# Etude dendroécologique du hêtre (Fagus sylvatica L.) sur les plateaux calcaires de Lorraine. Influence de la gestion sylvicole

Vincent Badeau

▶ **To cite this version:**

Vincent Badeau. Etude dendroécologique du hêtre (Fagus sylvatica L.) sur les plateaux calcaires de Lorraine. Influence de la gestion sylvicole. Sylviculture, foresterie. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 1995. Français. NNT : 1995NAN10033 . tel-01747133

**HAL Id: tel-01747133**
**https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01747133**

Submitted on 29 Mar 2018

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

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

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

Université de Nancy I
B.P. 239
54506 Vandœuvre-les-Nancy cedex

INRA - Centre de Nancy
Unité Ecophysiologie Forestière
Equipe Phytoécologie
54280 Champenoux

BIBLIOTHÈQUE SCIENCES * UNIVERSITÉ NANCY 1 *

# Etude dendroécologique du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) sur les plateaux calcaires de Lorraine.

## Influence de la gestion sylvicole.

THESE

soutenue le 13 juin 1995 en vue de l'obtention du
Doctorat de l'Université Henri Poincaré de Nancy I
Ecole doctorale : Biologie et Santé
U. F. R. : Sciences et Techniques Biologiques
Spécialité : Biologie Forestière

par **Vincent BADEAU**

Composition du Jury :

| | | |
|---|---|---|
| MM. | Jean-Michel FAVRE | Président |
| | Claude MILLIER | Rapporteur |
| | Lucien TESSIER | Rapporteur |
| | André GRANIER | Examinateur |
| | Michel BECKER | Directeur de Thèse |

*Ce travail a été financé par*
*la Région Lorraine*
*et*
*la Direction de l'Espace Rural et de la Forêt.*

*ETUDE DENDROECOLOGIQUE DU HETRE SUR LES PLATEAUX CALCAIRES DE LORRAINE.*
*Influence de la gestion sylvicole.*

**Résumé** ..... VII

**Introduction générale** ..... 1

**Première partie : AIRE D'ETUDE ET ECHANTILLONNAGE**

**Chapitre I**
**PRESENTATION DES PLATEAUX CALCAIRES DE LORRAINE**

**I - Le milieu physique** ..... 7
1 - Géologie et géomorphologie ..... 7
2 - Les facteurs climatiques ..... 8

**II - Le milieu forestier** ..... 9
1 - Histoire de la forêt lorraine ..... 9
2 - La conversion ..... 11
3 - Les régions forestières ..... 13

**Chapitre II**
**ECHANTILLONNAGE ET ARCHIVAGE DES DONNEES**

**I - Préparation du plan d'échantillonnage** ..... 15

**II - Echantillonnage** ..... 16
1 - Choix des placettes et des arbres ..... 16
2 - Description de la placette ..... 17
2.1 - Caractéristiques topographiques ..... 17
2.2 - Caractéristiques pédologiques ..... 17
2.3 - Caractéristiques floristiques ..... 18
3 - Description des arbres ..... 18
3.1 - Dendrométrie ..... 18
3.2 - Carottage ..... 19
3.3 - Mesure des largeurs de cernes ..... 21
3.3.1 - Préparation des échantillons ..... 21
3.3.2 - Mesure des accroissements annuels ..... 21
3.3.3 - Transformation des accroissements annuels en surfaces ..... 23
4 - Structure de l'échantillon ..... 23

**III - Création d'une base de données** ..... 25
1 - Introduction ..... 25
2 - Conception ..... 27
3 - Présentation ..... 27
4 - Utilisation ..... 28

**Deuxième partie : ANALYSE DE LA CROISSANCE RADIALE A LONG TERME**

## Chapitre III
## INTRODUCTION A LA DENDROCHRONOLOGIE ET METHODES GENERALES

**I - Bases de la dendrochronologie** ..... 33

**II - Interdatation des largeurs de cernes** ..... 34
1 - Définition ..... 34
2 - Principe et méthodes courantes ..... 34
3 - Application ..... 35
4 - Résultats ..... 36
4.1 - Les erreurs détectées par l'interdatation ..... 36
4.2 - Les années caractéristiques du hêtre sur les plateaux calcaires de Lorraine ..... 37
5 - Conclusion sur l'interdatation ..... 37

**III - Le cerne et le temps** ..... 41
1 - Le cerne et les facteurs de variation ..... 41
2 - Le temps et les facteurs de variation ..... 43

