permettent donc, à quelques limites près, d'estimer la perte de croissance de la forêt des départements inventoriés. De plus, si une extrapolation à la France entière n'est pas très juste, ces départements présentent, nous allons le voir ensuite, différents degrés de sécheresse, une grande surface et surtout, comme on l'a dit, un très grand nombre de données. Les résultats donnent par conséquent une idée globale de la perte de croissance de la forêt française assez bonne.

Il faut donc bien définir ce qu'exprime chaque perte :

- celle calculée d'après l'Acc03th correspond au pourcentage de perte de croissance des arbres vivants à la fin de l'année 2003 par rapport à la croissance qu'ils auraient eu en 2003 si les arbres avaient continué sur leur dynamique de croissance et si le climat avait été le même qu'au cours des 9 dernières années. Cette valeur a globalement légèrement tendance à sous-estimer la perte réelle en diamètre et à surestimer celle en surface terrière et en volume.
- La perte de croissance par rapport à Acc2_5 exprime la perte qu'auraient eue les arbres si leur croissance normale de 2003 est considérée comme égale à celle moyenne des quatre années précédentes.

La perte réelle de croissance, impossible à déterminer exactement, est située entre ces deux estimations, celle d'après Acc03th en étant plus proche, à quelques imprécisions près (variation climatique locale, effet d'éclaircie,...) en raison des biais principaux opposés de chaque référence provoqués par le principe d'estimation de la référence. On a donc la perte radiale réelle qui est supérieure à l'estimation d'après Acc03th et inférieure à celle d'après Acc2_5. C'est l'inverse pour la perte en surface terrière et en diamètre. Toutefois, les nombreux écarts supplémentaires étant possibles en sur ou sous-estimation, ces bornes peuvent s'éloigner de la perte réelle, voire ne plus l'encadrer.

Cette méthode va toutefois se révéler inefficace pour étudier les facteurs qui ont eu une influence sur la perte de croissance au cours de la sécheresse de 2003.

4. Etude des facteurs jouant un rôle dans l'effet de la sécheresse sur l'accroissement des arbres.

Dans cette partie, nous tenterons de définir les facteurs de sécheresse qui entraînent la perte d'accroissement des arbres ainsi que les caractéristiques prédisposant les individus à une perte.

4.1. *Elaboration de la méthode*

4.1.1. Principe

La méthode utilisée dans la première partie se révèle tout de suite très limitée. En effet, on peut encadrer les pertes des arbres vifs de 2003 par rapport à la croissance qu'ils auraient eue si le climat avait continué sur sa dynamique pour différents groupes d'arbres et comparer ces estimations. Toutefois, pour étudier l'influence des différents facteurs individuels, environnementaux et de sécheresse, ces estimations présentent certaines limites :

- difficulté de comparer les valeurs de deux groupes dont les pertes sont proches. En effet, pour utiliser une ANOVA ou un test de Student, il faudrait calculer les valeurs par arbres ou par placette ce qui, comme on l'a vu précédemment, serait imprécis ;
- risque pour les échantillons de devenir trop petit et d'être soumis au problème de la dissymétrie de l'estimation des pertes lors de leur réduction pour étudier un cas précis ;
- influence des variables continues incalculables avec cette méthode ;
- difficulté pour séparer l'effet des facteurs les uns des autres pour découvrir quels sont ceux qui sont vraiment déterminants.

Ceci pousse à utiliser une autre méthode et la solution qui semble la mieux adaptée est la régression multivariée. On pourra ainsi introduire dans le modèle des variables qualitatives et quantitatives, l'étoffer progressivement de facteurs déterminants et étudier l'influence des facteurs les uns sur les autres. Pour cette méthode, la base de la régression n'est pas la même que précédemment. Tout d'abord, elle se fait arbre par arbre car il ne s'agit plus d'une estimation de perte globale et cela permet de prendre en compte les différences entre les arbres. Ensuite, l'utilisation du rapport de perte pour chaque arbre n'est pas utilisable du fait de sa dissymétrie (les valeurs vont de 0 à l'infini) et surtout reste, à l'échelle de l'arbre, très irrégulière en raison des valeurs extrêmes que peuvent prendre Acc_{03th} si on choisit cette référence. On utilisera donc plutôt directement les valeurs d'accroissement. Ensuite, les arbres morts, coupés ou chablis possèdent des accroissements estimés à partir des arbres vifs grâce au tarif présentés précédemment. Utiliser ces arbres reviendrait à prendre des valeurs estimées et souvent biaisées (viguer des arbres dépérissants,...), dont les accroissements sont redondants avec les arbres vifs, et dont l'étendue des valeurs d'accroissement est plus faible que celle des arbres vifs en raison du tarif moyennant les valeurs. On ne garde donc que les arbres vifs. Enfin, pour les arbres restants, il faut étudier l'accroissement tel qu'il est mesuré et exempt de toute modification relatif au passage à la futaie pour éviter que les petits arbres ne donnent des résultats biaisés. On réalisera donc la régression à partir de l'accroissement de 2003 brut des arbres vifs (Acc_{03brut} , ir_{03brut} , ig_{03brut} , iv_{03brut} pour respectivement l'accroissement global, en rayon, en surface terrière et en volume). Pour la suite, nommons Acc_{2_5brut} et Acc_{2_10brut} l'accroissement global des arbres au cours respectivement des 4 et 9 années précédant l'année 2003. Pour les accroissements en rayon, en surface terrière et en volume, les grandeurs sont respectivement nommées ir_{2_5brut} et ir_{2_10brut} , ig_{2_5brut} et ig_{2_10brut} et iv_{2_5brut} et iv_{2_10brut} .

De plus, pour estimer la perte, il faut inclure la dynamique de l'arbre. En effet, si on réalise la régression avec uniquement Acc_{03brut} , on obtient des résultats non interprétables dans notre objectif

d'étude. Ainsi, en reprenant l'exemple des groupes feuillus et résineux, on obtient une moyenne d'accroissement de résineux plus forte en 2003 que les feuillus alors qu'ils ont été plus touchés. Il faut donc intégrer une valeur de référence au modèle. On compare pour cela les résultats des différentes régressions possibles avec le R^2 et les probabilités d'erreur de type 3 des modèles, c'est-à-dire le taux d'individus se reconnaissant dans le modèle et la probabilité de se tromper si on affirme que cette variable rend le modèle plus explicatif. Les résultats suivants sont issus de la régression à partir des arbres ayant un Acc03th, c'est-à-dire une mesure de d'ir10, pour que la comparaison soit faite sur la même base. On supprime ainsi 688 arbres sur 21045.

Terme dépendant	Terme indépendant	Régression linéaire		Régression quadratique	
		probabilité	$R^2 \times 100$	probabilité	$R^2 \times 100$
Ir03brut	Ir2_5brut	0	64,5	0	52,2
Ig03brut	Ig2_5brut	0	77,0	0	58,8
Iv03brut	Iv2_5brut	0	79,1	0	53,0
Ir03brut	Ir2_10brut	0	58,7	0	48,1
Ig03brut	Ig2_10brut	0	74,7	0	57,3
Iv03brut	Iv2_10brut	0	79,6	0	53,5
Ir03brut	Ir03th	0	59,0	0	44,1
Ig03brut	Ig03th	0	72,7	0	52,8
Iv03brut	Iv03th	0	76,1	0	49,4
Ir03brut	d2003	0	8,6	E-209	4,6
Ig03brut	g2003	0	35,9	E-126	2,8
Iv03brut	v2003	0	55,5	0	30,8

Tableau 11. : Résultats des différents essais de régression pour expliquer Acc03brut

Les grandeurs de l'arbre (volume, surface terrière et diamètre) ne donnent donc pas de bon résultat. Cela ne renseigne en effet pas sur la dynamique de l'arbre qui est liée à son espèce, sa station et son âge. Acc03th donne un résultat moins bon que les autres et correspond à des valeurs théoriques qui peuvent être aberrantes. Pour Acc2_10brut et Acc2_5brut, l'utilisation de la deuxième grandeur est plus explicative (R^2 plus grand) sauf pour le volume, et son information sur la dynamique de l'arbre est plus d'actualité. De plus, certains arbres n'ont pas de mesure de d'ir10brut et ne peuvent donc pas être pris en compte. On préférera donc Acc2_5brut. Enfin, il reste le choix de la grandeur d'accroissement à utiliser. Le meilleur résultat revient au volume mais son utilisation s'avère difficile car elle correspond au volume bois fort qui ne peut pas, même avec un bon matériel de mesure et des formules bien étudiées, donner une valeur précise et juste de cette grandeur, surtout en accroissement. Ensuite, le modèle réalisé à partir de l'accroissement en surface terrière est également meilleur que celui fait à partir de l'accroissement en diamètre. Cependant, ig2_5brut contient dans sa formule ir2_5brut mais également le diamètre de l'arbre qui peut jouer un rôle dans la perte de croissance des arbres.

On retiendra donc ir2_5brut comme référence à travers une régression linéaire puisque celle-ci est plus explicative que la régression quadratique. Les arbres se répartissent selon le graphique 6.

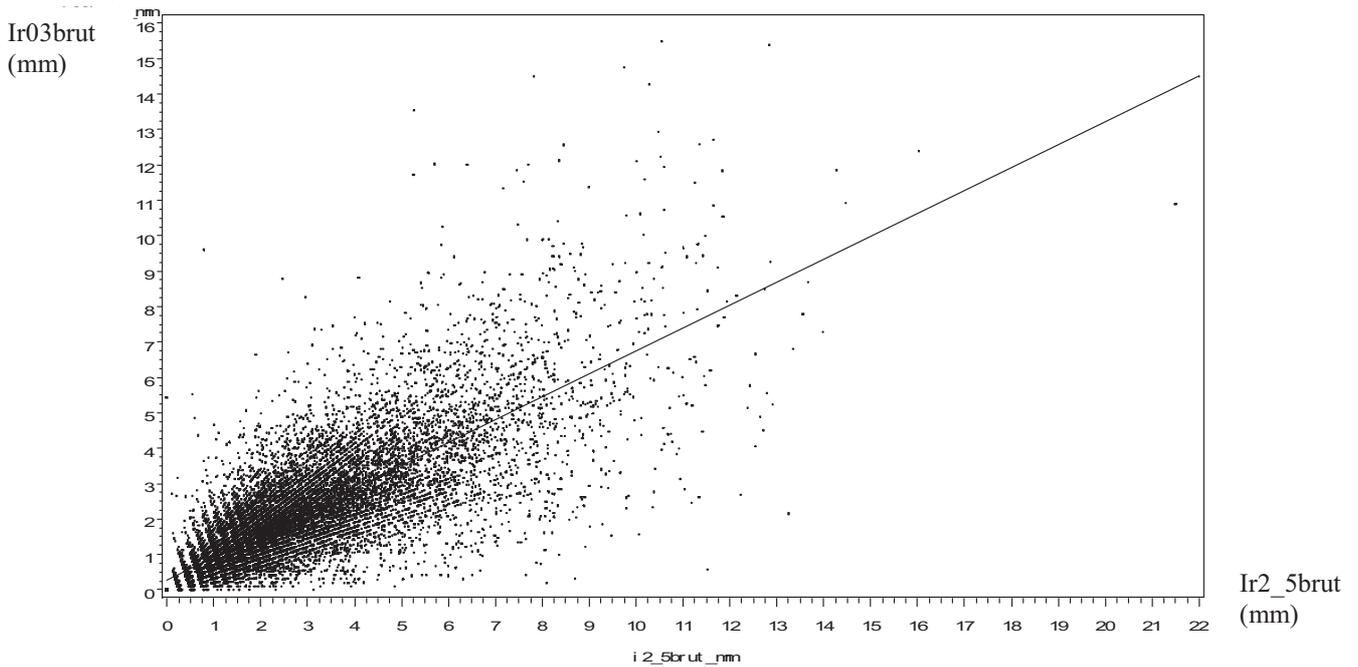


Figure 6. Régression linéaire exprimant ir03brut (mm) en fonction de ir2_5brut (mm).

Dans cette régression, les quelques points présentant des ir2_5brut négatifs qui avaient été conservé dans la première partie ont été supprimés ils risquent cette fois de biaiser complètement l'étude vu leur excentricité, surtout lorsqu'il va falloir réduire les groupes d'étude. On obtient ainsi l'équation de régression suivante, avec des résidus distribués de manière gaussienne (figure 7), pour tous les arbres ($R^2=65,2$ et probabilité (erreur de 3° type)=0) :

$$\text{ir03brut} = 2,55 \text{ E-4} + 0,648 \times \text{ir2_5brut}$$

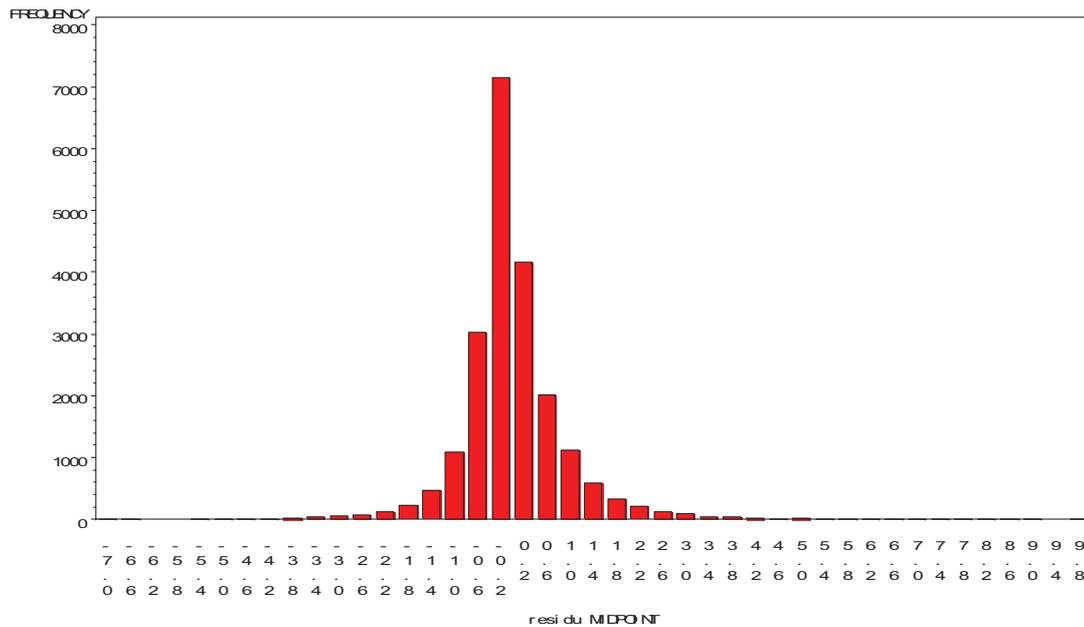


Figure 7. Répartition des résidus (mm) de la régression exprimant ir03brut en fonction de ir2_5brut

Le principe de la suite de l'étude consiste à intégrer d'autres facteurs à ce modèle afin d'étudier la distribution des résidus selon ces facteurs quantitatifs et qualitatifs. L'intégration au modèle peut se faire de deux manières : indépendamment d'ir2_5brut (pour les variables qualitatives, cela se traduit par une variation de l'ordonnée à l'origine), ou dépendamment d'ir2_5brut (les pentes des droites varient en passant par la même ordonnée à l'origine). On appellera pour la suite régression univariée (annexe 5) une régression avec une seule variable ajoutée à l'équation ci-dessus, et régression multivariée une régression avec plusieurs variables.

4.1.2. Exemple des départements

Cette méthode permet donc de comparer les probabilités d'erreur de 3^e type et également l'évolution du R², représentant le pourcentage de points expliqués par le modèle. Lors des régressions par variables qualitatives, le LSmean peut également être calculé. Il s'agit de moyenne fictive pour chaque groupe d'arbres si on suppose que les autres variables du modèle sont constantes. Pour les régressions univariées, cela permet de s'affranchir de l'influence de l'accroissement ir2_5brut. Par exemple, en réalisant un tri par département, on retrouve globalement les mêmes classements que dans la partie précédente (Tableau 12).

	02	13	2B	21	23	71	75	77	87
Nb arbres	1538	1527	1319	5948	838	3865	1134	1194	3682
Ir03brut (mm)	1,68	1,69	1,72	1,56	2,01	1,50	1,74	1,92	2,19

Tableau 12. : LSmean de ir03brut en mm par départements à ir2_5brut égal

La probabilité d'erreur de 3^e type est de 0 pour ir2_5brut et les groupes de départements et le R² passe de 65,2 à 67,8 %. La contribution des départements est donc importante. Les dégâts les plus importants se rencontrent dans les départements bourguignons (21 et 71) et les moins importants en Haute Vienne, Seine et Marne et la Creuse. Pour les autres départements, les différences sont trop faibles pour faire des comparaisons.

4.2. Détermination des facteurs principaux

On procède à présent à la détermination des facteurs ayant eu une influence sur la perte de croissance des arbres au cours de la sécheresse de 2003. On essaiera de déterminer les facteurs les plus importants concernant la sécheresse elle-même mais également les facteurs prédisposants parmi les caractéristiques dendrométriques, dendrologiques et stationnelles.

4.2.1. Facteur sécheresse

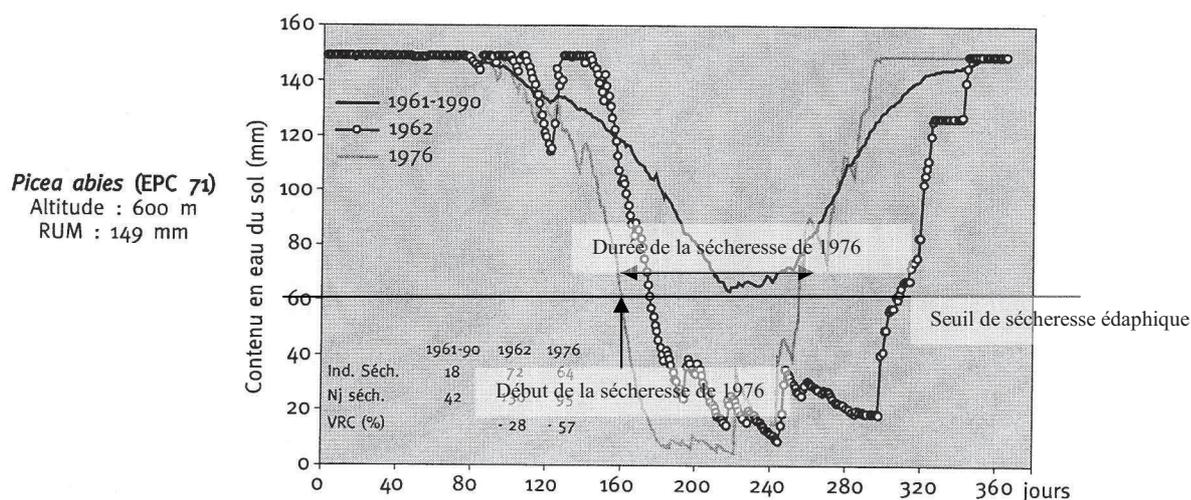
Les facteurs climatiques traduisant la sécheresse de 2003 sont très probablement les variables expliquant le plus la perte de croissance.

Quoiqu'il en soit, un facteur ne prenant en compte que les données de 2003 ne peut pas être très rigoureux. En effet, le modèle utilisé permet d'avoir l'influence du facteur étudié sur la variation de croissance entre 2003 et la période 1999-2002. La relation entre le rapport d'accroissement et cet indice de sécheresse ne sera donc pas optimum. Il faudra donc prendre en compte dans les modèles, le rapport entre les données de 2003 et celle des quatre années précédentes. Les meilleurs indices sont donc probablement relatifs.

De plus, il ressort dans la littérature que l'élément principal pour expliquer la croissance de l'arbre est la sécheresse édaphique, c'est-à-dire la sécheresse du sol (Breda, 2004). En effet, si les précipitations expliquent bien les pertes, leur répartition et leur stockage a aussi de l'importance, de

même que le couvert des arbres qui participe à l'épuisement des réserves suivant ses capacités de transpiration et sa durée de présence. D'après Bréda (1994) et Granier (1999), on considère qu'un peuplement est soumis à une sécheresse édaphique, celle-ci affectant les échanges gazeux et provoquant un arrêt de la croissance radiale, lorsque la réserve en eau du sol est inférieure à 40 % de la réserve utile, c'est-à-dire la quantité d'eau maximale que le sol peut fournir à la végétation. Les principales caractéristiques d'une telle sécheresse édaphique sont alors la date de début de la sécheresse, la durée ainsi que l'intensité (Figure 8).

Figure 8. Exemple d'évolution de la réserve en eau du sol au cours de différentes années



caractéristiques sur une placette d'épicéa commun (source : Lebourgeois, 2006)

Pour calculer ces caractéristiques, l'INRA a mis au point le logiciel BILJOU (Granier, 1999) qui estime ces caractères à partir des données pédologiques, de couvert et d'évapotranspiration quotidienne des placettes. Les données nécessaires ont donc été récoltées (Annexe 4) :

- les variables élémentaires nécessaires au calcul de l'évapotranspiration selon la formulation de Penman (rayonnement global, vitesse du vent, température, humidité relative de l'air) et les précipitations quotidiennes ont été acquises à partir des données de Météo France sur les postes synoptiques les plus proches des points concernés ;

- les données du couvert sont définies d'après des regroupements d'essences principales du couvert (Hêtre, Charme, Chêne et autres, Chêne vert, Pins, Douglas, Sapin et Epicéa, autres). Pour chaque catégorie, le LAI (indice de surface foliaire) et le coefficient d'extinction du rayonnement par le couvert ont été définis à dire d'expert par Nathalie Bréda afin d'estimer la transpiration du couvert, l'interception des précipitations, l'évapotranspiration du sol et sous étage. Pour les caducifoliés, la date de débourrement et de chute des feuilles moyenne a été calculée sur les placettes de chêne et de hêtre du RENECOFOR (Lebourgeois, 2002) ;

- la réserve en eau du sol a été estimée d'après la texture et la charge en éléments grossiers du sol décrit par l'IFN sur les différents horizons et d'après les coefficients de Jamagne (Baize et Jabiol, 1995). Or, le problème est que la profondeur maximale possible renseignée par les agents IFN est de 1 m alors que la prospection racinaire des arbres peut aller beaucoup plus profondément. De plus, la connaissance de la profondeur au-delà d'1 m est essentielle pour l'étude d'une sécheresse exceptionnelle en intensité et en précocité comme en 2003. En effet, le réservoir de surface a été très rapidement épuisé et non rechargé, et c'est l'accès ou non aux réserves plus profondes qui a été discriminant pour la croissance des arbres

car elles permettent de retarder l'entrée dans la sécheresse édaphique ainsi que sa durée. Les placettes ont donc été regroupées par région pédoclimatique, ce qui traduit une homogénéité de climat et de sol, et un nouvel horizon a été ajouté à ces placettes, celui-ci ayant les mêmes caractéristiques physiques que l'horizon le plus profond décrit par l'IFN et dont la profondeur a été déterminée à dire d'expert par Yves Lefèvre pour chaque type de sol. Les sols d'une profondeur inférieure à 1 m n'ont pas été modifiés sauf ceux avec une forte pierrosité qui a empêché les agents de creuser.

La définition de ces données n'a pas été faite pour toutes les placettes en raison de leur grand nombre. Des placettes ont été regroupées par région pédoclimatique, par type de couvert et enfin d'après le poste Météo France le plus proche. Elles ont donc été réparties dans 134 groupes ayant finalement les mêmes données de sécheresse.

On dispose aussi d'autres données issues de l'Office international de l'eau (OIEAU) et de Eau-France donnant par commune le remplissage de la réserve en eau du sol au début des mois de mai, juin et novembre pour 2003 et pour une période de référence allant de 1946 à 2002. Ce remplissage est étudiée à partir d'une réserve utile définie par commune, grâce à un bilan hydrique au pas de temps mensuel estimé d'après les données de Météo-France et pour une couverture végétale de type gazon. Ces données renseignent aussi sur le déficit pluviométrique (précipitation – évapotranspiration potentielle) et les précipitations. Ces dernières données n'ont été disponibles que pour différents mois et sous la forme d'un ratio de ces données du 1^e février au 1^e du mois en 2003 par rapport à la valeur sur la période de référence. Avec ces données, la sécheresse édaphique est moins renseignée mais la division spatiale est plus fine.

➤ *Analyses des données de l'OIEAU*

Dans la littérature, il semblerait que les données de printemps soient plus déterminantes dans l'étude des pertes de croissance (Pichler et Oberhuber, 2007). On retrouve cette tendance avec les données de l'OIEAU. En effet, l'année 2003 est caractérisée par un remplissage des réserves au maximum jusqu'au courant du mois de mars, alors que pendant la période de référence pour le début de chaque mois, celui-ci variait de 60 à 100 % des réserves. Puis, au cours du mois de mars, les réserves se sont vidées très rapidement pour devenir inférieures au niveau habituel sauf sur la côte atlantique et de la manche ainsi que sur les massif montagneux. Ce vidage a continué en mai et en juin pour aboutir à des sols secs pratiquement partout dès le 1^e juillet. Les sols étaient vides dès le 1^e juin en Méditerranée, le sont devenus en Bourgogne et dans Nord au cours du mois de juin et au cours du mois de juillet pour le Limousin. Ce retard du Limousin dans le vidage des réserves est dû aux précipitations qui ont continué durant le printemps alors qu'elles se sont arrêtées partout ailleurs (Figure 9). L'année 2003 est donc caractérisée par une transition très rapide de l'état de sol rempli à l'état de sol sec, ce qui centre la période de déficit pluviométrique ayant le plus d'importance pour l'étude de la végétation sur trois mois, d'avril à juin. C'est la période au cours de laquelle les placettes présentent des pourcentages de remplissage de sol variés et où vont avoir lieu la majorité des entrées en sécheresse édaphique. A partir du 1^e juillet, tous les sols sont pratiquement secs, ce qui ne permet pas de les classer.