**IV - Signal et bruit de fond : choix de l'information à traiter** ..... 43
1 - Cas de l'étude des signaux à haute fréquence ..... 43
2 - Cas de l'étude des signaux à basse fréquence ..... 45

## Chapitre IV
## ANALYSE DE LA CROISSANCE RADIALE A LONG TERME

**I - Recherche d'une tendance à long terme de la croissance radiale par la méthode à âge constant** 49
1 - Méthode à âge constant sur une base annuelle ..... 49
1.1 - Principe ..... 49
1.2 - Premiers résultats et complément de la méthode ..... 49
1.3 - Résultats ..... 50
2 - Méthode à âge constant sur une base décennale ou bi-décennale ..... 50
2.1 - Principe ..... 50
2.2 - Résultats ..... 50
3 - Conclusion sur la méthode à âge constant ..... 58

**II - Recherche d'une tendance à long terme dans la croissance radiale en utilisant des indices de croissance standardisés à partir d'une estimation régionale de l'effet âge** ..... 59
1 - Recherche d'une loi régionale liant l'accroissement annuel à l'âge courant ..... 59
1.1 - Calcul et interprétation des "courbes âges" ..... 59
1.2 - Ajustement mathématique des courbes âge ..... 63
2 - Standardisation des largeurs et des surfaces de cernes ..... 65
3 - Evolution à long terme de la croissance radiale de la hêtraie depuis le siècle dernier ..... 69
3.1 - Méthode ..... 69
3.2 - Premiers résultats ..... 69
3.2.1 - Choix des indices de croissance ..... 69
3.2.2 - Evolution de la croissance radiale des futaies de hêtres ..... 72
3.2.3 - Evolution de la croissance radiale des taillis-sous-futaies de hêtres ..... 72

4 - Evolution à long terme de la croissance radiale des hêtraies sans les cernes de moins de 30 ans ... 73
4.1 - Cas des futaies ... 73
4.2 - Cas des taillis-sous-futaies ... 73
4.3 - Conclusion ... 75
5 - Evolution de la croissance radiale des futaies et taillis-sous-futaie de hêtres en fonction des classes d'âges cambiaux ... 75
5.1 - Cas des arbres de futaie ... 75
5.2 - Cas des arbres de taillis-sous-futaie ... 77
5.3 - Superposition des courbes pour chaque traitement sylvicole ... 77
6 - Essai de prise en compte de la concurrence passée ... 78
6.1 - Méthode ... 81
6.2 - Stratification des indices de croissance radiale en fonction du coefficient a ... 85
6.3 - Prise en compte de la compétition dans le calcul des indices de croissance pour chaque traitement sylvicole ... 85
6.4 - Prise en compte de la compétition dans le calcul des indices de croissance en ne séparant pas les traitements sylvicoles ... 86
6.5 - Conclusion sur les indices de correction de la compétition ... 86
7 - Séparation du bois initial et du bois final pour l'étude des tendances à long terme ... 87
7.1 - Proportions respectives de bois initial et de bois final dans le cerne annuel ... 87
7.2 - Etude de l'évolution à long terme des surfaces de bois initial et de bois final ... 89
7.2.1 - Méthodes ... 89
7.2.2 - Résultats ... 89
7.3 - Conclusions sur l'étude du bois initial et du bois final ... 89
8 - Comparaison de l'évolution à long terme de la croissance radiale entre les futaies vosgiennes et les futaies des plateaux calcaires ... 91
9 - Conclusion sur l'étude à long terme de la croissance radiale des hêtraies des plateaux calcaires en utilisant des indices de croissance standardisés à partir d'une courbe âge régionnale. ... 91

**III - Recherche d'une tendance à long terme dans la croissance radiale par analyse de variance** ... 94
1 - Principe et premières analyses ... 94
2 - Analyse de variance en utilisant des classes d'âges et de dates ... 95
2.1 - Méthode ... 95
2.1.1 - Divisions en classes ... 95
2.1.2 - Analyses ... 97
2.2 - Résultats ... 97
2.2.1 - Tableaux d'analyse de variance ... 97
2.2.2 - L'effet âge ... 101
2.2.3 - L'effet date ... 101
2.2.4 - L'interaction entre l'âge et la date ... 103
4. - Analyse de variance en séparant le bois initial et le bois final ... 103
5 - Les hypothèses de l'analyse de variance ... 108
5.1 - Normalité et homoscédaticité ... 108
5.2 - Indépendance des échantillons ... 109
6 - Conclusion sur l'analyse de variance ... 110

**IV - Biais d'échantillonnage : les vieux arbres peuvent-ils être comparés aux jeunes ?** ... 111
1 - Suppression des plus vieux arbres ... 111
2 - Stratification en fonction d'un indice de vigueur ... 113
2.1 - Calcul d'un indice de vigueur ... 113
2.1 - Elimination des arbres les plus vigoureux ... 115
2 - Conclusions sur les biais possibles d'échantillonnage ... 117

## Troisième partie : ANALYSE DENDROECOLOGIQUE

### Chapitre V
### ETUDE PHYTOECOLOGIQUE

**I - Introduction** ..... 121

**II - Méthodes** ..... 121
1 - Coefficients d'Ellenberg ..... 121
2 - Analyse factorielle des correspondances ..... 122
3 - Classification des stations ..... 122

**III - Caractéristiques générales de la région** ..... 122
1 - Substrat géologique et formations superficielles ..... 122
2 - Processus pédogénétiques et principaux types de sols ..... 123
2.1 - Décarbonatation ..... 123
2.2 - Désaturation et lessivage ..... 123
2.3 - Les humus ..... 125
2.4 - Principaux types de sol ..... 125
3 - Flore des plateaux calcaires ..... 125

**III - Analyse factorielle des correspondances** ..... 127
1 - Interprétation de l'axe 1 ..... 127
2 - Interprétation de l'axe 2 ..... 129
3 - Interprétation de l'axe 3 ..... 129
4 - Conclusion ..... 131

**IV - Classification des types de stations** ..... 131
1 - Stations de plateaux ..... 132
2 - Autres stations : pentes, bas de pentes et fonds de vallons ..... 133
3 - Caractéristiques physico-chimiques des stations ..... 135
3.1 - Facteur hydrique et désaturation ..... 135
3.2 - Facteur nutrition ..... 139

**V - Conclusion** ..... 139

### Chapitre VI
### CROISSANCE ET FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX

**I - Introduction** ..... 141

**II - Méthodes** ..... 141
1 - Généralités ..... 141
2 - Indices de croissance ..... 143
3 - Facteurs environnementaux ..... 145
4 - Méthodes d'analyse ..... 145

**III - Résultats** ..... 146
1 - Croissance en hauteur ..... 146
1.1 - Croissance en hauteur et type de station ..... 146

1.2 - Croissance en hauteur et caractéristiques stationnelles ..... 147
1.3 - Croissance en hauteur et autres caractéristiques dendrométriques ..... 152
2 - Croissance radiale ..... 153
2.1 - Indices de surface terrière ..... 153
2.2 - Stratification ..... 155
2.2.1 - Généralités ..... 155
2.2.2 - Stratification en fonction des paramètres dendrométriques ..... 155
2.2.3 - Stratification en fonction des paramètres physico-chimiques ..... 163
2.2.4 - Stratification en fonction des types de stations ..... 163
2.3 - Analyse de la tendance à long terme de la croissance radiale en fonction des paramètres environnementaux ..... 165
2.3.1 - Tendance à long terme en futaie et types de stations ..... 165
2.3.2 - Tendance à long terme en futaie et en taillis-sous-futaie pour un même type de station ou pour une même gamme de paramètres environnementaux ..... 165

**III - Conclusion** ..... 168

## Chapitre VII
## CROISSANCE ET FACTEURS CLIMATIQUES

**I - Introduction** ..... 171

**II - Matériel et méthodes** ..... 171
1 - Données climatiques ..... 171
1.2 - Pluies et températures ..... 171
1.2 - Evapotranspiration potentielle et bilan hydrique selon Thornthwaite ..... 173
1.3 - Modèle de bilan hydrique ..... 175
2 - Données dendrochronologiques ..... 176
2.1 - Standardisation ..... 176
2.2 - Prise en compte des arrière-effets ..... 177
2.3 - Sélection des chronologies ..... 180
3 - Analyse des relations cerne - climat ..... 180