Pour étudier l'influence de ce remplissage sur la perte de croissance, il a fallu, comme il a été dit précédemment, calculer le ratio entre la valeur de 2003 et celle de la période de référence. Le problème est ici que la période de référence est très longue, de 1946 à 2002, ce qui ne correspond pas forcément aux conditions de croissance de 1999 à 2002 et qui crée une limite qu'il faudra prendre en compte. Ces ratios sont appelés ratio_ru_juin et ratio_ru_mai pour le pourcentage de remplissage des sols au 1^e juin et 1^e mai, ratio_dp_juil pour le déficit pluviométrique du 1^e février au 1^e aout et

ratio_prec_mai, ratio_prec_juin et ratio_prec_juil pour les précipitations du 1^{er} février au 30 ou 31 du mois.

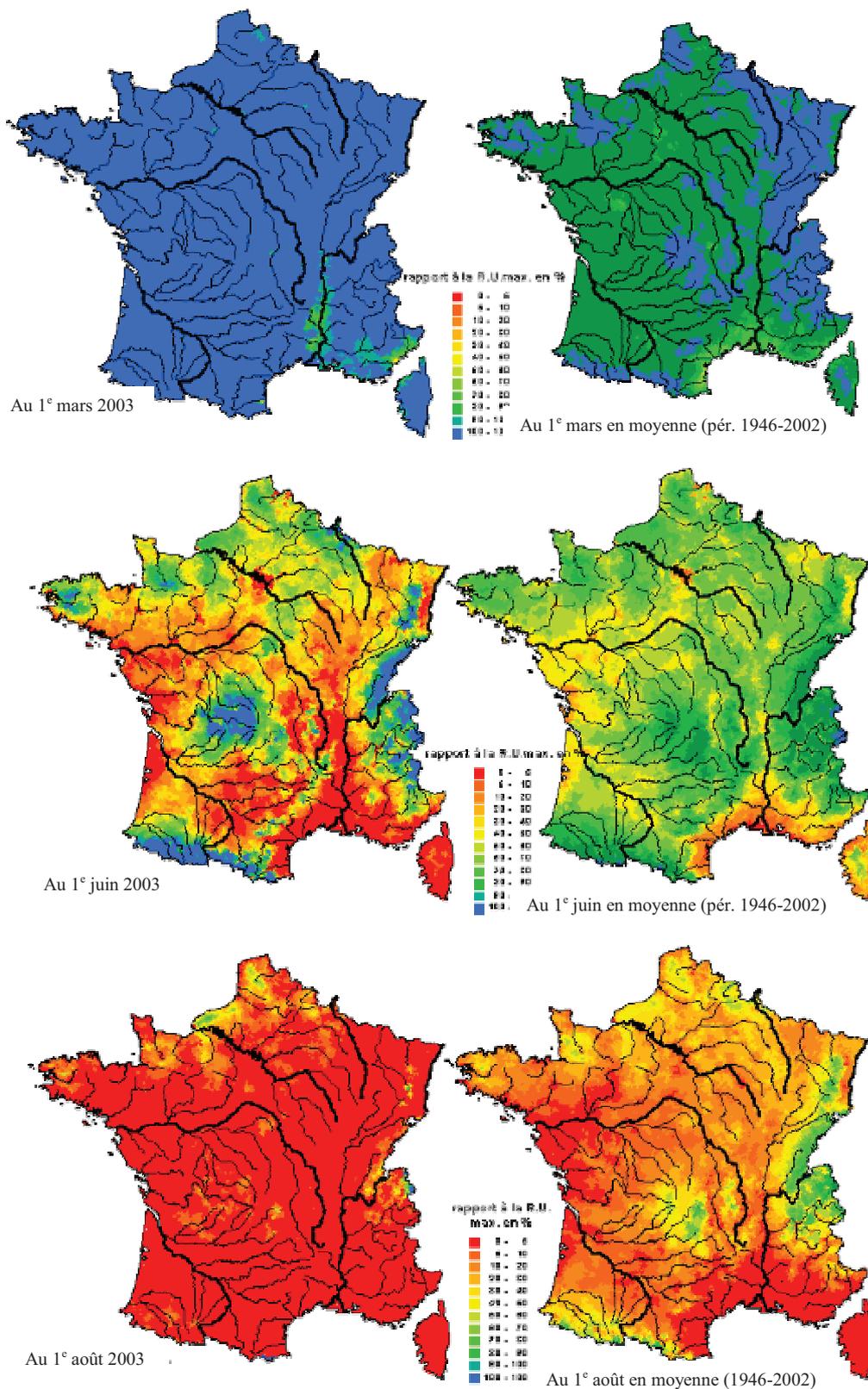


Figure 9. Etat de la réserve en eau du sol au cours des mois de mars, juin et août de l'année 2003 et en moyenne sur la période de 1946 à 2002 (source : OIEAU)

Les analyses univariées (annexe 5) montrent bien l'importance des valeurs pour le printemps, visible avec les ratios des précipitations de la période de février à différents mois. Cette importance culmine au mois de juin (R^2 de 67,1 %) et perd en détermination quand la valeur de juillet est prise en compte (R^2 de 66,9 %). Ensuite, comme on l'avait dit, le rapport entre 2003 et la période de 1946 à 2002 a un effet beaucoup plus significatif que les données de 2003 seules. Enfin, le mois de juin est plus significatif que le mois de mai, ce qui se voit au niveau statistique. En effet, les rapports de remplissage pour juin et pour mai sont fortement corrélés d'après le test de Pearson et une régression réalisée avec ces deux facteurs et $ir2_5$ pour expliquer $ir3$ montre que seule la valeur pour juin est explicative du modèle ($p(\text{ratio_juin})=E-118$, $p(\text{ratio_mai})=0,0005$, $R^2=67,3$).

Pour ces données, la variable de description de la sécheresse qui explique le mieux la perte de croissance est le rapport de remplissage de la réserve en eau du sol au 1^{er} juin 2003 par rapport à celle moyenne des premiers juin de la période de référence (probabilité = E-279, $R^2 = 67,3$). Cependant, comme le remplissage de la réserve est plus important lors du mois où ses valeurs sont les plus étalées, le résultat de cette régression uniquement pour la région méditerranéenne donne une significativité plus importante pour le mois de mai que le mois de juin. Les précipitations ont également un rôle très significatif qui culmine au mois de juin (le R^2 passe de 65,2 à 67,1 % en intégrant ratio_prec_juin), sachant qu'il s'agit des précipitations de février à juin.

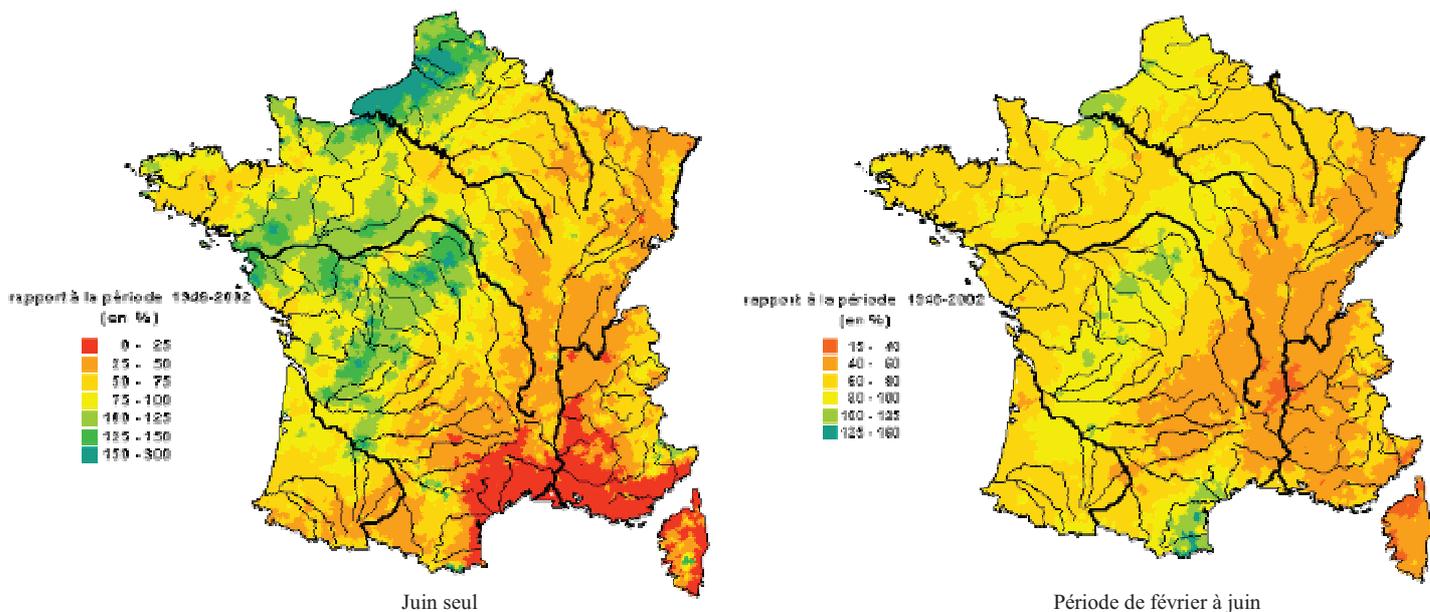


Figure 10. Pourcentage de précipitations de 2003 par rapport à celles de 1946 à 2002 pour la période du 1^e février au 30 juin et du mois de juin seul (source : OIEAU).

Or, physiologiquement, le remplissage de juin est plus explicatif que les précipitations. En effet, l'état de la réserve en eau du sol a une signification pour l'état hydrique de l'arbre qui détermine son fonctionnement en plus de l'approvisionnement par les pluies. Le remplissage est donc plus complet que les précipitations. On le voit d'ailleurs quand on intègre les deux à la régression pour le mois de juin ($p(\text{ratio_ru_juin})=E-28$, $p(\text{ratio_prec_juin})=E-6$, $R^2=67,3$). La significativité de l'effet des précipitations est due au fait que les précipitations ont retardé le vidage du sol. Par exemple, dans le Limousin, la sécheresse hydrique estivale a été la même que partout en France mais les précipitations du printemps ont maintenu les réserves à un niveau plus haut que d'habitude, provoquant un retard au vidage de la réserve, ce qui semble avoir épargné la forêt limousine (Figure 10).

La cause de la perte de croissance est donc bien un état des réserves en eau du sol. L'action de la température de la période caniculaire d'août, par exemple, n'est pas en cause pour expliquer la perte de croissance, la croissance étant arrêtée bien avant. La canicule a eu en revanche probablement un effet sur l'état du houppier, celui-ci étant littéralement brûlé, en raison de l'absence de refroidissement par l'eau des feuilles. Quant à la température de printemps, elle a joué un rôle sur l'évapotranspiration et donc sur les réserves en eau du sol, sans être en soi la cause de la perte de croissance.

➤ *Analyse des données de BILJOU*

Les données issues de BILJOU confirment également l'importance de la sécheresse. Pour les étudier, le rapport pour la durée et le déficit a été calculé entre la valeur de 2003 et celle moyenne des 4 années précédentes (pour correspondre à la période de l'accroissement Acc2_5) et des 8 années précédentes. On nomme ces valeurs respectivement *ratio_duree4*, *ratio_deficit4*, *ratio_duree8* et *ratio_deficit8*. L'année 1994 n'a pas été prise en compte car il s'agit de celle où le fonctionnement de BILJOU est initialisé, faisant l'hypothèse du remplissage de la réserve au 1^{er} janvier 1994. Parfois, les 4 années précédentes n'ont jamais présenté de période de sécheresse, ce qui nous empêche de calculer le rapport, la durée et le déficit moyen étant de 0. Ce n'est jamais le cas pour la période de 8 ans. Il nous faut alors choisir entre la correspondance de la période avec l'accroissement de référence et un échantillon à la référence légèrement différente mais qui conserve tous les individus. Les régressions univariées confirment dans un premier temps l'importance des caractéristiques de la sécheresse. En effet, plus la durée de sécheresse édaphique augmente, en valeur absolue ou par rapport aux périodes de référence, plus la croissance est affectée. Il en est de même lorsque le déficit augmente. Cependant, l'explicativité des modèles semble moins bonne que pour les données de l'OIEAU mais cela est dû à la moins bonne description spatiale. En effet, les cartes OIEAU donnent les valeurs par commune (863 regroupements) alors que la méthode en utilisant BILJOU regroupe les données dans 134 groupes.

De plus, quand on intègre *ratio_ru_juin* ou *ratio_prec_juin* et ces grandeurs au même modèle, on constate que les deux restent significatives et que le sens de leur influence ne change pas (Tableau 13). Les données issues de BILJOU se recoupent légèrement avec *ratio_ru_juin* mais restent explicatives, sauf les valeurs brutes de 2003. De plus, le rapport d'après les quatre dernières années semble meilleur. Enfin, la durée de la sécheresse semble plus importante pour expliquer la perte de croissance que le déficit. Une régression intégrant *ratio_duree4* et *ratio_deficit4* le montre d'ailleurs puisque la probabilité d'erreur de type 3 est de l'ordre de E^{-19} pour le premier et de 0,02 pour le deuxième. *Ratio_duree4* explique donc l'influence de *ratio_deficit4* sur la perte. *Ratio_ru_juin* et *ratio_duree4* sont donc complémentaires. Cependant, le lien est faible entre ces deux variables, le coefficient de Pearson étant de -0,04. Ceci vient aussi de la différence de précision géographique, de durée de référence ou encore d'échelle temporelle.

Il existe encore une autre variable issue de BILJOU qui est connue pour être la plus explicative de la perte de croissance : la date de début de sécheresse qui correspond à la date d'arrêt de croissance et qui s'est révélé la plus significative dans plusieurs études. La régression ne peut être faite que sur les arbres dont la réserve en eau est descendue à moins de 40 % de la réserve utile en 2003, soit 13890 arbres. Pour comparer avec la date de début des années précédentes, il faut qu'il y ait eu une sécheresse sur toutes les années pour lesquelles la moyenne est calculée. Il y a ainsi, pour la différence de date par rapport à 2002, *dif_debut1*, 12870 arbres et pour la différence par rapport aux quatre années précédentes, *dif_debut4*, 9965 arbres. Le modèle donne ainsi des effets significatifs, surtout pour *dif_debut4* qui fait augmenter le R^2 de 65,2 à 67,7 % dans les régressions univariées. De plus, une sécheresse qui commence plus tôt en 2003 fait augmenter les pertes d'accroissement des

arbres. Son effet reste significatif avec ratio_ru_juin mais surtout est plus explicatif que ratio_duree4 dont la significativité disparaît. Les probabilités d'erreur de 3° type sont en effet, pour ratio_duree4 et dif_debut4, respectivement 0,61 et E-112.

variable	Augmentation de R ² x100 avec ratio_ru_juin seul	Augmentation de R ² x100 avec la variable seule	Augmentation de R ² x100 avec les 2 variables	Proba ratio_ru_juin	Proba variable
Durée sécheresse 2003	2,1	1,0	2,1	E-153	E-7
Rapport Durée sécheresse 4ans	2,0	0,6	2,5	E-245	E-62
Rapport Durée sécheresse 8ans	2,1	0,6	2,3	E-228	E-28
Déficit 2003	2,1	0,5	2,3	E-186	0,017
Rapport déficit 4ans	2,0	0,6	2,3	E-243	E-44
Rapport déficit 8ans	2,1	1,2	2,2	E-235	E-20

Tableau 13. : Résultats des régressions en fonction de différents facteurs de sécheresse

➤ *Conclusion : l'importance de la sécheresse édaphique*

Comme il a été dit, la finesse de la description spatiale des cartes de l'OIEAU permet à leurs données d'être plus pertinentes pour une étude à cette échelle spatiale, d'autant plus que les postes Météo France sont répartis inégalement. On a ainsi seulement 2 postes synoptiques dans le Limousin contre 7 dans le Nord. Cependant, BILJOU a une durée de référence plus conforme que les cartes OIEAU mais surtout donne les caractéristiques fonctionnelles les plus importantes d'une sécheresse tout en prenant en compte les caractéristiques du peuplement alors que les données de l'OIEAU sont issues d'un dispositif de type gazon avec un bilan hydrique mensuel, ne prenant donc pas en compte les variations quotidiennes. Outre la disponibilité des données climatiques, les limites à l'utilisation de BILJOU ici sont : (i) la mauvaise appréciation de la réserve utile du sol pourtant essentielle pour refléter des diversités spatiales de réponse des arbres et (ii) l'absence de mesure du LAI du peuplement. On retiendra donc les données des cartes OIEAU les plus intéressantes, à savoir ratio_ru_juin ou bien, si on étudie en particulier la zone méditerranéenne, ratio_ru_mai. On gardera aussi les caractéristiques de sécheresse calculée par BILJOU qui prennent en compte l'impact du peuplement sur le fonctionnement hydrique de la placette. La variable la plus explicative semble être la différence de date de début de sécheresse en 2003 par rapport au jour moyen de début lors de quatre dernières années. Elle est plus explicative que l'intensité et la durée de la sécheresse par rapport à ces quatre années. Cependant, ceux qui n'ont pas subi de sécheresse au moins une année au cours des 5 dernières ne peuvent pas entrer dans ce modèle. On gardera donc, pour pouvoir conserver tous les arbres, la variable ratio_duree4 dans l'élaboration du modèle tout en sachant que la date de début est plus discriminante.

4.2.2. Facteur peuplement

➤ *Prédominance du diamètre*

De nombreux facteurs du peuplement et du statut des arbres jouent un rôle dans la perte d'accroissement de 2003 par rapport à une croissance habituelle. Par exemple, la classe de diamètre explique la perte de manière significative avec un R^2 passant de 65,2 à 65,7 % entre le modèle exprimant $ir03brut$ en fonction de $ir2_5brut$ et celui intégrant en plus cette variable qualitative. Ce résultat est encore meilleur quand on utilise le diamètre de l'arbre à 1,30 m (R^2 de 65,7 % et une probabilité de risque d'erreur de type 3 de l'ordre de E-66). L'utilisation de la surface terrière à 1,30 m ne donne pas un aussi bon résultat ($proba=E-43$ et $R^2=65,5$). Par conséquent, plus les arbres sont petits, plus ils sont touchés par la sécheresse. Or, le diamètre de l'arbre est corrélé à de nombreuses variables du peuplement et des dimensions de l'arbre :

- le statut (futaie/ taillis) car les taillis sont presque tous du petit bois. Cependant, la différenciation futaie/taillis est sensée renseigner plus sur l'origine de l'arbre (rejet de souche) mais donne finalement un tri flou dépendant aussi de la classe de diamètre ;
- la densité car les peuplements denses sont souvent associés à du petit bois. En tout cas, le test de Pearson montre que les diamètres et la densité sont corrélés avec un risque d'erreur inférieur à E-4 ;
- la structure du peuplement (futaie régulière, taillis sous futaie, taillis simple). Pour la structure, comme les deux parties du système taillis sous futaie sont très différents, on le séparera pour mieux les interpréter ;
- l'étage d'appartenance de l'arbre, les arbres surcimés étant plus petits que les arbres dominés et dominants.

On procède aux régressions multivariées avec le diamètre et ces valeurs (Tableau 14). Dans ces résultats, les têtards ont été supprimés pour le tri taillis-futaie et de même que les arbres de futaie irrégulière pour la structure car ils sont trop peu nombreux. La dominance des taillis n'étant classée qu'entre dominant-dominé et surcimé, on réalise une régression de cette appartenance ou non à l'étage principal pour tous les arbres (variable étage) et de la dominance plus détaillé pour les brins de futaie (variable dominance pouvant prendre les modalités suivantes : dominant, dominé, surcimé, réserve).

Variable	Probabilité (variable)	Probabilité (D13)	$R^2 \times 100$	Effet
D13 seul		E-66	65,7	
Densité	E-6	E-45	65,7	Si la densité baisse, la perte augmente toujours
Taillis/futaie	E-7	E-66	65,8	Les brins de taillis sont moins touchés à diamètre égal
Etage	E-4	E-52	65,7	L'étage principal reste le moins touchée
structure	E-31	E-69	66,0	La futaie régulière est la plus touchée, le taillis simple l'est le moins, les composantes du taillis sous futaie sont touchés de manière similaire.
Dominance pour les brins de futaie seuls	E-7	E-47	63,1	Les réserves sont plus touchées mais toutes les classes de dominance sont atteintes de manière similaire.

Tableau 14. : Résultat des régressions en fonction de variables dendrométrique de l'arbre

Le diamètre reste toujours le plus important et explique l'effet densité et l'effet de l'étage même s'il leur reste un certain rôle. La dominance des houppiers n'est pas très importante pour les brins de futaie, toutefois elle ne l'est pas beaucoup non plus si on ne fait pas intervenir le diamètre. Il serait donc erroné d'expliquer cet effet de dominance par le diamètre.

Pour la différence entre taillis et futaie, les dégâts visibles de manière brute semblent également plus expliqués par le diamètre à tel point que le taillis devient moins touché. Cependant, la différence entre taillis et futaie n'est rigoureuse que pour le petit bois. En effet, les taillis d'un certain diamètre et d'un certain âge sont inventoriés comme des brins de futaie alors que certaines essences qui sont classées obligatoirement dans le taillis en raison de leur capacité à drageonner (Manuel du chef d'équipe). Pour étudier l'effet origine au sens strict, on l'étudie donc uniquement sur le petit bois en supprimant les essences classées comme drageonnantes d'après l'IFN comme le bouleau ou le robinier (Tableau 15). L'effet origine est donc toujours moins important que le diamètre mais a toutefois un rôle plus important qu'en prenant tous les arbres. De plus, à diamètre égal, les brins de taillis sont moins touchés que les brins de futaie pour le petit bois des essences non drageonnantes.

Variable	Probabilité (taillis/futaie)	Probabilité (D13)	R ² x100	Effet
Taillis/futaie	E-9	E-13	68,0	Les brins de taillis sont moins touchés à diamètre égal

Tableau 15. : Résultat de la régression en fonction de l'origine pour le petit bois

Enfin, la structure du peuplement n'a pas non plus d'effet plus significatif que le diamètre mais explique toutefois plus les pertes que les autres variables. Ainsi, les brins de futaies régulières sont plus touchés tandis que le taillis simple l'est beaucoup moins. Enfin le taillis sous futaie est touché de manière intermédiaire et de façon similaire entre la partie taillis et la partie futaie.

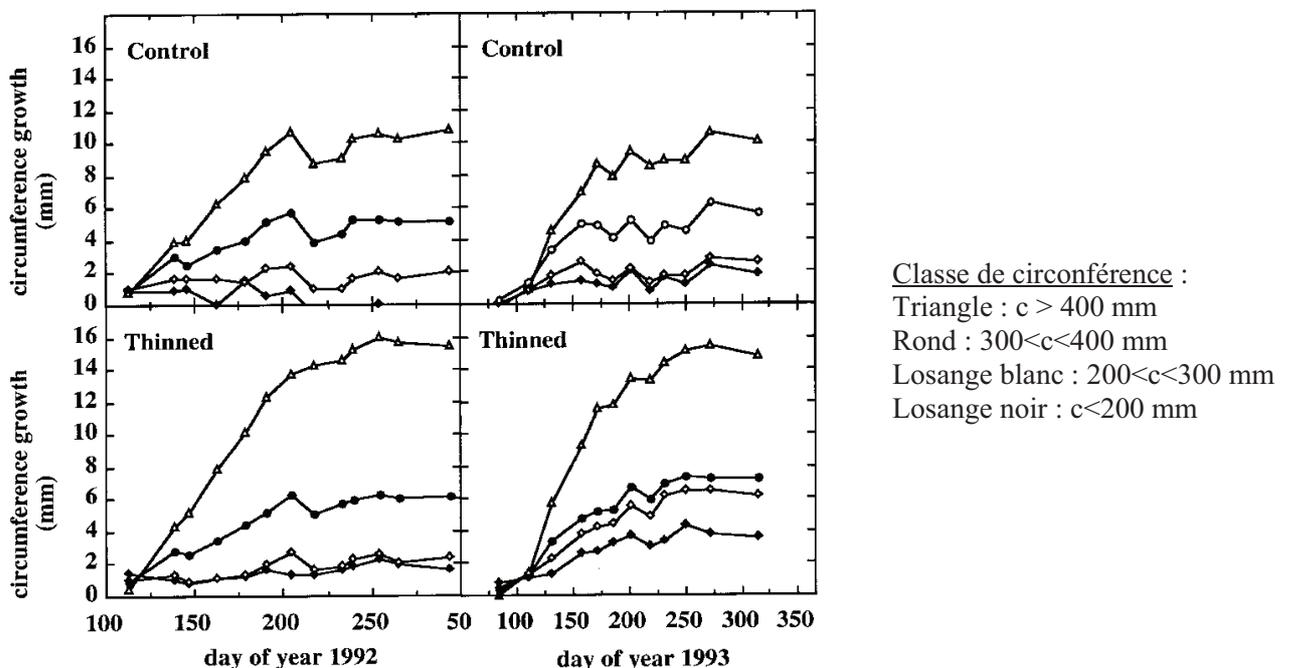


Figure 11. Différences de croissance en circonférence avant apparition d'une sécheresse édaphique en fonction de la circonférence initiale dans différents cas de gestion (source : Bréda, 1995).