**III - Résultats** ..... 181
1 - Analyse des relations entre la croissance et le climat depuis 1881 ..... 181
1.1 - Analyse des chronologies non dégagées des arrière-effets modèles FUT1 et TSF1 ..... 181
1.2 - Analyse des chronologies dégagées des arrière-effets modèles FUT2 et TSF2 ..... 183
2 - Analyse des relations entre la croissance et le climat depuis 1950 ..... 185
2.1 - Analyse des chronologies non dégagées des arrière-effets modèles FUT3 et TSF3 ..... 185
2.2 - Analyse des chronologies dégagées des arrière-effets modèles FUT4 et TSF4 ..... 190
2.3 - Les différentes hypothèses de réserve utile ..... 190

**IV - Discussion et conclusion** ..... 192

## Quatrième partie : CONCLUSIONS GENERALES

### Chapitre VIII
### SYNTHESE DES RESULTATS, DISCUSSION et CONCLUSION

**I - La croissance radiale des hêtraies collinéennes de Lorraine a-t-elle évolué au cours du siècle passé ?** ..... 197

**II - La mise en évidence d'une tendance à long terme dépend-elle des méthodes d'analyse utilisées ?** ..... 198

**III - Déterminisme de la tendance à long terme de la croissance radiale** ..... 199
1 - Biais d'échantillonnage ..... 199
2 - Influence de la sylviculture ..... 199
3 - Influence de la fertilité stationnelle ..... 200
4 - Influence des facteurs environnementaux ..... 200
4.1 - Le climat ..... 200
4.2 - Le dioxyde de carbone ..... 201
4.3 - Les dépôts azotés ..... 203

**IV - Conclusion et perspectives** ..... 205

**Références bibliographiques** ..... 209

**Annexes** ..... 227

**Epilogue**

# RESUME

L'étude de la croissance radiale à long terme des arbres des forêts françaises a débuté il y a une dizaine d'années. Les investigations ont porté sur plusieurs essences forestières et plusieurs régions. Dans tous les cas, une augmentation significative et régulière des niveaux de croissance a pu être mise en évidence, au moins depuis le début du siècle. Ces résultats concordent avec ceux d'autres études récentes menées en Europe occidentale, pourtant leur interprétation reste délicate et sujette à controverse. L'augmentation de productivité mise en évidence est-elle due à des causes environnementales, comme des changements climatiques (augmentation des précipitations et des températures) ; une fertilisation par le $CO_2$ ou par d'autres polluants atmosphériques comme l'azote ; à une évolution des pratiques sylvicoles (éclaircies plus intenses qu'au siècle dernier) ; ou tout simplement à des biais d'échantillonnage ou de méthode ?

Pour tenter de répondre à ces questions, l'étude dendroécologique du hêtre sur les plateaux calcaires de Lorraine a été entreprise, et quatre objectifs principaux ont été dégagés :

- l'analyse dendrochronologique des hêtraies des plateaux calcaires de Lorraine devait tout d'abord confirmer ou infirmer l'existence d'une dérive positive de la croissance radiale des hêtres depuis le siècle dernier à l'étage collinéen ;
- l'étude de l'évolution à long terme de la croissance radiale offrait l'opportunité d'éprouver diverses méthodes d'extraction des signaux à basse fréquence contenus dans les chronologies de cernes d'accroissements annuels ;
- l'étude conjointe des futaies et taillis-sous-futaies de hêtres devait permettre de quantifier l'influence de la sylviculture dans les phénomènes de dérive à long terme de la croissance radiale ;
- il était enfin intéressant de préciser le statut écologique du hêtre, en particulier vis-à-vis du facteur hydrique (climatique et édaphique) et de caractériser l'interaction de ces facteurs avec la sylviculture.