Le diamètre présente donc un effet supplémentaire par rapport aux indicateurs de sécheresse. La meilleure explication physiologique d'une telle influence est celle de la différence de profondeur

d'enracinement. Un petit bois a un enracinement moins développé et n'a donc pas accès aux réserves en eau les plus profondes. Or, comme il a été vu précédemment, ce sont les horizons profonds qui ont été primordiaux dans la résistance à la sécheresse. Cette caractéristique des diamètres se retrouve dans une étude de Bréda (1995) sur la croissance des arbres en circonférence en fonction de leur diamètre initial lors d'une sécheresse estivale normale (Figure 11). On constate que, dans des zones éclaircies ou témoin, des plus gros diamètres ont poussé plus et plus longtemps lors de la sécheresse de 1992.

Cet effet pourrait aussi traduire un effet âge. Cependant, une régression avec le diamètre et l'âge sur les 3710 arbres dont l'âge a été mesuré montre que, d'après le LSmean, à diamètre égal plus un arbre est vieux, plus il est susceptible de subir une baisse de croissance. Le diamètre de l'arbre peut également traduire, selon les situations, une différence de statut de l'arbre que la densité et la place dans le couvert n'a pas suffi à exprimer.

➤ *Indice de compétition*

Le diamètre ferait donc également partie d'un effet de compétition, c'est à dire l'interférence des arbres dans l'exploitation de la ressource (Prevosto, 2006). En effet, on peut supposer que lors de la forte diminution de la ressource en eau, le statut des arbres a joué un rôle dans l'accès aux dernières ressources disponibles. On essaie donc d'intégrer différents indicateurs de compétition qui prennent en compte la dimension des arbres ou bien qui ne donnent des renseignements que sur le peuplement. Ces indices peuvent souvent se calculer pour les quatre grandeurs de l'arbre (diamètre, surface terrière, volume et hauteur) mais on laissera de côté le volume pour les raisons de mesures d'accroissement. Parmi ces indices se trouvent donc :

- les dimensions par placettes (diamètre et surface terrière cumulée) qui renseignent sur la densité de la placette. Elles ne dépendent pas des arbres. Cependant, leur influence ne semble pas, dans les régressions univariées, être très importante.
- la surface terrière sur la densité. Cela permet de faire la différence entre un petit brin de futaie et un brin de taillis simple.
- la dimension de l'arbre sur celle de l'arbre moyen ou sur la dimension maximale ou dominante de la placette. Le premier cas est celui qui semble le mieux classer les arbres d'une placette selon leur diamètre et donc selon leur dominance « par le bas », la dominance « par le haut » n'étant pas très explicative comme on l'a vu précédemment. Le second trie aussi les arbres selon leur diamètre. Il dépend des arbres extrêmes et classe au même niveau une réserve de taillis sous futaie avec le plus gros brin d'un taillis simple. Enfin, le troisième cas reprend ce classement en lissant les valeurs extrêmes.
- la hauteur dominante de la placette. Cela correspond cette fois à une dominance par le haut, en supposant que plus les arbres sont hauts par rapport aux autres, plus ils ont accès à la lumière. Prevosto suggère plutôt de prendre le pourcentage de hauteur de houppier par rapport à la hauteur de l'arbre. Cependant, la longueur de fût sans branches n'est renseignée dans les données IFN que pour les peupliers et les gros bois (IFN, 1994) et correspond à la longueur de grume dans laquelle des découpes peuvent être faites. Cette solution n'est donc pas exploitable.

$$- \text{l'indice de Tomé et Burkhardt : } iTome = \frac{10\,000}{N} \times \frac{g}{g_{\text{moy}}} = \frac{g}{G}$$

où N est la densité, g la surface terrière de l'arbre, g_{moy} la surface terrière de l'arbre moyen et G la surface terrière à l'hectare (Tome et Burkhardt, 1989). Cet indice rajoute à la catégorie de taille par rapport à la placette un renseignement sur la densité, ce qui permet de différencier un

brin de futaie régulière par rapport à un brin de taillis. Il permet de comparer les situations intra et inter-placette des arbres. On le calculera aussi pour le diamètre (d/D).

$$- \text{l'indice de Reineke} : i_{\text{Reineke}} = N \times \frac{Dq^{1,625}}{25,4^{1,625}} \quad \text{où } Dq \text{ est la moyenne}$$

quadratique des arbres de la placette (Reineke, 1933). Cet indice renseigne sur la densité du peuplement par rapport à la densité maximale pour le diamètre quadratique moyen du peuplement avant qu'il y ait autoéclaircie, c'est-à-dire que les arbres dépérissent à cause de la forte densité. i_{Reineke} est donc le même pour tous les arbres de la placette et renseigne sur le stress global.

Parmi tous ces indices, ceux qui semblent avoir le plus d'influence sur la perte, d'après les régressions univariées, sont ceux calculés à partir du diamètre, notamment le rapport avec le diamètre dominant, les rapports entre la grandeur de l'arbre et celle du peuplement et l'indice de Tomé. En réalisant les régressions avec ces variables et le diamètre, on obtient les résultats suivants présentés dans le tableau 16.

Certains indices apportent des explications. Il s'agit des variables peuplements (G, D, i_{Reineke}). Le rôle du diamètre ne diminue pas beaucoup car, même s'il y a une corrélation, ils ne sont pas liés directement.

Variable	Proba(variable)	Proba (D13)	R ² x100	Effet
D13 seul		E-66	65,7	
G	E-18	E-79	65,8	Si G augmente, les dégâts augmentent. Si D13 augmente, les dégâts diminuent
D	E-16	E-53	65,8	Si D augmente, les dégâts augmentent. Si D13 augmente, les dégâts diminuent
g/N	0,057	E-46	65,7	Si g/N augmente, les dégâts diminuent Si D13 augmente, les dégâts diminuent
g/gmoy	0,81	E-36	65,7	Si D13 augmente, les dégâts diminuent
d/dmoy	0,14	E-23	65,7	Si D13 augmente, les dégâts diminuent
g/gmax	0,63	E-42	65,7	Si D13 augmente, les dégâts diminuent
d/dmax	0,48	E-43	65,7	Si D13 augmente, les dégâts diminuent
g/gdom	0,025	E-19	65,7	Si D13 augmente, les dégâts diminuent
d/ddom	E-4	E-13	65,7	Si d/dd augmente, les dégâts diminuent Si D13 augmente, les dégâts diminuent
h/hdom	E-5	E-33	65,7	Si d/hd augmente, les dégâts diminuent Si D13 augmente, les dégâts diminuent
Tomé	E-14	E-12	65,8	Si iTome augmente, les dégâts diminuent Si D13 augmente, les dégâts diminuent
d/D	E-19	E-21	65,8	Si d/D augmente, les dégâts diminuent Si D13 augmente, les dégâts diminuent
i_{Reineke}	E-19	E-73	65,8	Si i_{Reineke} augmente, les dégâts augmentent Si D13 augmente, les dégâts diminuent

Tableau 16. : Résultat de la régression en fonction des différents indices de compétition et du diamètre à 1,30 m

En revanche, les indices dépendant de la valeur moyenne, maximale ou dominante n'apportent rien de plus, sauf le rapport d'après la grandeur dominante pour le diamètre et la hauteur. Cette influence de la hauteur plus forte que les autres indices est due au fait que la formule ne prend pas en compte le diamètre. Toutefois, diamètre et hauteur sont très corrélés d'après de Test de Pearson et l'influence de la hauteur diminue dans le modèle quand il y a aussi le diamètre.

Enfin, quelques indices ont un effet aussi significatif que le diamètre. Il s'agit de l'indice de Tomé et de sa variante pour le diamètre. Les indices qui ont le plus d'influence sur la perte des arbres sont donc des indices prenant en compte la situation de l'arbre dans le peuplement à partir des données arbres ainsi que des grandeurs générales de la placette. On conservera pour la suite l'équivalent de cet indice pour le diamètre (d/D) car dans une même régression, c'est lui qui a le plus d'influence.

➤ *Conclusion sur l'effet des variables dendrométriques*

En conclusion, plusieurs caractères de description du peuplement et des arbres rentrent en compte et se recourent. Le principal facteur est une donnée arbre, celle du diamètre à 1,30 m avec des accroissements en diamètre en 2003, à $ir2_5$ égal, qui diminuent quand le diamètre est plus faible, et ce de manière plutôt linéaire. Cette caractéristique de l'arbre s'explique par un côté physiologique, les petits bois ayant des racines moins développées en profondeur pour atteindre les réserves lors des sécheresses. Mais l'influence du diamètre s'explique aussi par la situation de l'arbre dans le peuplement vis-à-vis de la compétition par le bas, c'est-à-dire à la compression des troncs, celle-ci dépendant du diamètre, les arbres dominés à ce niveau, étant plus touchés. L'indice le plus explicite est d/D , car c'est le plus complet : il donne la situation de l'arbre par rapport à ses voisins et renseigne sur la densité.

Enfin, il y a une influence de la densité de la population, visible avec la surface terrière du peuplement ou $iReineke$, qui ne s'explique pas dans les modèles par un indice de compétition. C'est un effet prédisposant des peuplements : les forêts présentant des surfaces terrière ou des $iReineke$ plus grands sont plus touchés que les autres. Ceci est sans doute dû au fait que les peuplements denses ont un indice foliaire plus élevé, les réserves en eau du sol sont ainsi plus vite épuisées, entraînant une baisse de production plus forte que dans les peuplements à $iReineke$ moins fort où la réserve en eau est épuisée moins vite. Une plus faible densité est également favorable à la recharge en eau du sol par les précipitations en cours de saison, l'interception étant moindre si l'indice foliaire est plus bas.

Il y a donc des effets peuplement, des effets arbre et des combinaisons traduisant la situation de l'arbre. Il est fort probable que ces indices jouent sur l'efficacité des quelques épisodes pluvieux intervenus pendant la saison de végétation et sur l'accès à l'eau qui a été le facteur discriminant lors de la sécheresse de 2003. Ces facteurs sont difficiles à situer entre prédisposant (bilan hydrique plus défavorable) et aggravant (moindre accès à l'eau profonde) car si ce n'est pas leur diamètre ou leur situation qui a enclenché leur perte de croissance, ces caractéristiques ont limité leur accès à l'eau.

4.2.3. Facteur essence

➤ *Première approche*

L'étude de la perte essence par essence est celle qui a été la plus réalisée. Il est difficile d'étudier l'impact de l'essence sur la perte des individus par rapport à celle de 1999 à 2002 car les groupes sont très déséquilibrés. Il faut donc soit sélectionner les essences les plus présentes, soit les regrouper. On considère qu'une essence peut être étudiée si son effectif dépasse le dixième du groupe le plus gros. Les treize essences les plus présentes, que l'on étudiera plus particulièrement sont donc : le chêne pédonculé (2254 arbres), le chêne sessile (3059), le chêne vert (802), le hêtre (919), le charme

(2143), le châtaigner (1637), le bouleau (635), le frêne (926), le pin d'Alep (884), le douglas (1716), l'épicéa commun (516), les grands aulnes (486) et le pin sylvestre (529). De plus, on réalise des regroupements selon le fait que l'arbre soit un résineux, un feuillu caducifolié ou un feuillu sempervirent.

D'après les analyses univariées, l'essence a un rôle significatif sur l'impact de la sécheresse. En effet, l'intégration du groupe d'essences au modèle augmente le R^2 de 65,2 à 65,4 % et celle des treize essences les plus présentes l'augmente de 65,1 % à 66,1 %. Le classement de ces essences selon le LSmean de ir03brut à ir2_5brut égal donne les résultats suivants :

EPICEA COMMUN	1.42 mm	p(essence)=E-104 R²x100=66,1
DOUGLAS	1.48 mm	
CHENE VERT	1.62 mm	
PIN SYLVESTRE	1.63 mm	
CHARME	1.66 mm	
FRENE	1.69 mm	
CHENE ROUVRE	1.74 mm	
GRAND AULNE	1.74 mm	
BOULEAU	1.78 mm	
PIN D'ALEP	1.79 mm	
HETRE	1.85 mm	
CHATAIGNIER	1.87 mm	
CHENE PEDONCULE	2.02 mm	

D'ores et déjà, il s'avère que le classement selon les groupes d'essences se retrouve dans le classement des espèces. Cependant, la présence du pin d'Alep parmi les essences les moins touchées explique la faible augmentation du R^2 dans le cas du regroupement.

➤ *Limite du classement : analyse des cernes*

Ce classement dépend cependant de la localisation géographique des espèces dont dépendent les indices de sécheresse, de l'organisation du peuplement variant pour chaque essence ainsi que les dimensions de l'arbre dont il faut supprimer les effets pour avoir une influence intrinsèque de l'espèce. De plus, on constate lors d'une régression avec ratio_ru_juin ou avec toutes les variables retenues provisoirement dans le modèle, que les deux espèces méditerranéennes sont les moins touchées. L'intégration au modèle provisoire montre le classement suivant :

	LSmean		probabilité de type 3
EPICEA COMMUN	1.40 mm	ir2_5brut	0
DOUGLAS	1.60 mm	ratio_ru_juin	2.155E-167
CHATAIGNIER	1.68 mm	ratio_duree4	1.2536E-39
PIN SYLVESTRE	1.69 mm	D13	4.1675E-22
BOULEAU	1.72 mm	iReineke	.001834832
FRENE	1.74 mm	d/D	.000082205
GRAND AULNE	1.76 mm	libelle	7.5976E-24
CHENE ROUVRE	1.77 mm		
CHARME	1.77 mm	R²x100 = 68,7 %	
CHENE PEDONCULE	1.79 mm		
HETRE	1.80 mm		
CHENE VERT	1.82 mm		
PIN D'ALEP	1.92 mm		

Cette résistance des espèces méditerranéennes pose un problème d'interprétation, notamment pour le pin d'Alep qui semble réagir de manière complètement opposée aux autres résineux. On retrouve ainsi le problème du classement des régions en fonction des dégâts. La région méditerranéenne, dans les régressions univariées, est une région touchée de manière moyenne dans sa croissance. Or, il s'agit de la région où la sécheresse a été la plus importante. De plus, les indices de sécheresse semblent être les facteurs les plus importants pour l'explication de la perte, d'après la

littérature et les premiers résultats. Il y a donc une discordance entre le classement des régions et les indices de sécheresse, en particulier à cause de la région méditerranéenne. Les explications possibles sont celles :

- d'une adaptation de ces essences face à la sécheresse, ce qui leur permet de continuer à croître ou de reprendre une croissance en fin de saison au retour des pluies
- d'une influence stationnelle importante des placettes de la région méditerranéenne, limitant l'effet de la sécheresse.
- d'un problème systématique dans les prises de mesures.

Pour la dernière possibilité nous rapporte au problème de lecture de cerne présenté dans la première partie. En effet, comme la sécheresse édaphique a commencé très tôt dans cette région en 2003, certains arbres de Méditerranée ont peut être eu une croissance nulle ou du moins très peu visible, même à la loupe. De plus, les cernes sont difficilement identifiables pour le chêne vert. Ceci expliquerait le manque de cohérence entre la région et la perte pour ce qui est des moyennes des variables de sécheresse `ratio_ru_juin` et `ratio_duree4` par région. Par ailleurs, si les arbres de la région méditerranéenne sont supprimés, la régression univariée avec `ratio_ru_juin` ne fait plus passer le R^2 de 65,2 à 67,1 % mais de 64,6 à 67,2 %.

Ces caractéristiques sont à mettre en relation avec la particularité de la sécheresse de 2003. En effet, celle-ci a commencé de manière importante en juin dans la majorité du pays. Du bois initial avait déjà dû être formé et c'est surtout le bois final qui est absent. On peut le voir par exemple sur des carottes de douglas (voir couverture). En revanche, la précocité de la sécheresse en Méditerranée a peut être provoqué des croissances très fines, voir inexistantes. De plus, la fin de la sécheresse s'est faite tardivement avec les plus grosses précipitations au mois d'octobre, quand la croissance est habituellement en perte de vitesse, sauf dans les Bouches du Rhône où elles ont commencé en septembre (figure 12). Cela a pu provoquer des faux cernes sur les individus, c'est-à-dire une reprise de croissance qui peut être confondu avec un cerne normal.

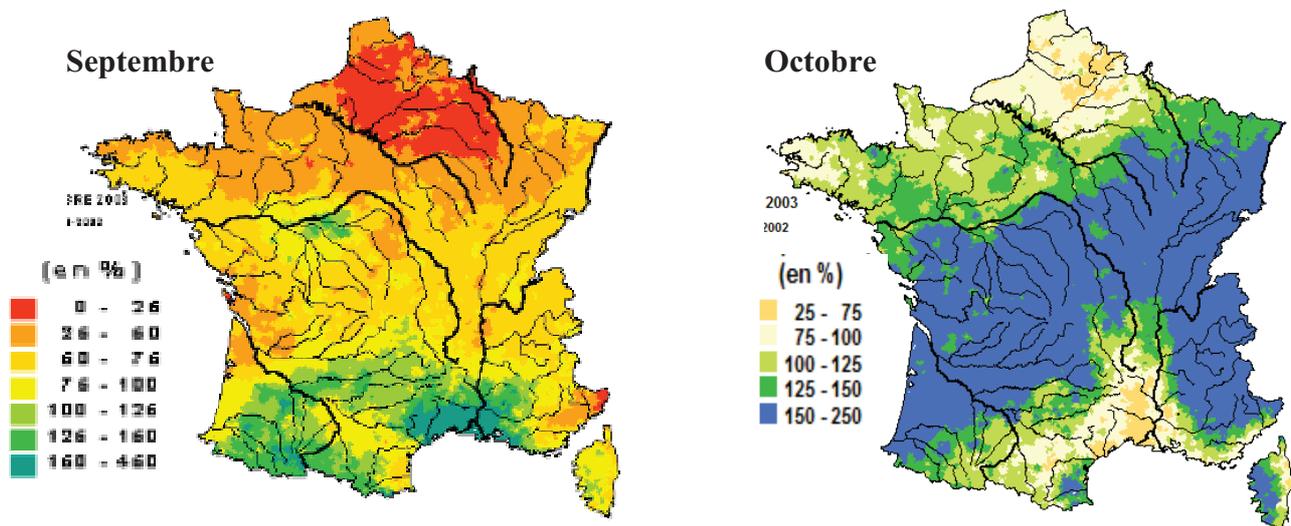


Figure 12. Apparition des pluies à l'automne 2003, ratio des précipitations de septembre et octobre 2003 par rapport à la période 1946-2002.

La plupart des arbres de Méditerranée ont donc dû poser des problèmes de comptage de cernes en raison du déroulement de la sécheresse et des deux essences principales qui l'a compose : le pin d'Alep à cernes manquants possibles et le chêne vert à accroissements confus. De plus, les arbres qui posent le moins de problème sont les individus à bois hétérogène dont l'accroissement minimum est

constitué de gros vaisseaux et est donc visible. Le problème que posent ces arbres est celui d'une absence de croissance, ce qui signifie qu'il ne peut pas reprendre l'année suivante tout en n'étant pas forcément identifiable comme arbre mort. Ensuite, si un cerne fin en 2003 ne peut pas être confondu avec le suivant qui n'a pas encore poussé, ou peu, lors de la campagne, il peut y avoir des confusions de cernes lors des années de référence.

Des régressions univariées intégrant les régions ou $ratio_{ru_juin}$ donnent des résultats variés selon les groupes d'arbres d'anatomie différente (Tableau 17 et 18).

Bois	Augmentation du R ²	Probabilité	Classement région
Hétérogène	2,8 %	E-145	B=M>N>L
Homogène	1,8 %	E-43	B>N>L=M
Résineux	3,2 %	E-66	B>N=M>L

Tableau 17. : Evolution du modèle exprimant ir_{03brut} en fonction de ir_{2_5brut} seul lors de l'ajout de la région pour les différentes catégories de bois.

Bois	Augmentation du R ²	Probabilité	Variations d' ir_{03brut} en fonction de $ratio_{ru_juin}$
Hétérogène	2,5 %	E-132	Ratio diminue=>dégâts augmentent
Homogène	1,2 %	E-29	Ratio diminue=>dégâts augmentent
Résineux	1,7 %	E-35	Ratio diminue=>dégâts augmentent

Tableau 18. : Evolution du modèle exprimant ir_{03brut} en fonction de ir_{2_5brut} seul lors de l'ajout de $ratio_{ru_juin}$ pour les différentes catégories de bois.

En comparant le classement des régions, on constate que celui des bois hétérogènes correspond plus au classement du remplissage des sols contrairement aux autres. S'il y a effectivement une prédominance dans l'explication des effets sécheresse, les bois hétérogènes sont effectivement des indicateurs plus rigoureux de l'accroissement. Ensuite, dans les classements par régions pour les différents types de bois, les trois régions autres que la méditerranée sont toujours dans le même ordre dans les régressions et que c'est cette dernière qui semble instable d'un type d'arbre à l'autre. Cela semble confirmer les difficultés d'identification des cernes dans cette région. Toutefois, cela ne supprime pas non plus l'explication de ce classement par la résistance des arbres méditerranéens.

On continuera donc à étudier les pertes sur deux groupes : un composé uniquement des espèces à bois hétérogène dans toutes les régions, pour conserver les individus plus sûrs ainsi que toutes les valeurs de sécheresse, et un composé de tous les arbres sauf ceux issus de placettes méditerranéennes pour avoir une réponse de toutes les essences sans les problématiques de cette région. On appellera ces groupes respectivement échantillon « bois hétérogène » et échantillon « non méditerranéen ».

➤ *Etude de l'influence de l'essence dans les deux groupes réalisés*

Les conclusions précédentes ayant modifié les échantillons, il convient de vérifier si les variables du modèle provisoire sont toujours explicatives. Pour les arbres à bois hétérogène, les variables ont toujours un effet significatif mais les variables dendrométriques du peuplement, d/D et $iReineke$ n'ont plus beaucoup d'influence. Elles semblent être complémentaires entre elles et avec le diamètre de l'arbre. Il en est de même, pour tous les arbres de l'échantillon non méditerranéen.

L'influence de iReineke reste cependant très significative alors que celle de d/D ne l'est pratiquement plus. En effet, elle prend en compte l'influence des dimensions de l'arbre et du peuplement qui sont contenues respectivement dans le diamètre et iReineke.

Une régression univariée avec l'essence pour les arbres non méditerranéens, pour les espèces suffisamment présentes, donne un R² de 65,5 %, contre un R² de 64,3 % pour une régression avec ir2_5brut seul pour le même échantillon, une probabilité d'erreur de type 3 est de l'ordre de E-97 et les LSmeans d'ir03brut, pour un même ir2_5brut, vont de 1,41 mm pour l'épicéa à 2,03 mm pour le chêne. Le classement, de l'espèce la plus touchée à la moins touchée est donné dans le tableau suivant. En intégrant une par une les variables du modèle provisoire à la régression univariée avec l'essence, on obtient les résultats suivants avec le LSmean et le rang de chaque arbre : Des régressions intégrant l'essence et les variables du modèle provisoire une à une permet, grâce aux LSmeans, de classer les essences par ordre de perte lorsque l'effet des autres variables disparaît (Tableau 19).

	Ratio_ru_juin		Ratio_duree4		D13		iReineke		d/D	
Probabilité(essence)	E-48		E-68		E-80		E-85		E-79	
Probabilité variable	E-203		E-53		E-44		E-8		E-39	
R ² x100	67,64		66,0 %		66,0 %		65,6 %		65,9 %	
	LSmean	rg	LSmean	rg	LSmean	rg	LSmean	rg	LSmean	rg
Epicéa commun	1,41	11	1,48	11	1,46	11	1,47	11	1,48	11
Douglas	1,60	10	1,52	10	1,51	10	1,55	10	1,54	10
Pin sylvestre	1,68	8	1,74	5	1,62	9	1,64	9	1,65	9
Charme	1,75	4	1,70	8	1,74	5	1,67	8	1,70	7
Grand aulne	1,65	9	1,66	9	1,72	7	1,70	6	1,72	6
Frêne	1,72	5	1,74	5	1,70	8	1,70	6	1,70	7
Chêne sessile	1,86	3	1,74	5	1,73	6	1,74	5	1,73	5
Bouleau	1,72	5	1,81	4	1,85	3	1,79	4	1,82	4
Hêtre	1,87	2	1,86	2	1,81	4	1,86	3	1,83	3
Châtaignier	1,71	7	1,84	3	1,95	2	1,93	2	1,93	2
Chêne pédonculé	1,90	1	2,02	1	1,97	1	2,02	1	1,99	1

Tableau 19. : Evolution des modèles avec essence lors d'ajout d'autres variables.