Cent deux placettes ont été installées (63 en futaies et 39 en taillis-sous-futaie) et mille vingt cinq arbres de toutes les classes d'âge ont été échantillonnés afin de pouvoir différencier deux signaux s'exprimant à basse fréquence dans les largeurs de cernes : les effets relatifs à l'augmentation de l'âge des arbres et les effets environnementaux. Trois méthodes sont utilisées pour séparer ces signaux : une méthode à âge constant, une standardisation régionale des surfaces de cernes et l'analyse de variance. Toutes ces méthodes s'avèrent efficaces pour mettre en évidence des signaux à long terme et de basse fréquence non liés aux processus de vieillissement des arbres et donnent des résultats similaires en ce qui concerne la mise en évidence d'une dérive à long terme de la croissance radiale. Pour les arbres de futaie, on observe une augmentation régulière du taux de croissance depuis le siècle dernier. En taillis-sous-futaie, une tendance est perceptible quoique beaucoup plus faible jusque dans les années 1950. A partir de 1950, la tendance à long terme de la croissance radiale s'accélère brusquement. Ce saut de croissance est particulièrement évident dans le cas du taillis-sous-futaie. Une sylviculture plus dynamique du hêtre, c'est-à-dire une fréquence ou une intensité plus élevée des éclaircies dans les peuplements de futaie au cours du siècle écoulé, aurait pu expliquer la tendance observée. Cependant, un tel changement n'aurait pu se produire qu'au cours des dernières décennies, où l'aménagement des forêts a été plus intensif. Puisque la dérive positive de la croissance radiale s'observe à propos des arbres de taillis-sous-futaie, elle ne peut que plus difficilement être expliquée par des changements de pratiques sylvicoles : ces changements sont supposés *a priori* absents ou minimes dans ce type de peuplement. Notre étude apporte donc de nouvelles informations quant au rôle respectif de la sylviculture et des changements environnementaux sur les modifications à long terme de la croissance radiale. La différence significative observée entre les deux types de traitements sylvicoles étudiés implique que les tendances mises en évidence ne peuvent être expliquées uniquement par l'évolution des facteurs environnementaux globaux comme le $CO_2$, le climat, les dépôts azotés. La sylviculture intervient également, soit en jouant un rôle direct dans la tendance positive de croissance radiale, soit en interagissant avec certains facteurs de l'environnement.

Les conditions écologiques locales sont décrites avec précision à partir de la flore, de la topographie, du sol, des conditions d'alimentation en eau. A partir des résultats de cette étude phytoécologique, on constate qu'en situation de plateau, la productivité des hêtraies est très corrélée à la disponibilité en eau du sol, c'est-à-dire à l'épaisseur de celui-ci. Sur les plateaux calcaires de Lorraine, les futaies de hêtres sont situées préférentiellement sur les sols les plus profonds, alors que le régime de taillis-sous-futaie a été maintenu principalement sur les stations à sol plus superficiel. Pour les arbres de futaie, la dérive positive de la croissance radiale est d'autant plus forte que le type de station est favorable à la croissance. Pourtant, dans une fourchette de conditions environnementales identiques, la tendance à long terme de la croissance radiale des arbres de futaie reste supérieure à celle des arbres de taillis-sous-futaie. La meilleure fertilité des placettes de futaie par rapport à celles de taillis-sous-futaie ne peut donc pas expliquer entièrement la différence observée entre les tendances à long terme des arbres de futaie et de taillis-sous-futaie. Les types de stations ne peuvent en outre expliquer les sauts de croissance observés dans les années 1950.

L'étude des accroissements annuels en fonction des données climatiques brutes (pluies et températures), et en fonction de variables synthétiques issues d'un modèle de bilan hydrique journalier, est réalisée afin de mettre en évidence les paramètres déterminants pour la croissance. La reconstruction des séries chronologiques dégagées de toute tendance séculaire conduit à des modèles stables et très explicatifs en ce qui concerne les relations entre arbre, climat et gestion sylvicole. Pour l'essentiel, la croissance du hêtre est extrêmement bien corrélée à la disponibilité en eau dans les sols pendant les mois de juin à août. Les analyses dendroclimatiques montrent en outre qu'en Lorraine, ni la pluviométrie ni les températures n'ont augmenté ou diminué de façon significative depuis 1881, que ce soit à l'échelle annuelle, saisonnière ou mensuelle. Les seules évolutions climatiques ne peuvent, dans notre cas, expliquer de façon satisfaisante l'évolution positive de la croissance radiale mise en évidence par ailleurs.

En raison des activités humaines, la concentration du dioxyde de carbone atmosphérique ne cesse d'augmenter depuis le début du siècle dernier, passant de 280 à 360 ppm actuellement. Si certains auteurs minimisent l'action d'une fertilisation directe par le $CO_2$, d'autres pensent au contraire que ce facteur peut avoir des effets positifs plus ou moins important, que ce soit sur la biomasse produite, la taille des feuilles, l'activité photosynthétique ou l'efficience d'utilisation de l'eau. L'augmentation du $CO_2$ atmosphérique pourrait donc être responsable, au moins en partie, des phénomènes de tendance à long terme.

Les dépôts azotés d'origine atmosphérique auraient brutalement augmenté en Europe Centrale à partir de 1950. Ces dépôts pourraient avoir une responsabilité dans le saut de la croissance radiale mis en évidence à partir des années 1950.

Enfin, entre les peuplements de futaie régulière et de taillis-sous-futaie, les caractéristiques microclimatiques, le fonctionnement du sol, le fonctionnement écophysiologique des arbres (bilan hydrique et minéral, allocation du carbone), sont sensiblement différents. Ces caractéristiques sont malheureusement assez peu connues. Les changements environnementaux qui sont susceptibles d'agir sur la croissance pourraient donc le faire de façon variable dans les deux types de peuplements.

# INTRODUCTION GENERALE

Suite aux premières observations de dépérissement forestier en France en 1983, un vaste programme de recherche avait été engagé afin de caractériser l'action directe et indirecte des polluants atmosphériques ainsi que les effets climatiques ou stationnels sur l'état sanitaire des peuplements (programme DEFORPA, Bonneau, 1987). *A priori*, l'hypothèse "pollution" paraissait être la seule capable d'expliquer les divers dégâts observés sur les houppiers de la sapinière vosgienne (Becker, 1985).

Parmi les différentes approches mises en œuvre pour comprendre ces phénomènes, la dendrochronologie apparaît comme un outil adéquat pour l'écologue forestier. Celle-ci permet en effet d'analyser rétrospectivement le comportement des arbres ; de suivre *in situ* leur croissance selon les conditions environnementales ; d'analyser les fonctionnements et dysfonctionnements des écosystèmes forestiers ; de comprendre la dynamique de la croissance radiale en fonction des fluctuations climatiques régionales à court et moyen terme ; de quantifier les réactions à une fertilisation (Becker *et al.*, 1988). De nombreuses essences ont alors été étudiées dans des régions variées : le sapin dans le Jura (Bert, 1988 ; Bert & Becker 1990 ; Bert, 1992, 1993) ; le hêtre et les chênes pédonculé et sessile sur le Plateau Lorrain (Nieminen, 1988 ; Becker *et al.*, 1994a, 1994b, 1995) ; le sapin dans les Vosges (Becker, 1987a ; Becker *et al.*, 1989 ; Lebourgeois *et al.*, 1993) ; l'épicéa dans les Ardennes (Fehlen, 1992) ; le pin maritime dans les Landes (Lemoine, 1993) ; le pin laricio dans les Pays de la Loire (Lebourgeois, 1995). L'emploi des techniques de la dendrochronologie a permis de montrer que les premières observations alarmistes n'étaient pas corrélées à un phénomène global de réduction de croissance des peuplements (Becker, 1987a ; Becker & Lévy, 1988). Si toutes ces études ont contribué à approfondir les connaissances concernant l'autécologie des essences, certaines d'entre elles ont mis en évidence un phénomène "nouveau" et surprenant : la productivité actuelle des peuplements serait supérieure à celle du siècle dernier. Cette observation a été faite pour la première fois sur le sapin dans les Vosges (Becker, 1987a) puis confirmée pour la sapinière jurassienne par Bert (1988, 1992) ; par Becker *et al.* (1994a, 1994b, 1995) pour l'épicéa dans les Vosges et les chênes du Plateau Lorrain ; par Picard (1995) à propos du hêtre dans les Vosges (Figure 1).

De façon plus générale, plusieurs études récentes menées en Europe occidentale ont mis clairement en évidence une augmentation à long terme de la productivité forestière, ou de la croissance radiale des arbres, au cours du siècle écoulé, et ceci pour des espèces et dans des régions variées (voir une synthèse dans Innes, 1991 où une liste de trente quatre études réalisées dans le monde entier, montrant toutes une augmentation de la productivité ou de la croissance radiale depuis 1850, est référencée ; ainsi que dans Becker *et al.*, 1990 ; Briffa, 1992 ; Hartmann *et al.*, 1992 ; Kauppi *et al.*, 1992 ; Eriksson & Johansson, 1993 ; Becker *et al.*, 1994a, Spiecker *et al.*, 1994 ; Becker *et al.*, 1995).

Cependant, malgré la convergence des résultats, peut-on conclure définitivement à l'existence d'une évolution à long terme positive et générale de la croissance radiale ou de la productivité ?