Les différents facteurs déjà présents dans le modèle expliquent donc une partie de l'effet essence (Annexe 7). Le véritable impact de l'essence et de son rôle intrinsèque se dévoile donc lorsqu'on intègre les variables au modèle. Ainsi :

- le châtaignier est en réalité plus touché qu'il n'y paraît car on le trouve principalement dans le Limousin où le remplissage était plus important que d'habitude. Il est possible cependant que ce classement soit dû à un biais en raison de sa présence dans les situations à faible sécheresse. En effet, si sa croissance plafonne à partir d'un certaines valeurs de remplissage, l'égalisation de cette variable le fait apparaître comme une essence intrinsèquement touchée. Le charme semble, au contraire, une des essences les moins touchées alors que son emplacement, principalement en Bourgogne, le rendait très vulnérable en apparence par rapport aux autres feuillus. Toutefois, la distinction de ses cernes est

particulièrement difficile, même en laboratoire. Sa perte précoce de feuilles en 2003 semble au contraire traduire un arrêt précoce et la distribution du rapport $ir2_5brut/ir03brut$ présentent beaucoup de valeurs arrondies ;

- le pin sylvestre se trouve principalement sur des zones où la durée de la sécheresse en 2003 a été en moyenne quatre fois plus longue que d'habitude. Ceci est due à sa présence plus importante en Bourgogne, en particulier dans les régions pédoclimatiques du plateau bourguignon central et de la montagne bourguignonne qui regroupent chacun 20 % des pins sylvestres et présentent des sécheresses de 2003 respectivement 4,1 et 2 fois plus longue que les quatre années précédentes pour une moyenne sur toutes les placettes de 2,2 fois. Le pin sylvestre est donc moins vulnérable qu'il n'y paraît. Toutefois, le pin reste une essence pouvant présenter des cernes manquants ;

- le charme est en apparence plus touché que les autres en raison de son diamètre, ceux-ci étant principalement composé de petit bois (87 % des tiges). Au contraire, le Hêtre et le Chêne sessile et le chêne pédonculé sont plus épargnés que les autres en apparence à cause de leur diamètre qui les rend plus résistants (leur pourcentage de gros bois en nombre de tiges et respectivement de 41, 27 et 42 %) ;

- en revanche, *iReineke* n'est pas beaucoup lié à l'essence. Certes son influence dans le modèle est faible mais elle est conservée. Seul l'épicéa, le douglas et le châtaignier se distinguent des autres essences par des peuplements plus denses, des plantations pour les deux premiers et du taillis pour la troisième. Cette tendance se retrouve dans les LSmeans où l'écart entre l'épicéa et le douglas et les autres essences est moins marqué. L'impact de *iReineke* est donc plutôt indépendant de l'effet essence et, quelque soit l'espèce, plus la densité se rapproche de la droite d'auto-éclaircie, plus les arbres sont touchés ;

- enfin, le ratio d/D semble aussi expliquer une partie de l'effet essence. Ce dernier reste assez fort et on constate que les résineux sont en réalité plus touchés qu'il n'y paraît car ils ont un d/D plus important.

Toutes ces variables interagissent donc avec l'essence dans l'explication de la perte. Pour avoir une meilleure idée de l'influence intrinsèque des essences, il faut réaliser une régression avec toutes les valeurs retenues précédemment afin de définir véritablement un ordre dans les essences. Le résultat de cette régression (1) nous confirme l'absence d'effets réels de d/D . Son effet, qui prend en compte à la fois la grandeur arbre et la grandeur peuplement, est entièrement expliqué par le diamètre à 1,30 m et *iReineke*. On le supprime donc du modèle et on procède à une régression (2) avec $ratio_ru_juin$, $ratio_duree4$, $D13$, *iReineke* et essence sur les 11 essences les plus présentes du groupe non méditerranéen.

Le résultat est le suivant :

	LSmean	Variable	probabilité de type 3
EPICEA COMMUN	1,46 mm	$ir2_5brut$	0
DOUGLAS	1,66 mm	$ratio_ru_juin$	1.8589E-165
GRAND AULNE	1,69 mm	$ratio_duree4$	1.05222E-35
PIN SYLVESTRE	1,72 mm	$D13$	3.27789E-57
CHATAIGNIER	1,74 mm	<i>iReineke</i>	2.038105E-9
FRENE	1,75 mm	essence	7.88241E-14
BOULEAU	1,76 mm		
CHENE ROUVRE	1,81 mm	régression sans essence : $R^2=68,31\%$	
CHENE PEDONCULE	1,81 mm	régression avec essence : $R^2=68,51\%$	
CHARME	1,82 mm		
HETRE	1,83 mm		

On retrouve donc :

- la perte de croissance intrinsèque importante des résineux par rapport aux feuillus. Une exception demeure, celle des grands aulnes qui est autant touché que les résineux. Il peut y avoir à nouveau des problèmes de lecture de cerne mais cette essence, ne supportant pas la sécheresse, a perdu ses feuilles de manière précoce en 2003. Il est donc possible qu'elle soit autant affectée que des résineux. Le pin sylvestre est le résineux le moins touché par la sécheresse. Toutefois, sa présence dans des régions pédoclimatiques qui présentent des sécheresses plus longue que la moyenne rappelle que le pin sylvestre peut faire des cernes manquants. La perte serait ainsi sous-estimée pour cette espèce en raison d'une confusion entre les cernes 2002 et 2003 ;

- le châtaignier, situé principalement dans des régions peu touchées par la sécheresse édaphique, se révèle être en réalité parmi les plus sensibles. Cette opposition est peut-être la conséquence du contrecoup d'uniformisation des variables dépendante de la région. En effet, le remplissage de la réserve en eau du sol a été, pendant la majorité de l'année 2003, plus importante dans le Limousin qu'au cours des 56 années précédentes. S'il s'avère que les valeurs d'accroissement puissent plafonner où juste tendre vers une valeur maximale, la régression risque d'être biaisée pour cette essence et que la perte de l'essence soit surestimée ;

- pour les autres essences, les chênes sont touchés de manière similaire. Le Hêtre et le charme semblent être les moins touchés. Cependant, dans la littérature, beaucoup d'auteurs s'accordent à dire que le hêtre est une des essences les plus sensibles à la sécheresse (Badeau, 1995, Granier et al., 1995, Lebourgeois et al., 2005). Cette résistance apparente de cette essence de climat à forte humidité atmosphérique peut s'expliquer de deux manières :

- la première se rapporte au problème d'identification des cernes très fins chez le hêtre, comme c'est le cas chez le charme. Bien qu'on ait choisi d'étudier ces arbres, il faut garder en tête le risque de biais provoqué par la comptabilisation du cerne de 2002 comme étant celui de 2003 ;
- la seconde concerne le délai de réaction. Certains travaux présentent le hêtre comme une essence qui réagit par sa croissance au cours des années suivant la sécheresse (van der Werf, 2007).

Le problème du hêtre pousse à considérer l'influence de l'essence en la liant à ir2_5brut (dans le modèle, ir2_5brut*essence). Cela donne les résultats suivants :

		Coefficient	variable	probabilité
ir2_5brut*libelle	EPICEA COMMUN	0.547	ir2_5brut*libelle	0
ir2_5brut*libelle	GRAND AULNE	0.553	ratio_ru_juin	6.714E-164
ir2_5brut*libelle	PIN SYLVESTRE	0.585	ratio_duree4	1.44167E-33
ir2_5brut*libelle	DOUGLAS	0.602	D13	1.39365E-51
ir2_5brut*libelle	FRENE	0.609	iReineke	7.2549E-10
ir2_5brut*libelle	BOULEAU	0.630		
ir2_5brut*libelle	CHARME	0.649	régression sans essence :	
ir2_5brut*libelle	HETRE	0.655	R²=68,31 %	
ir2_5brut*libelle	CHATAIGNIER	0.661	régression avec essence :	
ir2_5brut*libelle	CHENE ROUVRE	0.670	R²=68,90 %	
ir2_5brut*libelle	CHENE PEDONCULE	0.686		

Ce modèle est plus explicatif que le précédent mais son interprétation est légèrement différente. Une essence moins touchée signifie que plus l'accroissement les quatre années précédentes d'un de ses arbres augmente, moins l'ir03brut est touchée. De plus, la perte des grands aulnes par rapport aux autres espèces feuillues est confirmée, de même que celle de l'épicéa commun par rapport aux résineux. En revanche, le pin sylvestre est de plus en plus touché que le douglas quand ir2_5brut est important. Pour les feuillus, le frêne et le bouleau sont toujours parmi les plus touchés (à

l'exception des grands aulnes), mais le châtaignier et les deux chênes sont moins victime d'une perte de croissance. Enfin le hêtre n'est plus l'essence la moins touchée car, pour si ir2_5brut augmente, un hêtre sera plus touché qu'un chêne ou un châtaignier.

Pour le modèle concernant uniquement les essences à bois hétérogène dans toutes les régions de France, d/D n'est également plus significatif. Il en est de même pour iReineke qui ne varie pas entre les quatre essences (chêne sessile et pédonculé, frêne et châtaignier). Le modèle pour ces essences à bois hétérogène suffisamment nombreux est donc :

	LSmean	Variable	probabilité
CHATAIGNIER	1,58 mm	ir2_5brut	0
FRENE	1,67 mm	ratio_ru_juin	8.7464E-103
CHENE PEDONCULE	1,74 mm	ratio_duree4	1.18886E-40
CHENE ROUVRE	1,75 mm	D13	3.95016E-36
		essence	2.89364E-10
		régression sans essence : R² =68,75 %	
		régression avec essence : R² =68,95 %	

Le classement est le même que dans la régression précédente. La réaction similaire des chênes est également retrouvée. Il en est de même pour une régression avec l'essence liée à ir2_5brut avec une amélioration du modèle à peine plus importante.

➤ **Rôle du couvert**

Les résineux sont donc les plus touchés car ils épuisent plus rapidement l'eau du sol quand ils composent le couvert principal. Il peut donc y avoir une influence croisée de l'espèce de l'arbre et de celui du couvert principal. On se propose donc d'intégrer au modèle la nature du couvert qui peut être un effet explicatif de l'opposition entre résineux et feuillus. Cela permettrait de voir par exemple si une essence feuillue réagit de la même manière si le couvert, dont dépend la réserve en eau du sol, est résineux ou feuillu. Ce tri couvert résineux/couvert feuillu utilisé dans BILJOU permet de ne pas supprimer d'arbre supplémentaire pour en avoir un nombre suffisant, contrairement à un tri essence dominante par essence dominante. Cette intégration ne peut se faire qu'avec le groupe des arbres non méditerranéens, sinon les groupes de couverts sont trop déséquilibrés.

Une régression univariée avec cette grandeur augmente le R² de 64,3 à 65,0 % ainsi qu'une probabilité de risque d'erreur de type 3 de E-60, soit un meilleur résultat que le tri dans les deux groupes d'essence (R²=64,9 %). D'ailleurs, l'effet du groupe d'essences n'a pas d'effet significatif quand on intègre les deux variables dans la même régression. Les peuplements à couvert résineux sont les plus touchés. En revanche, une régression avec la classe d'essence principale et l'essence de l'arbre révèle que l'essence reste plus importante mais que le couvert joue toujours un rôle. Quant à l'intégration du couvert au modèle (2), le R² passe de 68,51 à 68,58 % et la classe de couvert se révèle avoir un effet plus significatif que l'essence elle-même même si celles-ci gardent un rôle :

	LSmean	Variable	probabilité
EPICEA COMMUN	1,52 mm	ir2_5brut	0
GRAND AULNE	1,61 mm	ratio_ru_juin	3.909E-164
FRENE	1,67 mm	ratio_duree4	1.4131E-33
CHATAIGNIER	1,67 mm	D13	2.2799E-53
BOULEAU	1,70 mm	iReineke	.000000043
CHENE ROUVRE	1,73 mm	essence	.000027829
DOUGLAS	1,74 mm	couvert	.000000042
CHENE PEDONCULE	1,74 mm		
CHARME	1,74 mm	régression sans couvert : R² =68,51 %	
HETRE	1,75 mm	régression avec couvert : R² =68,58 %	
PIN SYLVESTRE	1,78 mm		

Le classement change complètement et montre qu'en retirant l'effet couvert, les résineux deviennent forcément moins touchés. De plus, cette régression présentant en plus l'effet de la durée de sécheresse, intégrant dans son calcul la classe de couvert, a donc un rôle qui n'est pas seulement les conséquences de la transpiration. Bien que le couvert ait un rôle, il reste toujours un effet essence lié au fonctionnement de l'arbre. Ainsi, on a toujours pour les résineux, les épicéas qui sont les plus touchés et les pins sylvestres qui le sont le moins. Quand aux feuillus il reste les mêmes groupes : le hêtre, le charme et les chênes qui sont les moins touchés en 2003, puis le bouleau, le châtaignier et le frêne et enfin les grands aulnes qui est beaucoup plus touchés que les autres.

L'influence de l'essence n'est donc pas due qu'à une propriété intrinsèque du fonctionnement de chaque essence mais aussi à l'action qu'elle a sur l'ensemble de la placette quand elle constitue le couvert principal. Ainsi, les arbres feuillus sous couvert résineux sont plus touchés que sous couvert feuillus. Toutefois, cela ne remet pas en cause le classement des feuillus ou des résineux entre eux. Ensuite, pour être sûr de cette prédominance du couvert, il faudrait réduire cette régression aux seules essences feuillues ou résineuses, ce qui n'est pas possible à cause du déséquilibre des effectifs que cela entraîne entre les différents couverts. Enfin, dans une régression avec l'essence et l'ir2_5brut lié, l'influence du couvert n'est pas aussi important (probabilité = 0,0036) et le classement ne change pas non plus.

➤ *Bilan de l'effet essence*

Cette partie de l'étude a donc mis en lumière les problèmes de distinction des cernes obligeant à supprimer certaines essences ainsi que les arbres de la région méditerranéenne. D'autres essences ont été conservées mais le risque d'erreur de lecture reste élevé (charme et hêtre).

Les essences résineuses sont donc beaucoup plus touchées que les feuillues, en particulier l'épicéa et le douglas. Cette différence entre ces deux groupes d'essence est provoquée surtout par l'action du couvert sur la réserve en eau du sol, les feuillus sous couvert résineux paraissant plus touchés que ceux sous couvert feuillu. Toutefois, cette hypothèse n'a pas pu être vérifiée. Pour le classement des influences intrinsèques des feuillus, les chênes font partie des essences les moins touchées, surtout pour les arbres vigoureux. En revanche, le frêne et les aulnes sont les essences feuillues les plus touchées, probablement à cause de leur besoin important en eau, qui se sont fait sentir en 2003. Pour le hêtre, les arbres vigoureux ont été plus touchés que d'autres essences comme le chêne mais cette essence s'est révélée moins affectée qu'on ne le pensait (sauf en cas d'erreur de lecture de cerne). Cependant, l'impact de la sécheresse se fera sans doute ressentir plus intensément sur la croissance en 2004. Enfin, pour le châtaignier, la vigueur est très importante car son classement change complètement entre la régression indépendante d'ir2_5brut où il semble très touché et celle où l'essence est dépendante d'ir2_5brut, qui montre que quand cette espèce a une croissance importante, la croissance du châtaignier est moins affectée que celle des autres espèces.

Ces résultats sont donc à tempérer vis-à-vis de la bibliographie. Ils ne montrent en effet que la sensibilité de la croissance des essences en 2003 alors que certaines peuvent repartir plus facilement que d'autres. Ceci constitue une autre facette de la résistance à la sécheresse, comme par exemple chez le pin d'Alep. En effet, ses absences de cernes probablement récurrentes peuvent être vues plus comme une adaptation à la sécheresse. Cette espèce pourrait allouer son carbone à d'autres fonctions (mise en réserve) ou à d'autres compartiments (racines). De plus, il reste toujours la problématique des cernes absents ou peu visible qui peut fausser le classement.

Ce classement se retrouve globalement dans l'observation de la mortalité à la suite de la sécheresse (Figure 13) mais en mettant en lumière l'adaptation des différentes espèces pour pouvoir survivre. Ainsi, les chênes confirment leur résistance importante à la sécheresse par un faible taux de

mortalité alors que l'épicéa, le douglas, le pin sylvestre ou encore le bouleau confirment leur sensibilité à la sécheresse par des fortes mortalités. Si le pin d'Alep présente une adaptation, sa mortalité augmente quand même les années suivantes. Le châtaignier subit également des pertes importantes. Quant au hêtre, sa mortalité est plus forte que les essences qui avaient une baisse de croissance similaire, d'autant plus que le frêne est celui qui semble le mieux résister à une perte importante d'accroissement.

Pourcentage de mortalité

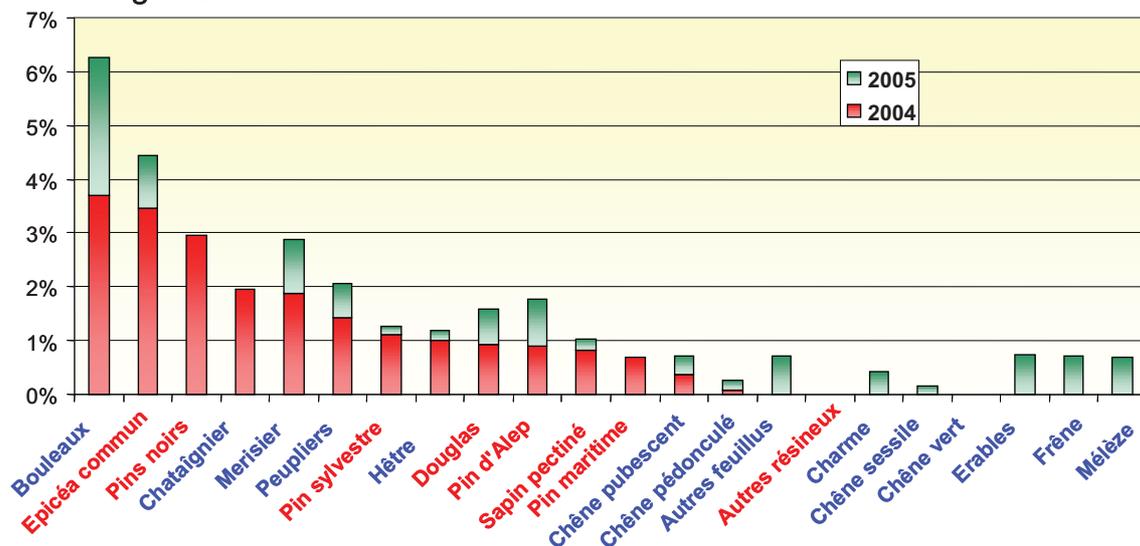


Figure 13. Taux de mortalité par essence observé dans le réseau européen du département Santé des Forêts au cours des années 2004 et 2005 (Source : Département Santé des Forêts)

Les effets du d/D ont pratiquement disparu, en raison de l'intégration de l'essence mais aussi de la suppression des arbres de Méditerranée. Cette variable a donc été supprimée du modèle, ce qui permet de mieux distinguer l'influence des facteurs arbre et peuplement.

Pour ce qui est des deux groupes d'arbres qui ont été formés, celui avec les arbres à bois hétérogène présente l'intérêt de conserver la Méditerranée et de présenter, à part pour des arbres qui n'auraient pas poussé et qui n'auraient pas été notés comme morts, des mesures plus sûres. L'autre groupe, avec tous les arbres non méditerranéens, peut présenter des résultats moins précis ou parfois erronés. L'étude des facteurs stationnels sera l'occasion de comparer les résultats entre ces deux groupes pour voir si le comportement des arbres est le même.

4.2.4. Facteur station

Les relevés de l'IFN nous permettent d'accéder à de nombreuses données stationnelles pour tenter de déterminer quels sont les facteurs prédisposants une perte d'accroissement. Nous disposons donc des données d'exposition, de pente, de situation topographique, d'altitude, de sol, d'humus et d'engorgement. Les relevés floristiques permettent aussi de calculer les indices d'Ellenberg d'humidité, de température, de lumière, de continentalité, d'acidité du sol et de richesse en azote. Cependant, d'après les régressions univariées (annexe 5), ces données stationnelles n'ont pas autant d'impacts que les variables de sécheresse. De plus, il est possible qu'elles soient liées aux variables retenues jusqu'ici dans le modèle, par exemple aux indices de sécheresse par superposition géographique. Enfin, l'influence de ces facteurs étant très faibles, il convient de sélectionner uniquement les arbres pour lesquels nous avons confiance dans la mesure de croissance. On continuera donc les régressions sur les deux groupes définis précédemment (essence à bois hétérogène et arbres

non méditerranéens). On utilisera le modèle avec l'essence dépendante d'ir2_5brut, ratio_ru_juin, ratio_duree4 et D13 pour les arbres à bois hétérogène, et iReineke et l'exposition en plus pour l'autre groupe d'arbres.

➤ *Influence du relief*

✓ Situation topographique

La situation topographique des placettes (sommet, milieu de versant,...) a été renseignée lors du relevé. Or, ces groupes sont très déséquilibrés avec des effectifs allant de 6687 arbres pour les zones plates à 41 pour les zones de replat. Il faut donc comparer uniquement les modalités suffisamment importantes ou bien les regrouper. De plus, une régression univariée sur toutes les essences non méditerranéennes les plus présentes montre que les zones les plus touchées correspondent aux zones de départ d'eau (la modalité la plus touchée étant le mi-versant convexe). Il est donc possible que la topographie ait joué un rôle aggravant par les écoulements latéraux. Quatre groupes, constituant la variable bilantopo sont donc créés en fonction du bilan d'écoulement établi d'après les arrivées et les départs d'eau (Tableau 20).

Groupe	Zones topographiques	Arbres non méditerranéens parmi les essences les plus présentes	Arbre à bois hétérogène
Bilan négatif	sommet, haut de versant, mi-versant convexe	2434 arbres	1348 arbres
Bilan nul	mi versant rectiligne	5128 arbres	2698 arbres
Bilan positif	mi versant concave, bas de versant, vallée large, vallon étroit	1648 arbres	918 arbres
Terrain plat	terrain plat et replat	5286 arbres	2912 arbres

Tableau 20. : Classements des positions topographiques dans les différents groupes définissant l'écoulement et effectifs

L'intégration de cette classification au modèle montre que ce bilan d'écoulement a un effet significatif dans les deux cas :

Arbres à bois hétérogène (augmentation du R² de 69,00 à 69,21 %)

	LSmean	variable	probabilite
negatif	1.63 mm	ir2_5brut*libelle	0
plat	1.63 mm	ratio_ru_juin	2.5634E-103
nul	1.73 mm	ratio_duree4	3.59E-36
positif	1.82 mm	D13	1.4077E-35
		bilantopo	5.74826E-11

Arbres non méditerranéens (augmentation du R² de 68,90 à 68,96 %)

	LSmean	variable	probabilite
negatif	1.70 mm	ir2_5brut*libelle	0
plat	1.70 mm	ratio_duree4	7.4547E-34
nul	1.76 mm	ratio_ru_juin	9.612E-161
positif	1.80 mm	D13	2.2609E-51
		iReineke	2.2486E-10
		bilantopo	.000014212

Les terrains à bilan d'écoulements positif ou nul subissent moins de perte de croissance de leurs arbres que les zones plates ou de départ d'eau. Il y a donc une cohérence entre ces deux régressions et le bilan des écoulements joue un rôle important en approvisionnant ou en appauvrissant le sol en eau, soulignant à nouveau l'importance de l'accès à l'eau du sol pour les arbres en temps de

sécheresse. Ces arrivées d'eau n'ont sans doute pas permis aux arbres de ces zones d'avoir de l'eau pendant la sécheresse mais leur ont permis d'entrée un peu plus tard dans la sécheresse par rapport aux autres placettes de même région, ce qui est important, comme il a été vu avec ratio_debut4.

✓ Pente

En raison de la tendance des agents à relever une pente de 0 lorsque la pente est faible (figure 14), l'impact de la pente, exprimée en pourcent, est étudié pour les placettes supérieures à 5 %.

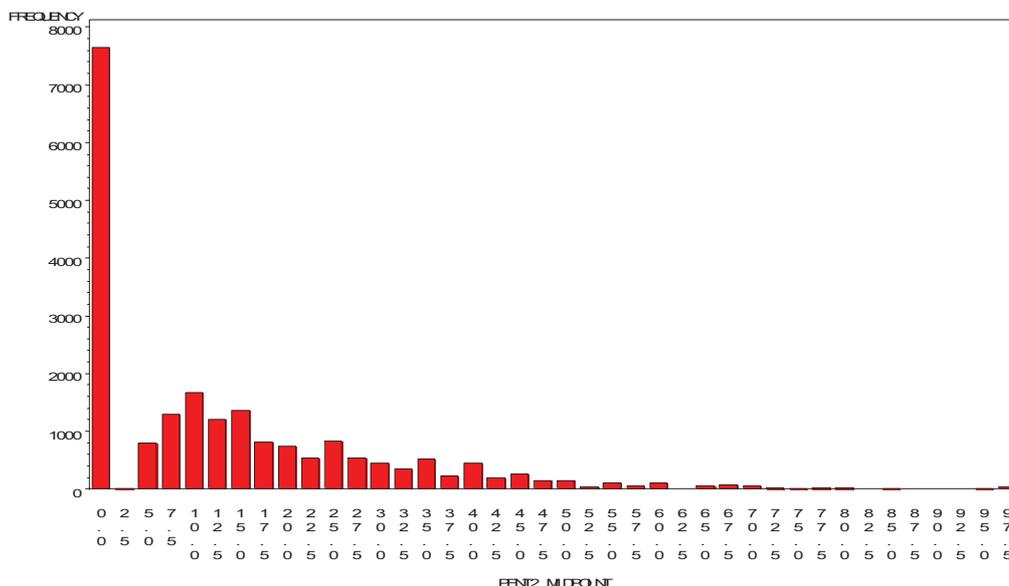


Figure 14. Répartition des valeurs de pente (%) pour les arbres du groupe non méditerranéen

Ceci donne des échantillons de 8732 arbres pour les essences les plus présentes hors Méditerranée, et 4756 arbres pour les arbres à bois hétérogène. Les régressions montrent que l'influence de la pente est très faible (probabilité de 0,049 pour les arbres non méditerranéens et 0,10 pour les arbres à bois hétérogène). Dans les deux cas, plus la pente est importante, plus la perte est élevée. Cependant, il est difficile de dire si cet effet est vraiment significatif.