Beaucoup d'observations ont été réalisées en domaine montagnard sur des peuplements de futaie ou de futaie jardinée où il existe une forte compétition individuelle. Les plans d'échantillonnage des premières études réalisées par Becker et Bert n'étaient initialement pas prévus dans l'optique de la problématique "tendance à long terme", notamment au point de vue de la variabilité stationnelle. L'interprétation de ces résultats est donc délicate et sujette à controverse. L'augmentation de productivité mise en évidence est-elle due à des causes environnementales, comme des changements climatiques (augmentation des précipitations et des températures) ? ; une fertilisation par le $CO_2$ ou par d'autres polluants atmosphériques comme l'azote ? ; à une évolution des pratiques sylvicoles (éclaircies plus intenses qu'au siècle dernier) ? ; ou tout simplement à des biais d'échantillonnage ou de méthode ?

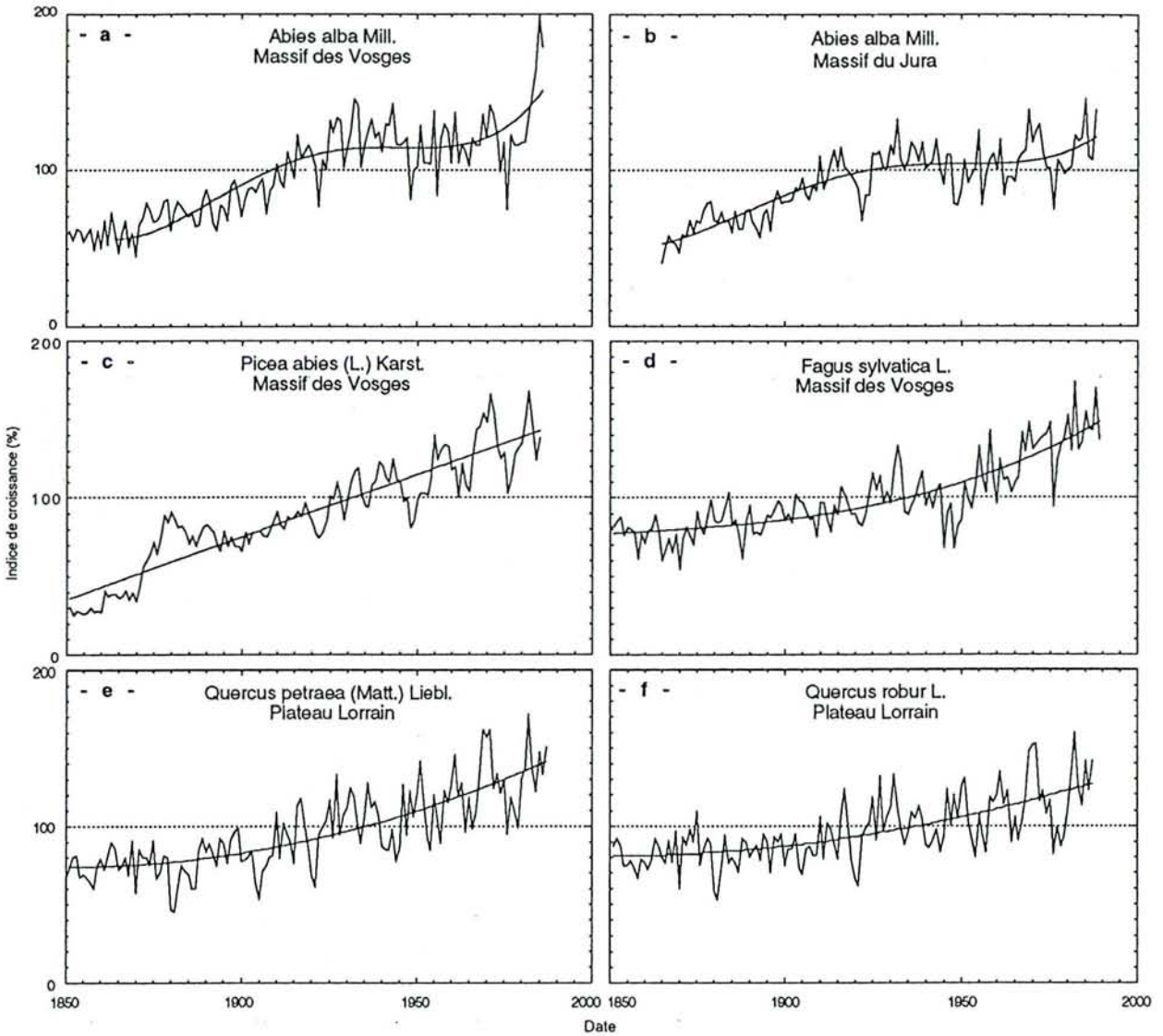



**Figure 1 : Les tendances à long terme en France.** Pour des essences et des régions d'étude variées, les indices moyens de croissance radiale, calculés à partir d'une standardisation régionale (cf. 2ème partie, chapitre IV), sont représentés en fonction des années calendaires (courbes brisées). Chaque graphique montre une tendance positive de la croissance radiale à long terme (courbes moyennes).