✓ Exposition

L'exposition est difficile à prendre en compte en tant que variable continue car les mesures d'angles rendent les placettes exposées à 350° similaires à celles exposées à 0°. Quatre groupes d'exposition, constituant la variable classeexpo, ont donc été réalisés pour les placettes en pente : les placettes exposées à l'Est (45 à 135°), au Sud (135 à 225°), à l'Ouest (225 à 315°) et au Nord (315 à 45°). Une dernière classe est conservée pour les placettes sur sol plat (Tableau 21)

exposition	Arbres à bois hétérogènes	Arbres non méditerranéens
Plat	3076 arbres	5675 arbres
Nord	1266 arbres	2490 arbres
Est	1260 arbres	2205 arbres
Sud	1142 arbres	1981 arbres
Ouest	1080 arbres	5675 arbres

Tableau 21. : Classements des positions topographiques dans les différents groupes d'exposition et leurs effectifs

Arbres à bois homogène (augmentation du R²x100 de 69,07 à 69,15 %)

	LSmean	variable	probabilité
plat	1.65 mm	ir2_5brut*libelle	0
Est	1.68 mm	ratio_ru_juin	4.391E-103
Sud	1.68 mm	ratio_duree4	1.5902E-36
Nord	1.72 mm	D13	4.3331E-37
Ouest	1.76 mm	classexpo	.000654431

Arbres non méditerranéens (augmentation du R²x100 de 68,93 à 68,99 %)

	LSmean	variable	probabilité
Sud	1.70 mm	ir2_5brut*libelle	0
Est	1.70 mm	ratio_ru_juin	2.424E-162
plat	1.72 mm	ratio_duree4	3.6718E-33
Ouest	1.78 mm	D13	2.2374E-52
Nord	1.79 mm	iReineke	2.7007E-10
		classexpo	0.00112

Pour les deux groupes, l'influence de l'exposition est faible mais similaire, sauf pour les terrains plats. Les résultats permettent de faire deux groupes d'exposition en fonction des pertes de croissance des arbres : les placettes exposées au Nord et à l'Ouest dont les arbres sont moins touchés. La vulnérabilité des placettes exposées au Sud et à l'Est est due au fait que celles-ci sont exposées au soleil, ce qui augmente la transpiration, et que l'humidité de la nuit disparaît dès les premières heures du jour alors qu'au contraire, les placettes exposées à l'Ouest conservent cette humidité plus longtemps dans la journée. En revanche, les placettes étant surtout en région de plaine, l'essence du couvert varie peu d'une face à l'autre (16 % des placettes exposées au Sud sont des résineux, contre, 23 % des placettes exposées au Nord) et n'explique pas l'influence de l'exposition.

✓ Altitude

Enfin l'altitude, disponible uniquement pour certaines régions, ne montre qu'un effet assez faible (la probabilité la plus faible est celle pour les arbres à bois hétérogène, soit 0,042) pour ces deux groupes dans les différentes régressions. Cet effet d'altitude était pourtant visible chez certains auteurs (Graf Pannatier et al., 2007, Jolly et al., 2005) qui identifiaient une remontée de l'optimum des essences étudiées. Cependant, ces études étaient faites sur de grandes échelles d'altitude (de l'étage collinéen à l'étage nival) alors que nos points s'étalent de 30 m en Ile de France à 710 m en Saône et Loire. Il n'y a donc pas d'effet identifiable.

➤ ***Influence du sol***

✓ Type de sol

Le sol est au centre de la résistance des arbres à la sécheresse puisque ses caractéristiques lui permettent ou non de stocker de l'eau qui leur permettra de résister à la sécheresse. Une partie de cet effet sol, notamment la réserve utile, est d'ores et déjà prise en compte dans le calcul du bilan hydrique dans BILJOU. Le sol peut cependant présenter d'autres caractéristiques qui permettent ou non à la forêt de résister à la sécheresse. Les données de l'IFN mettent à disposition une classification des sols. Les groupes étant déséquilibrés, on ne conserve que les sols représentés par un effectif suffisamment grand, c'est-à-dire les sols bruns acides (34), les sols bruns calcaires (31), les sols bruns calciques (32), les sols bruns (33), les pseudogleys (81) et les sols bruns hydromorphes (38) (Tableau 22).

sol	Arbres à bois hétérogènes	Arbres non méditerranéens
Sol brun calcaire (31)	447 arbres	804 arbres
Sol brun calcique (32)	316 arbres	628 arbres
Sol brun (33)	1482 arbres	2879 arbres
Sol brun acide (34)	2565 arbres	4729 arbres
Sol brun hydromorphe (38)	550 arbres	1035 arbres
Pseudogley (81)	1798 arbres	3087 arbres

Tableau 22. : Classements des positions topographiques dans les différents groupes de sol et leurs effectifs

Arbres à bois hétérogène (augmentation du R²x100 de 69,04 à 69,16 %)

sol	LSmean	variable	probabilite
38	1.60 mm	ir2_5brut*libelle	0
32	1.65 mm	ratio_ru_juin	1.7453E-78
81	1.65 mm	ratio_duree4	1.7405E-28
33	1.73 mm	D13	1.3041E-38
34	1.73 mm	SOL	.000062676
31	1.81		

Arbres non méditerranéens (augmentation du R²x100 de 69,44 à 69,49 %)

sol	LSmean	variable	probabilite
38	1.69 mm	ir2_5brut*libelle	0
81	1.72 mm	ratio_ru_juin	1.202E-136
33	1.75 mm	ratio_duree4	5.6668E-26
32	1.75 mm	D13	2.1361E-53
34	1.76 mm	iReineke	2.9416E-10
31	1.84 mm	SOL	.003417768

Les sols hydromorphes (brun hydromorphe et pseudogley) sont les plus touchés alors que les sols bruns calcaires et acides présentent les arbres ayant eu la résistance la plus forte. Les sols bruns calciques et bruns ont des arbres touchés de façon intermédiaire. La vulnérabilité des arbres est donc plus forte si ceux-ci sont placés sur des sols marqués par des engorgements (sol brun hydromorphe et pseudogley) en raison de la contrainte estivale de ces sols : en hiver, la nappe est proche de la surface, asphyxiant les racines allant un peu en profondeur, et en été, lorsque la nappe baisse, les racines ne vont pas assez profondément pour capter de l'eau. De plus, si les régressions avec le type de sol sont faites pour les sols hydromorphes puis pour les quatre autres types non hydromorphes, dans tous les cas le sol n'a plus d'effet significatif. L'effet du sol est donc largement dominé par les problématiques liées à l'engorgement temporaire (limitant l'enracinement profond) et à la sécheresse estivale qui lui est liée (faible réserve utile liée à faible profondeur prospectée).

Avant la prise en compte des autres variables du modèle, le classement des sols par vulnérabilité était très différents, les sols hydromorphe étant moins touchés (Annexe 5). Ce classement était dû à la répartition des sols de manière différentes selon les régions et donc selon l'intensité de la sécheresse. Par exemple, les sols hydromorphes se trouvent surtout sur des zones plates, particulièrement dans la région Nord qui est relativement épargnée par la sécheresse par rapport aux régions comme la Bourgogne.

✓ Humus

Une autre composante du sol est l'humus. De même que pour le sol, on ne procède à une régression que pour les groupes d'humus suffisamment nombreux, c'est-à-dire : les moders (20), les héli-moders (22), les dysmulls (30), les oligomulls (31), les mésomulls (40), les eumulls (50), les

mulls carbonatés (55) et les mulls carbonatés épais (45) pour les arbres non méditerranéens (Tableau 23).

humus	Arbres à bois hétérogènes	Arbres non méditerranéens
Moder	324 arbres	850 arbres
Hémi-moder	417 arbres	890 arbres
Dysmull	970 arbres	1923 arbres
Oligomull	2540 arbres	4046 arbres
Mésomull	2100 arbres	3754 arbres
Mull carbonaté épais	-	507 arbres
Eumull	482 arbres	1061 arbres
Mull carbonatés	322 arbres	458 arbres

Tableau 23. : Classements des positions topographiques dans les différents groupes d'humus et leurs effectifs

Arbres à bois hétérogène (augmentation du R² de 69,42 à 69,48 %)

humus	LSmean	variable	probabilite
50	1.67 mm	ir2_5brut*libelle	0
30	1.68 mm	ratio_ru_juin	3.403521E-86
40	1.69 mm	ratio_duree4	2.824297E-25
20	1.71 mm	D13	4.38683E-40
31	1.71 mm	HUMUS	0.059179
22	1.78 mm		
55	1.81 mm		

Arbres non méditerranéens (augmentation du R² de 69,57 à 69,63 %)

humus	LSmean	variable	probabilité
30	1.69 mm	ir2_5brut*libelle	0
20	1.71 mm	ratio_ru_juin	2.038E-150
40	1.72 mm	ratio_duree4	8.0249E-28
31	1.72 mm	D13	5.3879E-57
45	1.78 mm	iReineke	.000000005
22	1.80 mm	HUMUS	.000979801
50	1.80 mm		
55	1.83 mm		

Cette fois, il y a moins de cohérence entre ces deux modèles en raison du faible effet de l'humus. Celui-ci n'a pas d'effet sur les arbres à bois hétérogène alors qu'il y en a un faible pour les arbres non méditerranéens. Dans ce groupe, l'hémi-moder, l'eumull et le mull carbonaté épais ou fin composent un groupe dans lequel les arbres sont moins touchés par la sécheresse par rapport au moder, au dysmull, à l'oligomull et au mésomull. Il n'y a donc pas de lien avec la richesse chimique. D'ailleurs, le tri entre humus moder et humus mull ne donne pas d'effet significatif. De plus, les groupes sont trop déséquilibrés si on compare les humus selon qu'ils soient carbonatés ou hydromorphes.

➤ *Coefficient d'Ellenberg*

La plupart des plantes forestières ont reçu des indices d'après les classifications d'Ellenberg qui renseignent sur l'optimum des conditions de lumière, de température, d'humidité, de continentalité, d'acidité et d'azote. Des coefficients d'Ellenberg, pour une partie des plantes, ont été fournis par l'INRA et par l'IFN, donnant une valeur de 1 à 9 (sauf exception comme l'humidité). La moyenne des indices des plantes présentes sur une placette renseigne donc sur des caractéristiques environnementales de l'inventaire. On ne possède toutefois pas ces indices pour toutes les placettes

car, pour être suffisamment rigoureux, il faut que l'indice d'Ellenberg soit connu pour au moins cinq plantes. Il manque donc beaucoup de données, notamment pour les placettes à couvert résineux qui abritent moins d'espèces.

		Arbre non méditerranéen		Arbre à bois hétérogène	
	Signification si égal à 1	univarié	Modèle provisoire	univarié	Modèle provisoire
Lumière	Espèce très ombrophile	E-8 (+)	0,063	E-10 (+)	0,007 (+)
Température	Espèce de haute montagne	0,76	0,20	E-7 (-)	0,85
Humidité	Espèce de milieu très sec	E-4 (+)	0,49	0,0017 (+)	0,056
Continentalité	Espèce ultra océanique	E-10 (-)	E-5 (-)	0,074	0,001 (-)
Acidité	Espèce très acidiphile	E-38 (-)	0,15	E-34 (-)	0,007 (-)
Azote	Espèce de milieu pauvre en azote	E-17 (-)	0,44	E-9 (-)	0,54

Tableau 24. : Probabilité d'erreur de type 3 des variables d'Ellenberg dans différents modèles, signe du coefficient de l'indice d'Ellenberg dans le modèle (+ : les dégâts augmentent quand l'indice diminue, - : les dégâts augmentent quand l'indice augmente).

Les données d'Ellenberg présentent des évolutions assez importantes au niveau de la significativité entre la régression univariée et l'intégration au modèle. Souvent, une partie de l'impact apparent est liée aux autres variables (Tableau 24). Par exemple pour l'acidité, le Limousin présente des valeurs beaucoup plus inférieures que dans le reste du pays. Or, cette région étant peu touchée à cause du ratio_ru_juin important, l'influence de l'acidité est minimisée. Seules trois variables semblent avoir finalement une influence pour le groupe dont les mesures d'accroissement sont sûres, c'est-à-dire celui des arbres à bois hétérogène : la lumière, la continentalité et l'acidité du sol. Ainsi, les placettes les plus acides, les moins continentales et les plus ensoleillées présentent des arbres moins touchés. L'effet de l'ensoleillement est indirect car il s'agit plus probablement de l'action du houppier plus faible associé à cet accès à la lumière qui a un rôle sur l'évapotranspiration et l'interception des pluies. La faible influence de ces variables donne toutefois des effets différents entre les deux groupes d'arbres.

➤ *Conclusion sur les prédispositions stationnelles*

La plupart des effets apparents de station sont en fait dus à une superposition géographique avec d'autres variables qui jouent réellement un rôle, principalement ratio_ru_juin. Ainsi, les facteurs stationnels n'ont que très peu d'impact, voire pas du tout.

A ce niveau de l'élaboration du modèle, les caractéristiques stationnelles n'apportent donc que quelques précisions sur la vulnérabilité des arbres. Ces influences sont si faibles par rapport aux facteurs de sécheresse, à la taille de l'arbre ou encore à l'espèce que les résultats des régressions sont instables d'un échantillon à l'autre ou avec une régression sur tous les arbres. Les restrictions à des groupes d'individus dont les mesures sont plus rigoureuses étaient donc nécessaires. Cependant, on retrouve pour certaines variables les mêmes résultats entre le groupe des arbres à bois hétérogène et le

groupe des arbres non méditerranéens, traduisant une stabilité de leur effet. On retiendra donc ces indices.

Les facteurs stationnels qui ont le plus d'importance sont donc le bilan des écoulements, les arbres placés sur des zones d'arrivée d'eau étant moins touchés, l'exposition des placettes, celles exposées au Sud et à l'Est ayant eu une baisse de croissance plus forte, et l'hydromorphie du sol, l'enracinement moins profond des placettes à nappe temporaire empêchant les arbres d'accéder à la réserve profonde lors de la sécheresse. Cependant, ces trois variables ont des modalités qui se recourent :

- pour les bilans d'écoulements, les arbres sur sol plat figuraient parmi les plus touchés car l'engorgement temporaire est plus fréquent sur ces zones ;
- pour l'exposition, l'engorgement explique également les dégâts sur les zones à plates. Ces relations nous amènent à supprimer l'exposition pour les arbres à bois hétérogène car, dans un modèle intégrant ces trois facteurs, son effet disparaît.

Certaines données nutritionnelles du sol (sol, humus, Ellenberg) semblent avoir une légère influence mais si faible que leur effet est variable d'un groupe à l'autre. On ne les retiendra pas pour la suite de l'étude.

Les facteurs stationnels les plus importants se rapportent tous à la problématique de l'accès à l'eau et de la transpiration. En effet, lors du calcul des caractéristiques de sécheresse par le programme BILJOU, l'engorgement des placettes qui limitent l'accès à l'eau en profondeur en été et les écoulements latéraux n'ont pas été pris en compte. De même, les données météo sont les mêmes quelque soit l'exposition des placettes. Ces données stationnelles ne font en réalité qu'affiner les estimations calculées par BILJOU.

4.2.5. Conclusion du modèle

L'élaboration du modèle a permis d'affiner la composition de l'échantillon qui révélait de nombreux problèmes, notamment sur les mesures de cernes. Ces problèmes ont conduit à n'étudier les données de Méditerranée qu'à travers les essences à bois hétérogènes pour lesquelles le risque de se tromper dans un décompte de cerne est moins grand. Pour éviter de faire un modèle uniquement pour ces arbres, il a fallu cependant continuer l'édification d'un modèle pour les autres arbres mais en supprimant les placettes de Méditerranée pour éviter certaines erreurs de datation comme les faux cernes. Cependant, cela fait perdre une partie de la représentativité de la France car il n'y a plus les essences purement méditerranéennes et les valeurs extrêmes de la sécheresse.

Une autre difficulté rencontrée est celle des valeurs et des modalités des variables. En effet, les données de l'IFN peuvent présenter des approximations de terrain, comme on l'a vu pour la pente ou encore les largeurs de cernes. De plus, les placettes, même si elles sont représentatives de la France, sont réparties en groupe à travers le pays. Cette répartition crée des discontinuités dans les données de l'IFN mais aussi et surtout dans les autres données. On a, par exemple, un très faible recoupement entre l'intensité de la sécheresse et de l'engorgement qui se trouve surtout dans les placettes de la région Nord. Les différentes origines des données sont également source d'imprécision en raison des différentes échelles géographiques. Les données de placette de l'IFN restent donc plus sûres et donnent des résultats significatifs pour les données stationnelles. Les cartes de l'OIEAU ont une précision communale, c'est-à-dire assez fine mais ne prenant pas en compte les différences entre placettes proches. Enfin, le calcul de bilan hydrique par BILJOU fournit les mêmes résultats sur une zone plus grande mais prend en compte certains effets stationnels tout en donnant les caractéristiques apparemment les plus déterminantes d'une sécheresse. Il est donc difficile de dire si un effet est plus significatif qu'un autre quand leurs sources et modes d'élaboration sont différentes.

Le principal facteur ayant une influence sur la croissance radiale en 2003 par rapport à celle des quatre années précédentes est celui de la sécheresse édaphique. Le pourcentage de remplissage en eau du sol au mois de juin est le plus important. Il met également bien en évidence l'importance de ce mois au cours duquel la réserve en eau du sol a chuté partout en France de manière décalée selon les régions. La Méditerranée a cependant vu ses réserves se vider plus tôt, ce qui rend le mois de mai plus significatif dans cette région. Cette variable montre aussi l'importance de la date de début de sécheresse, calculable avec BILJOU et qui est l'autre variable climatique très significative. Or, comme elle ne peut pas s'appliquer à tous les arbres, on peut aussi se baser sur la durée de sécheresse par rapport au quatre années précédentes. Au niveau des données dendrométriques, une donnée arbre et une donnée peuplement sont explicatives de l'impact de la structure. Tout d'abord, le diamètre joue un rôle important, les petits bois étant beaucoup plus touchés en raison non pas de la compétition des houppiers mais de la profondeur d'enracinement, plus faible que pour les gros arbres. iReineke, qui représente la densité par rapport à la densité maximale possible pour le diamètre moyen du peuplement montre que le peuplement a aussi un rôle. Cet indice ne dépendant pas de la compétition entre les arbres d'un même iReineke, il s'agit d'un effet d'appauvrissement plus rapide des ressources pour tous les arbres de la placette. Cet effet n'est cependant pas visible dans le groupe des arbres à bois hétérogène. Les données stationnelles importantes complètent les mesures de variables sécheresse calculées par BILJOU qui ne tiennent pas compte de ces variables. Il s'agit des bilans d'écoulements, de l'exposition et de l'engorgement qui complète la problématique de l'enracinement plus ou moins profond des arbres. Enfin, au niveau des essences, celles-ci jouent un rôle, expliqué en grande partie par le type de couverts : les arbres sous couvert résineux sont plus disposés à souffrir de la sécheresse car ils se mettent à transpirer plus tôt dans l'année. Il reste ensuite des effets différents entre feuillu et résineux qui sont à mettre sur le compte des adaptations à la sécheresse mais également des limites de mesures de cernes ou bien des délais de réaction.

Les facteurs agissant sur la perte de croissance sont donc tous liés à la disponibilité de l'eau dans le sol pour l'arbre. On remarque de plus, que c'est l'eau des couches profondes du sol qui est déterminante

Les modèles donnent donc les R^2 et les probabilités d'erreur de type 3 suivantes :

<u>Arbres non méditerranéens</u> : $R^2=69,06$ %		<u>Arbres à bois hétérogène</u> : $R^2=69,24$ %	
	Probabilité		Probabilité
ir2_5brut*libelle	0	ir2_5brut*libelle	0
ratio_ru_juin	1.571E-161	ratio_ru_juin	4.401E-105
ratio_duree4	5.314E-31	ratio_duree4	1.5334E-33
D13	5.893E-53	D13	4.4792E-37
iReineke	1.1135E-10	bilantopo	.000000010
bilantopo	.000020611	hydromorphie	.004069577
classexpo	.000063391		
hydromorphie	.002422529		

Cependant, ces résultats ne présentent que la réaction de croissance de 2003. La baisse de croissance peut continuer dans les années suivantes ou se traduire par des dépérissements. Ceux dus uniquement à 2003 n'étaient pas encore visibles lors de la campagne de l'IFN mais ont pu, dans les années suivantes, être visibles et recensables. Cela permettrait ainsi de voir par exemple les arbres à bois hétérogènes qui n'ont pas fourni de cernes et qui sont morts par la suite.

La plus grosse incertitude reste donc la fiabilité du comptage et de la mesure des cernes manquants ou très fins. Toutefois, même si cela produit un biais sur certains arbres qui n'ont pas poussé en 2003, les résultats restent cohérents d'un groupe à l'autre ainsi que dans les interprétations. De toute façon, le comptage de cerne sur le terrain présente des limites pour tous les arbres en particulier lors d'années caractéristiques de croissance faible.

Ces modèles réalisés vont nous permettre à présent d'identifier les facteurs déterminants de différents tris d'arbres et d'expliquer l'influence de certains facteurs non écologiques.

4.3. Explication de différents facteurs par le modèle

4.3.1. Effet opérateur

Les relevés ont été faits par différents opérateurs et à différentes dates. Or, les méthodes changent probablement d'un opérateur à l'autre, ce qui pourrait influencer sur les résultats. C'est en effet le résultat qui apparaît quand on introduit l'auteur de la fiche au modèle. Celui-ci présente une probabilité d'erreur de type 3 de l'ordre de E-19 pour le modèle des arbres à bois hétérogène, c'est-à-dire qu'il est très explicatif du résultat.

Arbres à bois hétérogène

auteur	LSmean	variable	probabilité
P	1.52 mm	ir2_5brut*libelle	0
B	1.53 mm	ratio_ru_juin	1.447089E-57
X	1.54 mm	ratio_duree4	1.479457E-19
D	1.56 mm	D13	8.968121E-34
A	1.58 mm	bilantopo	3.3355674E-8
F	1.59 mm	hydromorphie	0.052884
C	1.64 mm	auteur	3.807334E-19
G	1.68 mm		
H	1.73 mm		
K	1.74 mm		
E	1.81 mm		
I	1.96 mm		

Ces LSmeans par auteur de fiche montrent que seuls deux auteurs se distinguent vraiment du groupe, I et E, présentant tous les deux des accroissements beaucoup plus importants que les autres. La suppression de ces deux auteurs ramène d'ailleurs la probabilité d'erreur de type 3 à E-5. Le remplissage des fiches de ces deux auteurs expliquent en grande partie l'influence de l'opérateur. Il est cependant difficile de déterminer la cause de ces différences. Il ne s'agit pas de leur présence sur des zones où la croissance a été plus forte à cause d'une des variables du modèle. De plus, leurs relevés ont été faits à différentes dates et dans différentes régions, ce qui supprime la possibilité d'un biais causé par la localisation géographique. Enfin, il ne s'agit pas non plus d'un relevé de données d'accroissement systématique car il n'y a pas plus de valeurs approchées ($ir5brut=4xir03brut$ comme on l'a vu pour le chêne vert) que chez les autres auteurs.

En revanche, la date de relevé a moins d'effet sur les résultats, sa probabilité s'élevant à E-4 quand elle est intégrée au modèle des arbres à bois hétérogène. On remarque cependant que la perte des arbres est plus importante en avril. Ce biais est peut être dû à la confusion entre le cerne de 2004 et celui de 2003.

4.3.2. Différence entre départements voisins

Dans son rapport, Verdier (2005a) avait constaté des pertes différentes entre départements proches. La différence importante entre la Creuse et la Haute Vienne a été expliquée dans les préliminaires de calcul par le fait que des arbres d'accroissement de 2003 égal à 0 avaient été systématiquement noté pour des placette de la Creuse relevé en mai 2004. Ceci créait un biais énorme qui a disparu, comme on l'a vu dans les estimations de la première partie.

En revanche, il avait découvert des pertes moins importantes en Seine et Marne par rapport aux départements voisins en réalisant des comparaisons essence par essence. Une comparaison pour ces départements dans une régression univariée pour tous les arbres révèle en effet une perte plus

faible par rapport à ses voisins (LSmean=2,20 mm contre 1,96 pour l'Aisne et 2,02 mm pour l'Île de France Ouest).

Ces résultats sont dus à une différence de durée de sécheresse, par rapport aux quatre années précédentes, celle-ci ayant été plus longue dans l'Aisne. Cette variable a un effet beaucoup plus important que ratio_ru_juin car cette dernière varie peu dans cette région. Elle est cependant complémentaire de ratio_duree4. Enfin, l'essence est également explicative de cette différence. En effet, l'Île de France Ouest et la Seine et Marne ont des compositions d'essence communes alors que l'Aisne présente des essences beaucoup plus sensibles à la sécheresse, à savoir l'épicéa, douglas, frêne, aulne, pin sylvestre (Tableau 25).

Dép.	BOU	CHA	CHT	CHP	CHS	DOU	EPI	FRE	AUL	HET	PIS
02	7 %	21 %	1 %	15 %	6 %	3 %	10 %	23 %	8 %	6 %	0 %
75	6 %	16 %	12 %	13 %	33 %	0 %	0 %	7 %	4 %	6 %	3 %
77	11 %	10 %	9 %	14 %	33 %	2 %	0 %	9 %	1 %	5 %	6 %

Tableau 25. : Constitution en essence majoritaire des arbres par départements de la région Nord en pourcentage (BOU : bouleau, CHA : charme, CHT : châtaignier, CHP : chêne pédonculé, CHS : Chêne sessile, DOU : douglas, EPI : épicéa, FRE : frêne, AUL : grand aulne, HET : hêtre, PIS : pin sylvestre).

Une régression avec ces trois variables suffit à expliquer la différence de perte entre ces départements (les LSmeans sont alors de 2,01 mm pour l'Aisne, 1,88 mm pour l'Île de France Ouest et 2,05 mm pour la Seine et Marne avec une probabilité d'erreur de type 3 pour le département de 0,095).

Il y a également des effets stationnels, notamment le bilan des écoulements et l'hydromorphie mais ils sont moindres comparativement à l'influence de la sécheresse.

4.3.3. « Rôle » du propriétaire

En apparence, les forêts privées sont moins touchées que les forêts publiques (domaniales ou communales) pour les arbres à bois hétérogène (probabilité de E-20) ou pour les arbres non méditerranéens (probabilité de E-8). Or, si cette classification est ajoutée au classement final, cette probabilité baisse jusqu'à E-4 dans les deux cas. Il reste donc un effet propriétaire mais celui-ci a beaucoup diminué. Ce sont donc certaines variables du modèle qui expliquent cet effet. Ainsi :

- les moyennes de ratio_ru_juin pour les placettes possédant des arbres à bois hétérogène sont différentes selon les propriétaires. Pour les forêts communales, la moyenne vaut 37,7 % contre 56,5 % pour les forêts domaniales et 66,7 % pour les forêts privées ;
- il en est de même pour ratio_duree4, sa moyenne étant de 2,9 pour les forêts domaniales, de 2,6 pour les forêts communales et de 2,1 pour les forêts privées. La différence de moyennes entre ces forêts est due à la répartition géographique, la quasi-totalité des forêts limousines étant, par exemple, privées. La relation entre ces deux variables et le propriétaire est donc uniquement une superposition géographique.

A sécheresse égale (ratio_ru_juin et ratio_duree4 inclus dans le modèle), on obtient ainsi le classement suivant :

Arbres à bois hétérogènes : augmentation du R ² de sans le propriétaire à 67,91 %			
	LSmean	variable	probabilité
forêt domaniale	1.62 mm	ir2_5brut	0
forêt communale	1.67 mm	ratio_ru_juin	2.975E-100
forêt privée	1.72 mm	ratio_duree4	5.3197E-29
		Propriétaire	0.0054893

Cependant, certaines variables du modèle sont liées au propriétaire sans pour autant en changer l'ordre des dégâts. Toutefois, retirer leur effet en les intégrant au modèle amplifie ou diminue l'effet du propriétaire. C'est le cas, toujours pour les arbres à bois hétérogène :

- du diamètre, les forêts domaniales présentant plus de gros bois qu'ailleurs (40 % contre 28 et 26 % des arbres de forêts communales et domaniales pour les bois hétérogène) ;
- de la position topographique, 53 % de la totalité des placettes de forêt domaniale étant situées sur un sol plat contre environ 32 % pour les autres propriétaires.
- la densité des peuplements, les forêts communales étant moins denses en comparant placette par placette pour l'échantillon des arbres non méditerranéens.
- la composition du peuplement, les propriétaires privés présentant plus de placettes au couvert résineux (24 % contre 11 % pour les forêts domaniales de région non méditerranéenne).

Les forêts privées sont donc moins épargnées qu'en apparence car elles se situent dans des zones où la sécheresse édaphique a été moins forte. Ensuite, les principaux facteurs pouvant amplifier la perte sont regroupés pour que la forêt privée soit plus touchée : diamètre moyen plus petit, densité plus forte et pourcentage de couvert résineux plus important. Seule sa présence sur des régions pentues l'épargne de l'influence des sols engorgés. Malgré cela, la forêt privée reste moins touchée que la forêt publique (la probabilité du modèle pour le propriétaire s'élève à E-5 pour la régression des arbres à bois hétérogène et à 0,017 pour les arbres non méditerranéens). Il y a donc encore une autre différence entre les différentes propriétés qui joue sur la perte.

4.3.4. Structure du peuplement

Dans le groupe des essences non méditerranéennes, utilisé ici pour avoir des essences composant majoritairement chaque structure (par exemple le charme pour le taillis), une régression à facteurs de sécheresse égaux montre que la futaie de taillis sous futaie est beaucoup moins touchée que les autres structures :

Arbre non méditerranéen (augmentation du R² de 67,2 à 67,3 %)

	LSmean	variable	probabilité
taillis de TSF	1.71 mm	ir2_5brut	0
futaie régulière	1.73 mm	ratio_ru_juin	3.2833E-186
taillis simple	1.74 mm	ratio_duree4	3.35892E-27
futaie de TSF	1.88 mm	structure	3.35675E-13

De plus, une intégration de la structure au modèle final montre une absence de significativité de l'effet de cette variable. On étudie donc les interactions entre les variables du modèle et la structure pour expliquer l'effet de celle-ci. Une régression réalisée pour chaque structure (Tableau 26), à l'exception de la futaie irrégulière dont les effectifs sont trop faibles, permettent de constater que les facteurs ayant une influence sur la perte de croissance sont différents pour chaque structure (les brins de futaie du taillis simple ont été supprimés, TSF signifie taillis sous futaie). Ainsi :

- Les indices de sécheresse restent toujours déterminants, mais c'est principalement ratio_ru_juin qui explique les différences de perte. Les caractéristiques de la sécheresse sont moins importantes pour le taillis simple que pour d'autres structures.
- Le diamètre est un effet discriminant surtout pour les arbres de futaie régulière et les taillis de TSF. Pour les brins de taillis simple et les arbres de TSF, le diamètre a un rôle mais assez faible, voire inexistant pour la futaie de TSF. Cela s'explique chez le taillis par l'homogénéité des brins dans le petit diamètre. Pour les futaies de TSF, au contraire, l'influence du diamètre est faible car il y a peu de petit bois (19 %) ;
- iReineke a de l'influence uniquement pour la futaie régulière et le taillis de TSF ;

- Le bilan des écoulements a surtout un effet pour les taillis de TSF ou de taillis simple. En effet, ces arbres, composés surtout de petit bois, sont plus sensibles à l'apport des écoulements que des brins plus gros, leur enracinement étant plus faible ;
- L'exposition, à l'exception du taillis simple, reste importante pour chaque type de structure.

	Futaie régulière	Futaie de TSF	Taillis de TSF	Taillis simple
ir2_5brut*essence	0	0	0	E-183
Ratio_ru_juin	E-52	E-75	E-28	E-6
Ratio_duree4	0,56	E-16	0,098	0,19
D13	0,12	E-40	E-14	E-4
iReineke	0,036	E-10	E-5	0,24
Bilantopo	0,019	0,059	E-4	E-5
Exposition	0,0012	E-4	0,28	E-6
Hydromorphie	0,93	0,057	0,98	0,16

Tableau 26. : Résultats des régressions du modèle pour les arbres non méditerranéens pour les différentes structures du peuplement

Dans les régressions univariées, le couvert que faisait la futaie sur le taillis du TSF avait aussi de l'importance mais celle-ci intégrée à ce modèle ne se révèle plus explicative et surtout, d'après les LSmeans, ne présente pas de suite logique dans la valeur du recouvrement.

Les différentes structures ne sont pas dépendantes des mêmes facteurs. La futaie régulière est la structure pour laquelle les facteurs du modèle ont le plus d'influence car elle présente, par rapport aux trois autres structures, une plus grande diversité entre les arbres au sein d'une placette mais aussi entre les placettes. Enfin, la futaie de TSF est la structure qui souffre le moins de la sécheresse en raison de sa composition en gros diamètre dominant le taillis qui l'accompagne dans l'accès à l'eau. De plus, les principales essences qui la composent sont les deux essences les moins touchés par la sécheresse : le chêne pédonculé à 29 % et le chêne sessile à 37 %.

5. Conclusion et discussion

5.1. Résultats finaux

Cette étude a permis, en plus d'élaborer une formule d'estimation de perte prenant en compte la dynamique de croissance des arbres, d'étudier la pertinence de ces relevés extraordinaires de 2003. L'attention a été portée en particulier sur deux points : (i) la lecture des cernes, la plupart des essences présentant des difficultés potentielles d'identification, particulièrement pour le chêne vert, et (ii) la nécessité de prendre en compte la dynamique de croissance en fonction de l'âge des arbres lors des calculs de perte de croissance.

L'élaboration d'estimations de perte par rapport à une croissance hypothétique de 2003 a été calculée de deux manières, (i) en réalisant la moyenne des accroissements des années précédentes et (ii) en prenant en compte la dynamique de croissance de chaque individu par interpolation linéaire. Si la deuxième valeur est plus proche de la perte par rapport à l'accroissement qu'auraient eu les individus si le climat avait été le même que les années précédentes, ces deux estimations permettent d'encadrer assez précisément la perte réelle. Ainsi, cette perte des départements inventoriés, à l'exception des Bouches-du-Rhône et de la Haute-Corse, pour les arbres encore vivants à la fin de 2003 est donc comprise entre 20,3 et 22,7 % pour la croissance radiale, et entre 15,2 et 20,4 % pour l'accroissement en surface terrière. Cette perte est maximale dans le département de Saône-et-Loire avec une perte de croissance radiale comprise entre 27,9 et 33,2 %, et minimale en Haute-Vienne où elle est comprise entre 5,9 et 8,7 %.

Cette étude a également mis en lumière les principaux facteurs déclenchant une perte de croissance ou y exposant davantage les arbres. La grande majorité de ces variables ramène en réalité à l'accès à l'eau du sol au cours de cette sécheresse édaphique. Les facteurs climatiques discriminant ne sont en effet ni les températures, ni directement les précipitations, ni le déficit pluviométrique mais bien le remplissage en eau du sol, qui a un sens écologique beaucoup plus important. Il permet en effet le fonctionnement hydrique de l'arbre et indirectement par la régulation stomatique. L'élément explicatif majeur de la sécheresse est le moment où celle-ci a commencé, c'est-à-dire où la réserve en eau du sol est descendue en dessous de 40 % de la réserve utile. Une étude sur certains arbres montre bien l'importance primordiale de la date de début de sécheresse. Cependant, pour pouvoir prendre en compte tous les arbres, d'autres variables se rapportant à cette date d'entrée ont été sélectionnées : la durée de la sécheresse et le pourcentage de remplissage du sol au mois de juin, ou mai selon les régions. Le premier est moins bon que la date de début car il dépend aussi de la date de fin après laquelle une reprise est plus faible voire inexistante. Quant au deuxième, il se rapporte indirectement à la date d'entrée car l'état de remplissage des sols au 1^{er} juin était très varié et présageait le moment où la sécheresse hydrique allait commencer. Entre ces deux variables, les principales différences viennent du jeu de données, le remplissage du sol ayant une description géographique plus fine alors que la durée, issue du programme de l'INRA BILJOU, a une échelle plus grossière mais prend en compte les données de placettes qui jouent un rôle sur le flux hydrique et le remplissage de la réserve utile.

C'est justement ce fonctionnement hydrique et cette évolution de la réserve qui est au centre des autres variables explicatives de la perte de croissance :

- les petits diamètres sont plus touchés que les gros en raison de leur enracinement moins profond, leur accès aux dernières réserves en eau est limité et la sécheresse édaphique commence plus tôt pour eux ;
- deux groupes importants se constituent parmi les essences selon les dégâts qu'elles ont subi : les résineux et les feuillus. Les premiers transpirants plus tôt dans l'année, la réserve du sol est épuisée avant les placettes constituées majoritairement de feuillues et ces espèces sont plus touchées ;
- la présence sur des zones topographiques à arrivée d'eau importante comme des bas de versants ou des vallons permet à la placette, par des apports latéraux, de maintenir le niveau d'eau du sol suffisamment longtemps pour retarder l'entrée dans la sécheresse édaphique par rapport aux placettes situées sur des zones de bilan d'apport d'eau latéraux négatif ;
- les placettes exposées au Sud et à l'Est subissant une évapotranspiration plus importante, les réserves en eau s'épuisent plus rapidement que sur les placettes exposées à l'Ouest ou au Nord ;
- enfin, les terrains plats sont plus touchés que les placettes en pente car l'absence d'écoulements latéraux peut provoquer de l'engorgement temporaire en hiver, celui-ci empêchant une progression des racines en profondeur et limitant l'accès à l'eau de ces arbres en été, lors de la sécheresse.

Ainsi, si les données climatiques de sécheresse donnent une explication pour des placettes et des arbres aux caractéristiques moyennées, les autres facteurs du modèle affinent la situation de chaque individu dans son accès à l'eau du sol lors de la sécheresse de 2003.

Ces variables à effet significatif permettent d'expliquer les différents dégâts selon les regroupements d'arbres possibles. Par exemple, la futaie de taillis-sous-futaie est moins touchée car les arbres qui la composent ont des gros diamètres et sont peu nombreux à pouvoir accéder aux réserves profondes. Il s'agit de plus majoritairement d'essence parmi les moins vulnérables : le chêne sessile et le chêne pédonculé. Ou encore, la différence importante de dégâts entre deux départements proches, la Seine-et-Marne et l'Aisne est due à la différence de durée de la sécheresse et à la composition en essence, l'Aisne comptant plus d'épicéa et de frêne, plus touchés, et moins de chêne sessile que son voisin.

5.2. *Avantage de ces résultats par rapport aux autres études*

Cette étude concerne un sujet qui a déjà été très étudié. Les évaluations de pertes sont assez variées d'un auteur ou d'une situation à l'autre. Cependant, la plupart se base sur un nombre assez réduits de points et compare la croissance de 2003 avec celle des années précédentes. Or, l'étude nous a montré l'importance que peut jouer la prise en compte de l'âge de l'arbre, même si l'accroissement présente certaines limites. Une nouvelle référence de l'accroissement prenant en compte cet effet a pu être créé. De plus, ces deux références se sont révélées complémentaires puisqu'elles non pas une valeur discutable avec de nombreux biais mais un intervalle contenant la perte réelle. Cet intervalle s'est de plus révélé à plusieurs reprises assez précis pour des quantités d'arbres importantes mais aussi parfois pour des effectifs plus faibles. De plus, il a permis de s'affranchir du problème des compromis engendré par le choix d'une référence ou de l'autre. Enfin, la diversité spatiale qui est associée à cette importante base de données permet d'étendre les résultats à l'ensemble du territoire français pour avoir une idée assez raisonnable des dégâts engendrés par la sécheresse sur le pays, d'autant plus que toutes les intensités de sécheresse sont représentées.

Ensuite, les nombreux relevés de l'IFN donnent accès à une grande quantité de données, sur une grande surface et avec une description détaillée de l'environnement et des arbres. Ceci permet, en plus d'améliorer la qualité statistique des résultats, d'avoir un champ de vision large de tout ce qui pourrait avoir une influence sur la perte de croissance et de réaliser une liste assez précises de tous les facteurs jouant un rôle, ce qui n'avait pas encore été fait. De plus, les effets de ces nombreux facteurs étant liés, les effets apparents de certaines variables ont pu être expliqués par leurs interactions avec d'autres variables. Enfin, cette base de données a permis d'examiner facilement des détails sur certains arbres, leur nombre restant assez souvent conséquent. L'effet de certaines variables peut ainsi être confirmé en l'étudiant au niveau d'un groupe d'arbre homogène.

5.3. Les limites de l'étude et des mesures

5.3.1. Limites de l'étude

Cependant, certaines limites se sont révélées tout au long de cette étude. Tout d'abord, comme il a déjà été dit, les problèmes de distinction des cerne, situé au centre même de l'étude. Mais il y a aussi, dans les problèmes liés à la récolte de données, notamment le biais créé par l'observateur. L'accès à une importante masse de données telle que celle de l'IFN nécessite le travail de plusieurs équipes qui ne travaillent pas forcément exactement de la même manière, ou traitent différemment certains problèmes malgré le Manuel du chef d'équipe qui décrit en détail le protocole précis pour chaque cas particulier. Des précautions sont prises par l'IFN pour répondre à ces problèmes, notamment les opérations de contrôle et de vérifications des données. Toutefois, il reste un biais dû à chaque rédacteur de fiche, dont certains peuvent être conséquent. Un des points pouvant dépendre fortement du rédacteur et qui n'est pas négligeable pour cette étude est le repérage des arbres morts, surtout dans une campagne comme 2004.

Ensuite, au niveau du traitement des données, notamment pour l'estimation de la perte, il reste encore de certaines sources d'imprécisions. Tout d'abord, pour l'estimation de la perte à partir uniquement des arbres vifs, il reste un certain nombre de biais qui peuvent modifier fortement les bornes de l'intervalle d'estimation de la perte de croissance. De plus, les mesures d'accroissement disponibles nous ont empêché de choisir de meilleures périodes de référence. La méthode peut être en effet améliorée en utilisant la tendance à long terme de longueur de cerne mais cela nécessite un comptage cerne par cerne, ce qui devient très délicat dans une récolte de données massives comme à l'IFN. Enfin, la zone couverte par les placettes reste assez ponctuelle. L'extrapolation à la perte des forêts françaises reste limitée. Si cette opération est refaite avec la nouvelle méthode, les conclusions au niveau français seront plus justifiées.

Enfin, la précision de certaines valeurs s'est parfois révélée limitée. Par exemple, les données issues du programme BILJOU sont disponibles pour des groupes de placettes en raison de la limite d'utilisation de ce programme qui nécessite un fichier texte par placette ou groupe de placette. De même, certaines variables ne sont pas disponibles ou calculables dans certains cas, ce qui empêche de les utiliser. C'est le cas de la date de début de sécheresse, très explicative mais qui ne peut être prise en compte que pour les placettes dont le pourcentage de remplissage en eau du sol est descendu sous les 40 %. Enfin, la surface d'étude étant grande et les structures variées, les facteurs discriminants peuvent être différents d'une région ou d'un peuplement à l'autre. C'est le cas du remplissage du sol pour différents mois d'une région à l'autre. Celui pour le mois de juin est discriminant au niveau du pays mais au niveau régional, c'est celui du mois de mai qui est important en Méditerranée. De même, on parle de l'importance du diamètre mais si un arbre est un brin de futaie de taillis sous futaie, le diamètre a peu d'importance.

5.3.2. Amélioration des mesures possibles

La prise de ces données de mesures de cernes de 2003 a été faite de manière expérimentale par rapport aux autres années. Cette étude a été aussi l'occasion de vérifier si de telles mesures peuvent être fiables ou non.

Les problèmes que l'on peut rencontrer sont les mêmes que pour la mesure d'ir5 et ir10 : certaines essences présentent des cernes plus facilement identifiables que d'autres ou peuvent présenter des particularités rendant ces mesures difficiles (faux cernes, cernes manquant). Ce risque récurrent pousse d'ailleurs d'INRA à étudier les carottes en laboratoire en les comparant avec des séries de références. Ces mesures restent à considérer avec prudence, surtout que ces mesures du dernier cerne sont souvent arrondis ou calculées à partir des mesures des cinq ou dix derniers cernes si la lecture en est trop difficile.

Les mesures présentent donc un certain nombre d'inconvénients surtout quand on se place dans une optique de recherche. En effet, les mesures de l'IFN n'ont pas un but de recherche mais de quantification des accroissements de la forêt française.

5.4. Perspectives

Cette étude a mis en lumière une estimation de la perte globale de croissance suite à la sécheresse de 2003 inférieure à celle qu'on attendait et a confirmé l'importance de l'accès à l'eau au cours de sécheresses intenses et longues. Cette perte, non négligeable, donne une perspective de l'impact que pourrait avoir la répétition de ces événements extrêmes. Mais ces répétitions peuvent entraîner des conséquences pires qu'une simple perte de croissance arrivant régulièrement. En effet, cette étude ne montre que l'effet sur la croissance au cours de l'année 2003 mais celui-ci s'accompagne aussi de dépérissement important au cours des années suivantes ainsi que des difficultés pour certaines espèces à reprendre une croissance normale. Cette étude ne présente que les premières réactions de la forêt française et peut être enrichi par des études de l'impact sur les années suivantes en étudiant la relation de celui-ci avec les effets de la sécheresse de 2003 mais aussi les événements aggravants intervenus entre temps ou la capacité des stations à relancer la croissance de ses arbres.

Bibliographie

- BADEAU V. — 1995 — *Etude dendrochronologique du Hêtre (Fagus sylvatica) sur les plateaux calcaires de Lorraine : influence de la gestion sylvicole* — Nancy : Université Nancy I Henri Poincaré — 222 p. (Thèse de doctorat).
- BAIZE D., JABIOL B. — 1995 — *Guide pour la description des sols* — Paris : Institut national de Recherche agronomique — 375 p.
- BREDA N., GRANIER A. et al. — 2004 — *La sécheresse de 2003 dans le contexte des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers* — Revue Forestière Française, vol. LVI, n° 2, p. 109-131.
- BREDA N. — 1994 — *Analyse du fonctionnement hydrique des chênes sessiles (Quercus petraea) et pédonculé (Quercus robur) en conditions naturelles : effet des facteurs du milieu et de l'éclaircie* — Nancy : Université Nancy I Henri Poincaré — 59 p. (Thèse de doctorat).
- BREDA N., GRANIER et al. — 1995 — *Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (Quercus petraea (Matt.) Liebl.)* — Tree Physiology, vol. 15, p. 295-306.
- CHEVROU R. B. — 1975 — *Estimation de la surface terrière d'un arbre* — Revue Forestière Française, vol. XVII, n° 2, p. 75.
- CIAIS P., REICHSTEIN M. — 2005 — *Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003* — Nature, vol. 437, p. 529-534.
- FRITTS H. C. — 1976 — *Tree Rings and climate* — Academic Press London — 576 p.
- GRAF PANNATIER E., DOBBERTIN M. et al. — 2007 — *Effects of the drought 2003 on forests in Swiss Level II plots* — Symposium: Forests in a Changing Environment - Results of 20 years ICP Forests Monitoring, Göttingen, 25.-28.10.2006, pp. 128 – 135.
- GRANIER A., BREDA N. et al. — 1999 — *A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands* — Ecol. Model. n° 116 269-283.
- GRANIER A., LOUSTAU D. et al. — 2000 — *A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index* — Annals of Forest Science, vol. 57 p. 755–765.
- GRANIER A., BADEAU V., BREDA N. — 1995 — *Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers* — Revue Forestière Française, vol. XLVII, n° spécial « modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois, p. 59-68.
- INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL — 1985 — *But et méthodes* — nb pages
- INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL — 2003 — *But et méthodes* — nb pages
- INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL — 1994 — *Manuel du chef d'équipe* — nb pages.
- INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL — *Analyse fonctionnelle détaillée* — nb pages.
- INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL — 1990 — *Justificatif des choix de la période de calcul de l'accroissement courant moyen des peuplements forestiers par l'IFN (5 ans)* — 4 p.
- JOLLY W. M., DOBBERTIN M. et al. — 2005 — *Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps* — Geophysical Research Letters, vol. 32, L18409.

LANDMANN G., BREDA N. et al. — 2003 — *Sécheresse et canicule de l'été 2003 : Quelles conséquences pour les forêts françaises ?* — Revue Forestière Française, vol. LV, no 4, p. 299-308.

LEBOURGEOIS F. — 1997 — *Etude dendrochronologique des 102 peuplements du réseau* — Nancy : RENECOFOR, ONF, INRA — 307 p.

LEBOURGEOIS F., BREDA, N. et al. — 2005 — *Climate-tree-growth relationship of European beech (Fagus sylvatica L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR)* — Trees, vol. 19, n° 4, 2, p. 385-401.

LEBOURGEOIS F., DIFFERT J. — 2002 — *Premières observations phénologiques des peuplements du réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers (RENECOFOR)* — Revue Forestière Française, vol. LIV, p. 407-418.

LEBOURGEOIS F. — 2006 — *Réponse au climat du Sapin (Abies alba Mill.) et de l'Epicéa (Picea abies (L.) Karst.) dans le réseau RENECOFOR* — Revue Forestière Française, vol. LVIII, no 5, p. 419-430.

OFFICE INTERNATIONAL DE L'EAU — 2003 — *Bulletin de situation hydrologique du Réseau national des Données sur l'eau* — www.eaufrance.fr.

PICHLER, OBERHUBER et al. — 2007 — *Radial growth response of coniferous forest trees in an inner Alpine environment to heat-wave in 2003* — Forest ecology and management, n° 242, p. 688-699.

PREVOSTO, B. — 2006 — *Les indices de compétition en foresterie : exemples d'utilisation, intérêts et limites* — Revue Forestière Française, vol. LVII, n° 5, p. 413-430.

REBETEZ M., MAYER H. et al. — 2006 — *Heat and drought 2003 in Europe : a climate synthesis* — Annals of Forest Sciences, n° 63, p. 569-577.

SCHWEINGRUBER F. H. — 1988 — *Tree Rings, Basics and applications of Dendrochronology* — Kluwer Academic Publishing, Dordrecht. — 276 p.

SCHWEINGRUBER F. H. — 1990 — *Anatomy of european wood* — Paul Haupt, Bern and Stuttgart Publishers, Stuttgart, Germany — 800 p.

VAN DER WERF G. W., SASS-KLAASSEN G. W. et al. — 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.

VERDIER F., COLIN A. et al. — 2005a — *La croissance radiale des arbres en 2003 – Mesure par l'IFN Méthode et résultats préliminaires* — Nogent sur Vernisson — 10 p.

VERDIER F. — 2005 — *Mesure de l'accroissement radial 2003* — Nogent sur Vernisson — 37 p.

VIOVY , CIAIS P. — 2005 — *L'apport combiné des mesures de flux, des données de télédétection et de la simulation des simulation pour l'évaluation de la baisse de la productivité primaire* — présentation au forum ECOFOR, décembre 2005 — 15 diapositives.

Liste des contacts

➤ *Maitre de stage :*

Jean Luc Dupouey — Directeur de recherche — Responsable de l'équipe INRA de Phytoécologie Forestière

UMR Ecologie et Ecophysiologie Forestières
INRA centre de Nancy — 54280 CHAMPENOUX
03 83 39 40 49
dupouey@nancy.inra.fr

Marie Lecocq — Chef d'échelon

IFN échelon Nancy — 14 rue Girardet
CS 4216 — 54042 NANCY Cedex
03 83 30 99 30
marie.lecocq@ifn.fr

➤ *IFN :*

Jean Marie Derrière — Contrôleur

IFN échelon Nancy — 14 rue Girardet
CS 4216 — 54042 NANCY Cedex
06 72 96 13 00

Jacques Drapier

IFN échelon Nancy — 14 rue Girardet
CS 4216 — 54042 NANCY Cedex
03 83 30 99 27

François Morneau

IFN Château des Barres
45290 NOGENT SUR VERNISSON
02 38 28 02 95
francois.morneau@ifn.fr

Raymonde Virion — Adjointe chef d'échelon

IFN échelon Nancy — 14 rue Girardet
CS 4216 — 54042 NANCY Cedex
Raymonde.virion@ifn.fr

➤ *INRA :*

Bernard Baculat — coordinateur de la base de données Agroclim

US1116 Agroclim — INRA Domaine Saint Paul – Site Agroparc
84914 AVIGNON Cedex 9
04 32 72 23 68
Bernard.Baculat@avignon.inra.fr

Vincent Badeau — Ingénieur de recherches
UMR Ecologie et Ecophysiologie Forestières
INRA centre de Nancy — 54280 CHAMPENOUX
03 83 39 41 29
vincent.badeau@nancy.inra.fr

Nathalie Breda — Directrice de recherche
UMR Ecologie et Ecophysiologie Forestières
INRA centre de Nancy — 54280 CHAMPENOUX
03 83 39 40 48
breda@inra.nancy.fr

Yves Lefevre — Ingénieurs d'études
UMR Ecologie et Ecophysiologie Forestières
INRA centre de Nancy — 54280 CHAMPENOUX
03 83 39 40 83
lefevre@nancy.inra.fr

Myriam Legay
UMR Ecologie et Ecophysiologie Forestières
INRA centre de Nancy — 54280 CHAMPENOUX
03.83.39.40.51
legay@nancy.inra.fr

➤ ***Département santé des forêts (DSF) :***

Louis Michel Nageleisen — Responsable de l'antenne du DSF de Champenoux
INRA centre de Nancy — 54280 CHAMPENOUX
03 83 39 40 72
nageleisen.dsf@wanadoo.fr

➤ ***Agroparistech - Formation d'Ingénieur Forestier (FIF) :***

François Lebourgeois
UMR Etude des Ressources Forêt Bois
14, rue Girardet – CS 14216
54042 Nancy Cedex
03 83 39 68 74
francois.lebourgeois@agroparistech.fr

Table des annexes

Annexe 1 : Les données récoltés et calculées par l'IFN pour chaque arbre et placette.....	70
Annexe 2 : Description des statuts particuliers des arbres des les données IFN.....	73
Annexe 3 : Comparaison des résultats de Verdier (2005a) avec les encadrements des pertes réalisés par essence et par départements pour les groupes suffisamment important.....	74
Annexe 4 : Les valeurs utilisées pour les calculs de BILJOU.....	76
Annexe 5 : Résultats des régressions univariées ($ir03brut = f(ir2_5brut ; \text{variable})$ sous différentes combinaisons) des variables climatiques, dendrométriques et environnementales pour tous les individus vivants lors de l'inventaire (à l'exception des données de mai 2004 de la Creuse)	78
Annexe 6 : L'anatomie du bois de certaines essences, observées au microscope électronique à balayage (source : Schweingruber, 1990).....	85
Annexe 7 : Description des caractères du modèle pour les arbres en fonction de leur essence à partir de boîtes à moustache.....	87

Annexe 1. : les données récoltés et calculées par l'IFN pour chaque arbre et placette

Liste des fichiers et données fournies

Mesure du cerne 2003 (Fichier IR2003.txt)

- CPP : identifiant unique du point d'inventaire ou de la placette
- ESS : code de l'essence (voir fichier "Code_Essence_ir2003.xls" pour la codification)
- SSU : sous-unité dans laquelle se trouve l'essence
- NUM : n° de l'arbre sur le point d'inventaire
- MESURE : largeur du cerne en mm (mesurée à la loupe micrométrique au 1/10 de mm près).

Caractéristiques des arbres mesurés sur le point d'inventaire (Fichier IR2003_arbred.txt)

- ESS : Essence de l'arbre
- SSU : Strate (ou sous-unité) du peuplement dans laquelle se trouve l'essence en question
- NUM : n° de l'arbre dans la placette (arbre effectivement mesuré)
- DOM : type d'arbre, code synthétique prenant en compte l'origine, le statut social, la forme et la taille du houppier de l'arbre
- HSBR : Hauteur de tronc sans branches
- AGE : Age de l'arbre (lecture sur carotte à cœur)
- C0 : Circonférence à la base de l'arbre (10 cm au-dessus du sol)
- C13 : Circonférence à 1,30 m
- HTOT : Hauteur totale de l'arbre
- EC : Épaisseur d'écorce à 1,30 m
- IR5 : Accroissement radial des 5 dernières années mesuré à 1,30 m sur carotte (année en cours exclue)
- IR10 : Accroissement radial des 10 dernières années mesuré à 1,30 m sur carotte (année en cours exclue)
- NCERN : Nombre de cernes pris en compte dans la lecture de IRN
- IRN : Accroissement des n dernières années (si n < 5)
- L5 : Accroissement en hauteur des 5 dernières années (estimation)
- VTOT : Volume total de l'arbre, rebut exclu (volume bois fort tige)
- ACCROI : Accroissement annuel de l'arbre en volume
- POND : Coefficient de pondération qui peut prendre 3 valeurs selon la classe de dimension de l'arbre relation avec la taille variable des placettes
- RENUM : n° unique d'arbre
- A : n° unique d'arbre
- REP : facteur de répétition de l'arbre

Caractéristiques dendrométriques du point d'inventaire (Fichier IR2003_placeted.txt)

- REGD2 : Région forestière départementale
- SX2 : Surface d'extension (poids du point)
- CONS : Indicateur du couvert absolu du peuplement prenant en compte le couvert absolu libre (arbres recensables)
- EVO : Changements en cours ou survenus dans le peuplement
- CFUT : Importance de la réserve (taux de couvert libre relatif de la futaie) dans les mélanges futaie taillis
- REGEPO : Régénération du point
- COMP3 : Composition spécifique du peuplement
- CPE : Nature de coupe (ou accident)
- DC : Détail concernant la coupe (le cas échéant)
- ESSPRE : code de l'essence principale
- ESSPRET : code de l'essence principale du taillis dans le cas des mélanges futaie-taillis
- HDOM : hauteur dominante de l'essence principale ; hauteur moyenne des 3 à 7 plus grands arbres l'essence ppale de la placette de 20 ares)
- AGEDOM : Age moyen de l'essence principale (moyenne des âges des arbres qui ont servis à calcul HDOM)
- PRON : Catégorie de propriété (nomenclature nationale)

- REGN : Région forestière nationale
- SFO : Structure forestière (nomenclature départementale)
- SFON : Structure forestière (nomenclature nationale)
- DIST : Distance planimétrique entre le point et la plus proche route accessible aux grumiers en supposant créée une piste éventuellement nécessaire
- PORTN : Portance estimée du sol au niveau du point
- ACCES : Estimation au sol de la nécessité de création de piste pour l'exploitation

Caractéristiques dendrométriques du point d'inventaire par essence et par strate de peuplement (Fichier IR2003_C0.txt)

- ESS : Essence de l'arbre
- SSU : Strate (ou sous-unité) dans laquelle se trouve l'essence en question
- PREP : Prépondérance de l'essence dans la sous-unité
- REGENESS : Présence de brins d'avenir de l'essence dans la strate sur la placette de 20 ares, exprimée en 1/10 de l'ensemble de la régénération d'avenir.
- AGECOD : Code de l'âge mesuré de l'essence par strate (SSU) si peuplement équiennne, sinon mesuré ou estimé sur les arbres de cette essence
- CAM : Classe d'âge mesuré du sous-peuplement lorsque celui-ci est équiennne (à utiliser lorsque HOMO = H)
- CAE : Classe d'âge estimé du sous-peuplement lorsque celui-ci est inéquiennne (à utiliser lorsque HOMO = N)
- HOMO : Homogénéité des âges dans le peuplement (H = homogène, N = non homogène)
- VF : Volume moyen par hectare des arbres de futaie et des arbres têtards pour l'essence et la sous-unité données (m³/ha).
- DVF : Accroissement courant en volume des arbres de futaie et des arbres têtards pour l'essence et la sous-unité données (m³/ha/an)
- PFF : Volume des arbres de futaie et des arbres têtards devenant recensable par hectare et par an (m³/ha/an)
- VT : Volume moyen par hectare des arbres de taillis pour l'essence et dans la sous-unité données (m³/ha).
- DVT : Accroissement courant en volume des arbres de taillis pour l'essence et la sous-unité données (m³/ha/an)
- PFT : Volume des arbres de taillis devenant recensable par hectare et par an (m³/ha/an)
- VEF : Volume des arbres de futaie et des arbres têtards coupé par ha et par an (m³/ha/an).
- DVEF : Accroissement de chablis coupé de futaie/ha/an (m³/ha/an)
- VET : Volume des arbres de taillis coupé par ha et par an (m³/ha/an).
- DVET : Accroissement de chablis coupé de taillis/ha/an (m³/ha/an)
- VOLMORT : Mortalité annuelle (m³/ha/an) estimée d'après le volume des arbres morts de moins de 5 ans et celui des chablis anciens (> 2 ans) non datés ni coupés lors de l'inventaire,
- CHF : Volume annuel et par ha de chablis d'arbre de futaie ou têtard ni coupé ni daté (m³/ha/an).
- CHEXNCF : Volume annuel et par ha de chablis extraordinaire (événement daté) d'arbre de futaie ou têtard non coupé (m³/ha/an).
- ACEF : Accroissement de chablis non daté coupé de futaie/ha/an (m³/ha/an)
- CHT : Volume annuel et par ha de chablis d'arbre de taillis ni coupé ni daté (m³/ha/an).
- CHEXNCT : Volume annuel et par ha de chablis extraordinaire (événement daté) d'arbre de taillis non coupé (m³/ha/an).
- ACET : Accroissement de chablis non daté coupé de taillis/ha/an (m³/ha/an)
- GHA : Surface terrière par sous-unité et essence (en m²/ha).
- GA : Surface terrière de l'arbre moyen (en m²) pour l'essence et la sous-unité données.
- ACG : Accroissement en surface terrière (m²/ha/an)
- NTIGHA : Nombre de tiges recensables à l'hectare
- HM : Hauteur de l'arbre de surface terrière moyenne (m)

Caractéristiques écologiques du point d'inventaire (Fichier IR2003_placettee.txt)

- OBSERV : indicateur des conditions de réalisation du relevé
- ALTI : Altitude
- EXPO : Exposition
- PENT2 : Pente (plus grande pente)
- TOPO : Position topographique

- MASQUE : masque opposé mesuré au clisimètre en visant le faite du versant opposé à la pente de la placette
- RAYO : Indice de rayonnement
- LIGN1 : couvert des ligneux bas (<ou= 2m)
- LIGN2 : couvert des ligneux hauts (> 2m)
- HERB : couvert des herbacées
- ROCHE : Roche-mère
- AFFROC : Indice d'affleurement rocheux
- CAILLOUX : Indice de graviers et cailloux
- TEXT1 : Texture de l'horizon supérieur
- TEXT2 : Texture de l'horizon inférieur
- PROF1 : Profondeur de l'horizon supérieur
- PROF2 : Profondeur de sondage
- PCALC : Profondeur d'apparition du CaCO3
- POX : Profondeur d'apparition de tâches d'oxydation
- PPSEUDO : Profondeur d'apparition du pseudogley
- PGLEY : Profondeur d'apparition du gley
- RESERUTILE : Indice de réserve utile en eau du sol
- HUMUS : Type d'humus
- TSOL : Type de sol
- OBSTOPO : indicateur des conditions d'observations des données topographiques
- OBSPEDO : indicateur des conditions d'observations des données pédologiques
- OBSVEGET : indicateur des conditions d'observations des données floristiques
- DATECO : date du relevé (mois et année)

Liste des taxons observés sur le point d'inventaire (Fichier IR2003_flore.txt)

- CPP : identifiant unique du point d'inventaire ou de la placette
- DEP : n° du département
- CYC : cycle d'inventaire
- CODESP : code du taxon (espèce, genre, ...), voir fichier "DOC_ESPECES2.xls" pour la codification
- ABOND : note de recouvrement de l'espèce dans le relevé, toutes strates verticales confondues

Localisation (Fichier IR2003_xy.txt)

- CPP : identifiant unique du point d'inventaire ou de la placette
- DEP : n° du département
- CYC : cycle d'inventaire
- XL2 et YL2 : coordonnées du point d'inventaire en Lambert 2 étendu2.

Annexe 2. : Descriptions des statuts particuliers des arbres dans les données

IFN

CalcVolacc.xls

Tableau résumé du mode de calcul des volumes et des accroissements à l'hectare dans la table Dendro..C0, selon le type d'arbre :

Nature des arbres	Date ou coupe	Code DOM (selon DOMG0)	Classe de type-arbre	VOLUME (Coefficient *)		ACCROISSEMENT (Coefficient *)	
				FUTAIE	TAILLIS	FUTAIE	TAILLIS
Arbres vifs		Codes 0 à 6	Futaie Taillis	VF (1) VT (1)	DVF (1)	DVT (1)	
Arbres morts		Code 7		VOLMORT (0.2)			10,5
Souches normales (arbres coupés), dont chablis non datés, mais coupés	coupé	Code 8	Futaie	VEF (0.2)		DVEF (0.5) → 12,5000	
	coupé	Code 9	Taillis		VET (0.2)		DVET (0.5)
Chablis non datés (précisément) et non coupés, mais de plage de date (**) définie	récent	Code A	Futaie	CHF (0.5)		ACEF (0.8) → 16	
	ancien	Code B	Futaie	VOLMORT (0.33)		DVEF (0.3) → 11,2000	ACET (0.8)
	récent	Code C	Taillis		CHT (0.5)		DVET (0.3)
	ancien	Code D	Taillis		VOLMORT (0.33)		
Chablis datés précisément (dits "exceptionnels"), tous jours considérés comme "récents"	non coupé	Code J	Futaie	CHEXNCF (1)		DVEF (0.8) → 16	
	coupé	Code K	Futaie	VEF (0.5)		DVEF (0.8)	DVET (0.8)
	non coupé	Code L	Taillis		CHEXNCT (1)		DVET (0.8)
	coupé	Code M	Taillis		VET (0.5)		
Vollis (sur instructions spéciales)		Code V Code W	Futaie Taillis	VEF (0.2)	VET (0.2)	DVEF (0.5)	DVET (0.5)
		Code E Code F	Futaie Taillis	CHF (0.2)	CHT (0.2)	ACEF (0.5) → 16	ACET (0.5)

* Il s'agit du coefficient par lequel doit être multiplié le produit POND * VTOT (ou ACCROI) dans ARBRED.

** La "plage de date" distingue : "les chablis récents" (date approximative <= 2 ans) et les "chablis anciens" (date > 2 ans), sans qu'on puisse précisément dater l'événement (en mois et année, au moins), contrairement aux "chablis datés dits exceptionnels".

Annexe 3. : Comparaison des résultats de Verdier (2005a) avec les encadrements des pertes réalisés par essence et par départements pour les groupes suffisamment important.

libelle	dep	nb	perte_th	perte_2_5	estimation Verdier	
Aisne						
BOULEAU		2	79	10,2 %	16,7 %	21,00%
CHARME		2	238	35,3 %	32,8 %	31,00%
CHENE PEDONCULE		2	139	32,5 %	30,5 %	31,00%
CHENE ROUVRE		2	55	34,6 %	30,0 %	19,00%
EPICEA COMMUN		2	113	40,5 %	38,8 %	36,00%
FRENE		2	256	29,4 %	30,2 %	27,00%
GRAND AULNE		2	96	42,4 %	42,8 %	33,00%
HETRE		2	67	29,8 %	23,6 %	26,00%

libelle	dep	nb	perte_th	perte_2_5	estimation Verdier	
Bouche du Rhône						
PIN D'ALEP		13	858	20,8 %	25,1 %	25,00%

libelle	dep	nb	perte_th	perte_2_5	estimation Verdier	
Haute-Corse						
CHATAIGNIER	2B		98	19,0 %	25,2 %	28,00%
FRENE	2B		69	13,7 %	26,2 %	24,00%
GRAND AULNE	2B		89	-9,8 %	8,1 %	16,00%

libelle	dep	nb	perte_th	perte_2_5	estimation Verdier	
Côte d'Or						
BOULEAU		21	117	10,5 %	26,8 %	
CHARME		21	1057	23,5 %	23,5 %	
CHENE PEDONCULE		21	472	28,6 %	30,2 %	
CHENE ROUVRE		21	1240	29,7 %	28,8 %	
DOUGLAS		21	179	26,4 %	44,8 %	
EPICEA COMMUN		21	227	43,1 %	44,8 %	
FRENE		21	334	28,4 %	28,8 %	
GRAND AULNE		21	112	21,8 %	28,8 %	
HETRE		21	425	22,2 %	20,8 %	
PIN SYLVESTRE		21	301	25,7 %	26,6 %	

libelle	dep	nb	perte_th	perte_2_5	estimation Verdier	
Creuse						
BOULEAU		23	57	8,1 %	11,5 %	24,00%
CHATAIGNIER		23	102	10,0 %	18,8 %	49,00%
CHENE PEDONCULE		23	164	18,9 %	21,9 %	40,00%
CHENE ROUVRE		23	93	16,3 %	24,1 %	22,00%
DOUGLAS		23	65	14,3 %	18,4 %	
EPICEA COMMUN		23	63	6,3 %	23,6 %	21,00%

HETRE	23	80	1,1 %	7,4 %	15,00%
-------	----	----	-------	-------	--------

libelle	dep	nb	perte_th	perte_2_5	estimation Verdier	
Saône et Loire						
BOULEAU		71	65	35,1 %	43,4 %	39,00%
CHARME		71	484	22,5 %	27,5 %	28,00%
CHATAIGNIER		71	255	31,1 %	38,0 %	40,00%
CHENE PEDONCULE		71	260	20,0 %	20,5 %	16,00%
CHENE ROUVRE		71	955	19,3 %	22,4 %	21,00%
DOUGLAS		71	912	34,3 %	41,9 %	41,00%
FRENE		71	63	20,0 %	22,2 %	20,00%
HETRE		71	117	18,1 %	20,5 %	20,00%

libelle	dep	nb	perte_th	perte_2_5	estimation Verdier	
Ile de France Ouest						
BOULEAU		75	54	12,8 %	22,1 %	
CHARME		75	142	15,1 %	14,7 %	
CHATAIGNIER		75	108	36,9 %	40,6 %	
CHENE PEDONCULE		75	113	17,2 %	15,9 %	
CHENE ROUVRE		75	294	20,0 %	17,0 %	
FRENE		75	63	20,1 %	15,6 %	
HETRE		75	51	21,8 %	20,8 %	

libelle	dep	nb	perte_th	perte_2_5	estimation Verdier	
Seine et Marne						
BOULEAU		77	92	-1,1 %	4,0 %	4,00%
CHARME		77	87	12,2 %	5,5 %	8,00%
CHATAIGNIER		77	79	29,7 %	25,2 %	
CHENE PEDONCULE		77	119	18,3 %	15,0 %	12,00%
CHENE ROUVRE		77	289	21,1 %	16,4 %	2,00%
FRENE		77	81	26,7 %	18,2 %	23,00%
PIN SYLVESTRE		77	50	11,3 %	15,8 %	14,00%

libelle	dep	nb	perte_th	perte_2_5	estimation Verdier	
Haute-Vienne						
BOULEAU		87	144	6,1 %	13,2 %	13,00%
CHARME		87	113	7,2 %	0,7 %	0,00%
CHATAIGNIER		87	860	11,4 %	14,2 %	11,00%
CHENE PEDONCULE		87	949	-22,1 %	-13,8 %	-14,00%
CHENE ROUVRE		87	112	1,2 %	2,8 %	11,00%
DOUGLAS		87	340	20,5 %	22,2 %	17,00%
EPICEA COMMUN		87	91	-0,4 %	16,5 %	17,00%
GRAND AULNE		87	57	-2,9 %	5,4 %	9,00%
HETRE		87	121	17,0 %	7,1 %	10,00%
PIN SYLVESTRE		87	67	31,2 %	32,1 %	34,00%

Annexe 4. : Les valeurs utilisées pour les calculs de BILJOU

Fichier type de données d'entrée du programme BILJOU :

Autunois_71320001_feuillu	<i>titre du fichier</i>						
71320001	<i>nom du fichier de données météo</i>						
1994	<i>année de début</i>						
110 298	<i>jours de débourrement et de chute feuilles</i>						
0.75	<i>coefficient_TR max / ETP=coeftra LAI saturant</i>						
5.23 0.40 1.6	<i>LAI, coefficient d'extinction lumière, WAI hiver</i>						
1.0	<i>seuil d'interception des pluies</i>						
3	<i>nombre de tranches de sol</i>						
Prof	RU	%_racine	ptflet	D_apparente	Dréelle	ah	bh
26	18	0.75	0.09	1.40	2.426	-0.397	1.2616
71	73	0.15	0.13	1.40	2.544	-0.877	1.5828
130	94	0.10	0.13	1.40	2.500	-0.877	1.5828
							<i>description des couche de sol.</i>
*							<i>* s'il y a une période sans feuilles</i>
110 298							<i>jours de débourrement et de chute feuilles</i>

La description du sol se fait par horizon, défini à l'IFN par la texture (profondeur en cm, réserve utile en mm, pourcentage des racines, humidité au point de flétrissement, densité apparente et réelle dépendant de la texture, constante par tranche de sol).

Les variables **en gras** désignent celles variant d'un cas à l'autre.

Les autres constantes sont les valeurs standard de BILJOU

Choix des valeurs des variables

Jour de débourrement et de chute des feuilles d'après l'essence principale (Lebourgeois et al., 2002)

- résineux et chêne vert : du jour 1 au jour 365
- hêtre : du jour 121 au jour 291
- chêne et autres feuillus caducifoliés : du jour 110 au jour 298

LAI (indice foliaire) d'après l'essence principale (à dire d'expert de Nathalie Bréda)

- Châtaignier : 4,6
- Hêtre : 5,88
- Chêne vert : 3,65
- Charme : 4,1
- autres feuillus : 5,3 (apparenté aux chênes sessile et pédonculé).
- Douglas : 6
- Epicéa, Sapin et If : 5,43
- Pin : 3
- Mélèze : 3,85
- Cèdre : 4

Coefficient d'extinction de la lumière d'après l'essence principale (à dire d'expert de Nathalie Bréda)

- résineux et chêne vert : 0,4
- feuillu : $-0,256 \times \log_{10}(\text{lai}) + 0,461$

Seuil d'interception (précipitations nécessaires avant que celles-ci n'atteignent le sol) standard du programme BILJOU

- résineux et chêne vert : 2 mm
- feuillu : 1 mm

Profondeur de la couche supplémentaire d'après le type de sol (à dire d'expert d'Yves Lefèvre)

- Brun calcaire et rendzine (31 dans le classement IFN) : pas d'ajout de profondeur
- Brun calcique (32) : 120 cm
- Brun (33) : 120 cm
- Brun acide (34) : 130 cm
- Brun hydromorphe (38) : 120 cm
- Pseudogley : 120 cm
- Arénosol (1) : 150 cm
- Sol alluvial (11) : 150 cm
- ranker (13) : pas d'ajout de profondeur
- rendzine humifère (23) : pas d'ajout de profondeur
- rendzine hydromorphe (28) : pas d'ajout de profondeur
- gley (82) : pas d'ajout de profondeur

Formule de la réserve utile par couche d'après formule de l'IFN

$$RU = (10 - \text{cailloux}) \times \text{SOMME}_{\text{couche}} (\text{profondeur} \times ru)$$

ru étant la réserve utile en mm par cm de sol issu de la table de Jamagne

Pourcentage de racine (Standard BILJOU)

- Un horizon : 100 % des racines
- Deux horizons : 80 % dans la 1^{er} couche, 20 % dans la 2^e
- Trois horizons : 75 % dans la 1^{er}, 15 % dans la 2^e, 10 % dans la 3^e.

Point de flétrissement, réserve utile et densité apparente d'après la texture (Table de Jamagne, Baize et Jabiol, 1995).

Texture	Code IFN	Humidité au point de flétrissement (%)	Réserve utile (mm/cm)	Densité apparente
S	1	3	0,7	1,35
SL	2	5	1	1,4
SA	3	10	1,35	1,5
LS	4	9	1,45	1,45
LA	5	13	1,95	1,4
L	6	9	1,5	1,4
AL	7	19	1,8	1,4
ASL	8	12	1,7	1,45
A	9	25	1,75	1,45

Annexe 5. : Résultats des régressions univariées (ir03brut = f(ir2_5brut ; variable) sous différentes combinaisons) des variables climatiques, dendrométriques et environnementales pour tous les individus vivants lors de l'inventaire (à l'exception des données de mai 2004 de la Creuse).

Variabiles qualitatives

variable	Arbre pris		ir2_5brut variable		ir2_5brut*variable	
	proba	R ²	Sortie (+touché>-touché)	proba	R ²	Sortie (+touché>-touché)
Acc2_5 seul		65,2			65,2	
Region	Tous : 21045	67,7	Bourg>Nord >Med>Lim	0	68,5	Bourg>Nord>Med>Lim
Dep	Tous : 21045	67,8	71>21>02=13>2B=75>77>23>87	0	68,7	71>21>2B>02=75=77=13>23>87
Region_ifn	Ceux qui ont plus de 200 arbres (max : 2192) : 19616	68,4		0	69,7	
Feuille/resineux	Tous : 21045	65,4	Resineux>feuillus	0	65,5	Resineux>feuillus
Montagne/plaine/m editerrané	Tous : 21045	65,2		0	65,3	Plaine>Med>Mont
Essence principale	+ de 975 arbres :15313	66,6	DOU>FRE>CHS>PIH>CHE>HET>CHP>CHT	0	66,9	DOU>FRE>CHS>PIH>CHE>HE T>CHP>CHT
Classexpo3	Tous : 20747	65,2	Est>Sud>nord>plat>Ouest	0	65,2	Est>Sud>Ouest>plat>Nord
Bilantopo	Tous : 21045	65,3	Négatif>nul=plat>positif	0	65,3	nul>Négatif>plat>positif
Hydromorphie	Tous : 21045	65,3	Non hydromorphe>hydromorphe	0	65,2	Non hydromorphe>hydromorphe
Statut	Tous sauf tetard :21043	65,3	Taillis>Futaie	0	65,2	Futaie>taillis
Classe	Tous : 21045	65,7	PB>BM>GB	0	65,6	PB>BM>GB
Etage	Tous : 21045	65,4	Surcimé>etage dominant	0	65,2	Surcimé>etage dominant
Composition peuplement	Tous	65,6	Resineux>mixte>feuillu	0	65,7	Resineux>mixte>feuillu
propriétaire	Tous	65,3	Public>Privé	0	65,3	Public>Privé
Propriétaire2	Tous	65,3	Communal=domanial>privé	0	65,3	Communal=domanial>privé

Regime brut	Tous sauf FI	E-12	65,3	FR>TSF>TS	0	65,6	FR>TSF>TS
Regime	Tous sauf FI	E-29	65,4	Ttsf=FR>TS=Ftsf	0	65,7	FR=TTSF>Ftsf=TS
Regime	Que brin de futaie de FR et TSF	E-20	58,7	FR>TSF	0	59,0	FR>TSF
Regime	Que brin de taillis	E-11	63,2	FR>TSF>TS	0	63,5	FR>TSF>TS
Couvert TSF	Brin TSF	E-7	65,2	Faible=fort>moyen	0	65,4	Fort>faible>moyen
Couvert TSF	Brin futaie TSF	0,0074	63,4	Fort>moyen=faible	0	63,5	Fort>moyen>faible
Couvert TSF	Brin taillis TSF	E-13	61,9	Fort>faible>moyen	0	63,3	Fort>faible>moyen
Text2	Tous	E-32	62,2	A>SL=AL=LA=LS>S>L>ASL=SA	0	62,3	A=SL>LS>SA>AL=S>L>ASL=SA
Text1	2 horizons, +400 arbres	E-4	56,5	AL>L>LA=LS	0	56,7	AL>L>LS=LA
dateeco	Tous sauf mai (peu)	E-7	64,6	Janv=fev>mars=avril	0	64,5	Mai>fev=janv>mars>avril
auteur	Tous	E-134	66,3		0	67,0	
Herb	Tous	E-5	61,8	Herb augmente=>dégât augmente	E-8	61,8	Herb augmente=>dégât augmente
Lign1	Tous	E-12	61,9	Lign1 diminue=>dégât augmente	E-8	61,8	Lign1 diminue=>dégât augmente
Lign2	Tous	E-55	62,2	Lign2 augmente=>dégât augmente	E-59	62,2	Lign2 augmente=>dégât augmente
cailloux	Tous	E-24	62,1	cailloux diminue=>dégât augmente	E-17	62,0	cailloux diminue=>dégât augmente

Variables quantitatives

Variable	Arbre pris	ir2_5brut variable		ir2_5brut variable*variable		ir2_5brut*variable	
		proba	Sortie	proba	Sortie	proba	Sortie
Lumière Ellenberg	20115 (R ² =64,8)	E-5	64,8	E-4	64,8	L diminue=>dégât augmente	
Temperature ellenberg	16784 (R ² =65,2)	0,15	65,2	0,15	65,2		
Humidité ellenberg	18736 (R ² =64,8)	E-10	64,9	E-10	64,9	H diminue=>dégât augmente	

Acidité ellenberg	17419 (R ² =64,7)	E-55	65,2	A augmente=>dégât augmente	E-54	65,2	A augmente=>dégât augmente		
Azote ellenberg	16448 (R ² =64,7)	E-10	64,8	N augmente=>dégât augmente	E-10	64,8	N augmente=>dégât augmente		
Continentalité ellenberg	20008 (R ² =64,8)	E-7	64,9	K augmente=>dégât augmente	E-7	64,9	K augmente=>dégât augmente		
Ru_mai_2003	Tous : 21045	E-169	66,5	ru diminue=>dégât augmente	E-202	67,7	ru diminue=>dégât augmente	0	55,0
Ru_mai_moy	Tous : 21045	E-7	65,3	ru diminue=>dégât augmente	E-11	65,3	ru diminue=>dégât augmente	0	61,8
Ru_juin_2003	Tous : 21045	E-254	67,1	ru diminue=>dégât augmente	E-260	67,1	ru diminue=>dégât augmente	0	40,0
Ru_juin_moy	Tous : 21045	E-15	65,3	ru diminue=>dégât augmente	E-27	65,4	ru diminue=>dégât augmente	0	56,1
Ru_nov_2003	Tous : 21045	E-6	65,3	ru diminue=>dégât augmente	E-13	65,3	ru diminue=>dégât augmente	0	43,8
Ru_nov_moy	Tous : 21045	E-30	65,4	ru diminue=>dégât augmente	E-40	65,5	ru diminue=>dégât augmente	0	59,8
Ratio_ru_mai	Tous : 21045	E-165	66,4	Ratio diminue=>dégât augmente	E-179	66,6	Ratio diminue=>dégât augmente	0	57,5
Ratio_ru_juin	Tous : 21045	E-279	67,3	Ratio diminue=>dégât augmente	E-282	67,3	Ratio diminue=>dégât augmente	0	41,4
Ratio_ru_nov	Tous : 21045	E-5	65,3	Ratio augmente=>dégât augmente	E-10	65,3	Ratio augmente=>dégât augmente	0	43,0
Prec_mai_2003	Tous : 21045	E-236	67,0	prec diminue=>dégât	E-249	67,1	prec diminue=>dégât	0	67,1

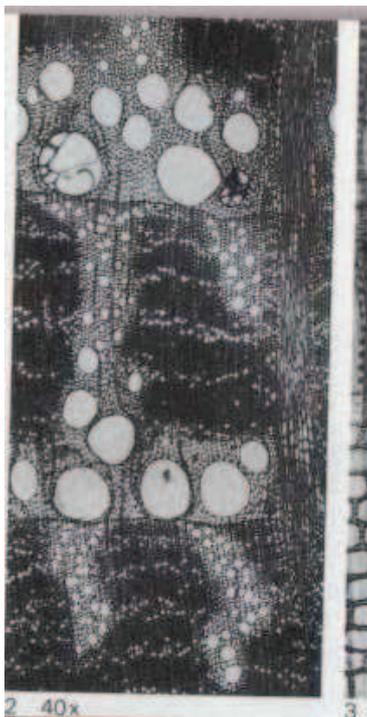
Prec_juin_2003	Tous : 21045	E-257	67,1	augmente prec diminue=>dégât augmente	E-279	67,3	augmente prec diminue=>dégât augmente	0	66,7	
Prec_juil_2003	Tous : 21045	E-223	66,9	prec diminue=>dégât augmente	E-251	67,1	prec diminue=>dégât augmente	0	66,2	
Dp_juil_2003 (VA)	Tous : 21045	E-118	66,1	dp augmente=>dégât augmente	E-48	65,6	Dp augmente=>dégât augmente	0	22,1	
Dp_juil_seul_2 003 (rapport)	Tous : 21045	E-8	65,3	ratio augmente=>dégât augmente	E-5	65,3	ratio augmente=>dégât augmente	0	43,5	
Dp_juil_moy	Tous : 21045	E-29	65,4	dp augmente=>dégât augmente	E-4	65,2	dp diminue=>dégât augmente	E-6	0	
Ratio_dp_juin	20953	E-10	65,2	dp augmente=>dégât augmente						
Ratio_dp_juil	Tous : 20953	E-10	65,2	dp augmente=>dégât augmente	0,03	65,1		E-57	1,2	
Durée secheresse 2003	Tous : 21045	E-134	66,2	Durée augmente=> dégât augmente	E-139	66,3	Durée augmente=> dégât augmente	0	38,2	
Rapport Durée sécheresse 4ans	Tous : 19726	E-74	65,7	Durée augmente=> dégât augmente	E-37	65,4	Durée augmente=> dégât augmente	0	16,0	
Rapport Durée sécheresse 8ans	Tous : 21045	E-80	65,8	Durée augmente=> dégât augmente	E-32	65,5	Durée augmente=> dégât augmente	0	10,7	
Déficit 2003	Tous : 21045	E-72	65,7	Déficit augmente=> dégât augmente	E-44	65,5	Déficit augmente=> dégât augmente	0	37,8	
Rapport déficit 4ans	Tous : 19726	E-50	65,7	Déficit augmente=> dégât augmente	E-27	65,5	Déficit augmente=> dégât augmente	0	26,7	

Rapport déficit 8ans	Tous : 21045	E-107	66,4	Deficit augmente=> dégât augmente	E-70	66,1	Deficit augmente=> dégât augmente	0	32,5	
pente	Tous	E-6	61,7	Pente augmente=>dégât augmente	E-5	61,7	Pente augmente=>dégât augmente			
rayonnement		0,030	64,2	rayo diminue=>dégât augmente	0,051	64,2	rayo diminue=>dégât augmente			
Densite	Tous	E-28	65,4	densite augmente=>dégât augmente	E-9	61,8	densite augmente=>dégât augmente			
D	Tous	E-29	65,4	D augmente=>dégât augmente	E-15	61,9	D augmente=>dégât augmente			
G	Tous	E-4	65,3	G augmente=>dégât augmente	0,12	61,8				
V	Tous	0,037	65,2	V augmente=>dégâts augmente	0,071	61,8				
g/G	Tous	E-68	65,7	g/G diminue=>dégât augmente	E-22	65,4	g/G diminue=>dégât augmente			
d/D	Tous	E-65	65,7	d/D diminue=>dégât augmente						
v/V	Tous	E-69	65,5	v/V diminue=>dégât augmente						
g/gmoy	Tous	E-32	65,5	g/gmoy diminue=>dégât augmente						

g/densite	Tous	E-22	65,4	g/dens diminue=>dégât augmente							
d/dmoy	Tous	E-45	65,6	d/dmoy diminue=>dégât augmente							
d/dmax	Tous	E-25	65,4	d/dmax diminue=>dégât augmente							
g/gmax	Tous	E-25	65,4	g/gmax diminue=>dégât augmente							
v/vmax	Tous	E-35	65,5	v/vmax diminue=>dégât augmente							
d/ddom	Tous	E-57	65,6	d/ddom diminue=>dégât augmente							
g/gdom	Tous	E-5	65,3	g/gdom diminue=>dégât augmente							
v/vdom	Tous	0,76	65,2	v/vdom diminue=>dégât augmente							
v/vmoy	Tous	E-31	65,5	v/vmoy diminue=>dégât augmente							
h/hdom	Tous	E-38	65,5	h/hdom diminue=>dégât augmente							
Indice Tome	Tous	E-68	65,7	Indice diminue=>dégât							

Annexe 6. : L'anatomie du bois de certaines essences, observées au microscope électronique à balayage (source : Schweingruber, 1990)

Arbre à bois hétérogène

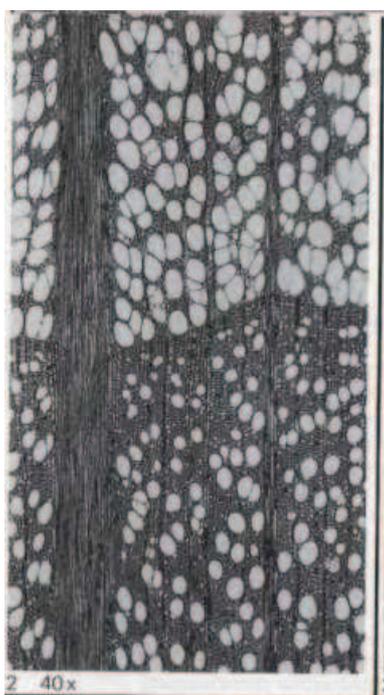


Quercus robur



Castanea sativa

Arbre à bois homogène



Fagus sylvatica

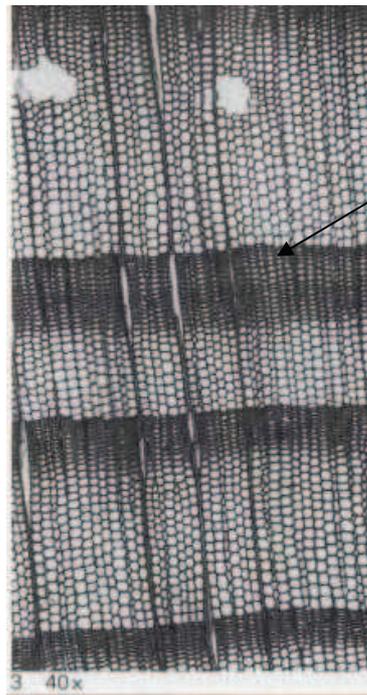


Betula pendula

Bois de résineux



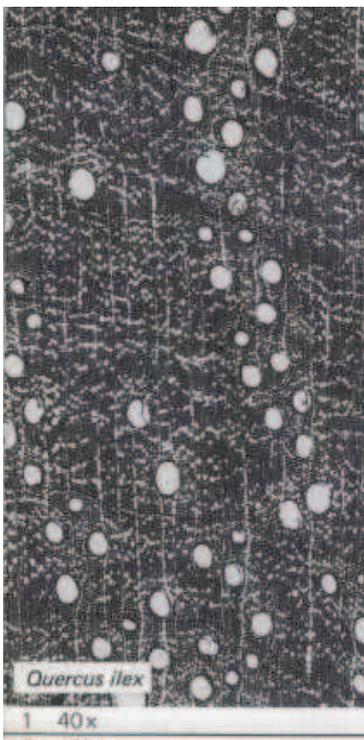
Pseudotsuga douglasii



Faux cerne

Pinus halepensis

Bois particulier

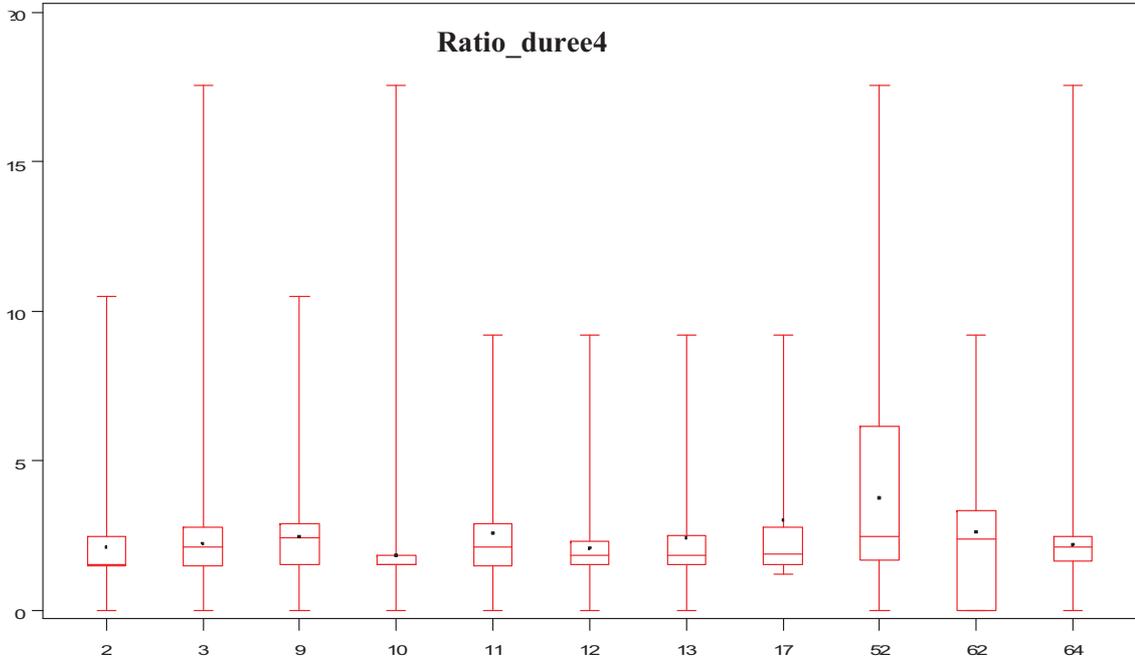


Quercus ilex

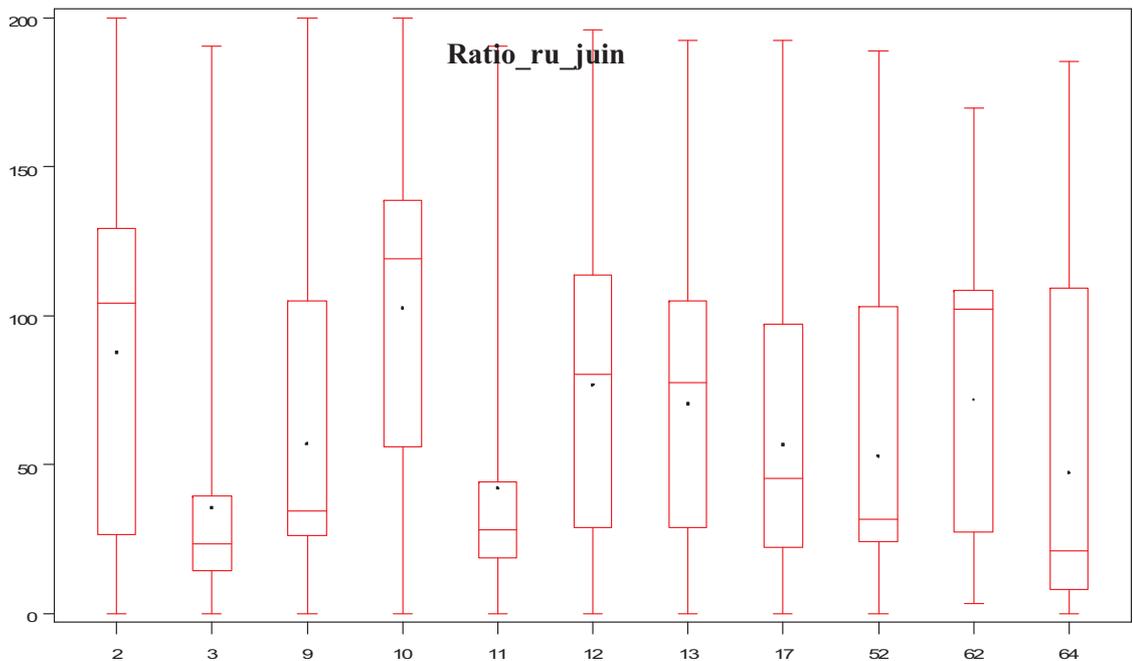
Annexe 7. : Description des caractères du modèle pour les arbres en fonction de leur essence à partir de boîtes à moustache.

Code des essences => 2 : Chêne pédonculé / 3 : Chêne sessile / 9 : Hêtre / 10 : Châtaignier / 11 : Charme / 12 : Bouleau / 13 : Grand Aulne / 17 : Frêne / 52 : Pin sylvestre / 62 : Epicéa commun / 64 : Douglas

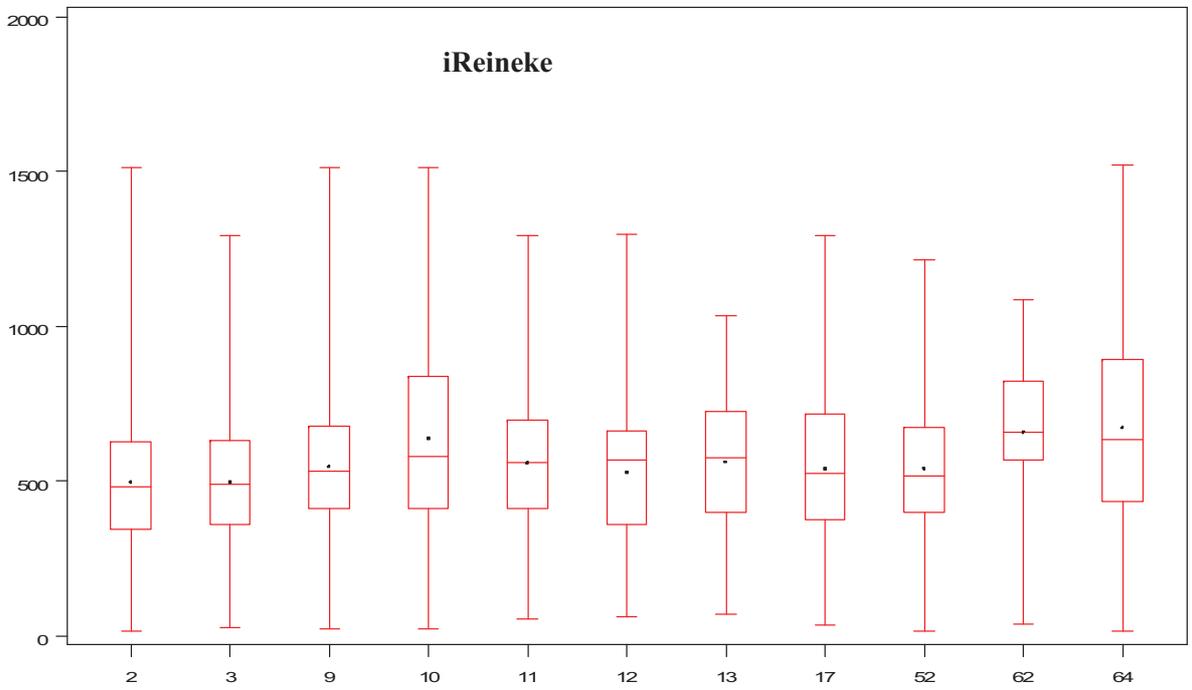
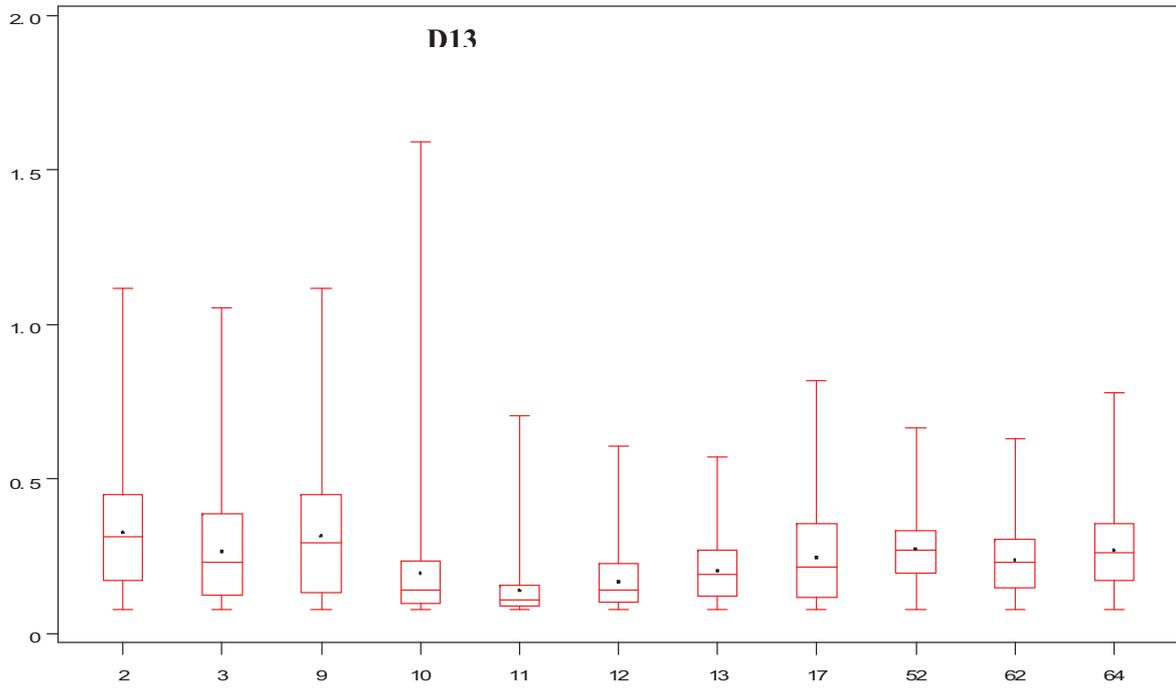
Coefficient multiplicateur



%



m



Résumé

Suite à la sécheresse de 2003, l'IFN a procédé à des mesures exceptionnelles d'accroissement radial de cette année dans 9 départements français. Une méthode d'estimation de la perte prenant en compte l'évolution de l'accroissement avec l'âge a été élaborée pour donner un intervalle de perte possible. Pour tous ces départements, la perte de croissance radiale des arbres encore en vie est comprise entre 20,3 % et 22,7 % de l'accroissement qu'aurait dû avoir l'arbre sans sécheresse. Les facteurs ayant le plus d'impact sur la perte sont la date d'entrée en sécheresse édaphique ou la durée. Les autres facteurs discriminant sont tous liés à cette caractéristique de la sécheresse.