- a - Becker, 1989a ;
- b - Bert & Becker, 1990 ; Bert 1992 ;
- c - Becker *et al.*, 1994a ;
- d - Picard, 1995 ;
- e - Becker *et al.*, 1994a ;
- f - Becker *et al.*, 1994a ;

Pour tenter de répondre à ces questions, il était souhaitable de réaliser une étude dont l'objectif principal serait de caractériser l'évolution à long terme de la croissance radiale. Nous avons donc entrepris l'étude dendroécologique du hêtre sur les plateaux calcaires de Lorraine dans cette optique.

La première étude de cette essence sur le Plateau Lorrain a été réalisée par Nieminen en 1988. Contrairement aux résultats obtenus par Becker dans les Vosges (1987a) et aux premiers résultats de Bert dans le Jura (1988) à propos du sapin pectiné, aucune dérive à long terme positive de la croissance radiale n'a été observée. Pourtant, l'étude des chênes sessile et pédonculé sur le Plateau Lorrain (Becker, 1992 ; Becker *et.al.*, 1994b) et du hêtre dans les Vosges (Picard, 1995) ont montré que, d'une part, deux feuillus de plaine étaient l'objet de dérives de croissance à long terme et que d'autre part, à l'étage montagnard, la croissance radiale des hêtres était améliorée depuis plus d'un siècle.

> L'analyse des hêtraies collinéennes de Lorraine doit donc tout d'abord permettre de confirmer ou d'infirmer l'existence d'une dérive positive de la croissance radiale depuis le siècle dernier à l'étage collinéen.

Parmi les facteurs "externes" susceptibles d'expliquer l'augmentation à long terme de la productivité des écosystèmes forestiers, l'évolution des pratiques sylvicoles est souvent invoquée comme déterminante. En effet, si sur le long terme l'intensité ou la fréquence des éclaircies dans les peuplements a augmenté (sylviculture plus dynamique), le niveau de compétition entre les arbres restant sur pied a été réduit et la croissance radiale améliorée. Une telle diminution des niveaux de compétition n'a cependant jamais été rapportée, et cette hypothèse est tout à fait spéculative. Un tel changement n'aurait d'ailleurs pu se produire qu'au cours des dernières décennies où l'aménagement des forêts a été plus intensif. Néanmoins, l'influence des pratiques sylvicoles sur les phénomènes de tendance à long terme n'a jamais été étudiée, ou très partiellement (Bert, 1992 ; Becker *et al.*, 1994b). Dans le but de séparer l'effet possible de modifications des pratiques sylvicoles des autres effets environnementaux sur la croissance, notre étude se proposait de comparer les tendances à long terme de la croissance dans des peuplements soumis à deux sylvicultures très contrastées. Le premier régime sylvicole est la futaie, le second, le taillis-sous-futaie. Dans le cas des futaies, peuplements équiennes où le niveau de compétition entre les arbres est élevé tout au long de leur vie, des pratiques sylvicoles non constantes depuis le siècle dernier pourraient entraîner des modifications de la croissance radiale. Dans le cas des taillis-sous-futaie, la sylviculture est plus traditionnelle. Le taillis (strate verticale basse) est exploité totalement et régulièrement tous les 25 à 30 ans. Les réserves (strate verticale haute) sont au contraire maintenues sur pied pendant plusieurs "révolutions" du taillis. Ce mode d'exploitation prétend constituer et perpétuer des peuplements renfermant ces deux étages. Ici, la sylviculture maintient des populations en permanence peu denses, caractérisées par des niveaux de compétition entre les arbres dominants à la fois très bas[1] et stables à l'échelle du siècle.

> L'étude conjointe des futaies et taillis-sous-futaies de hêtres doit permettre de quantifier l'influence de la sylviculture dans les phénomènes de dérive à long terme de la croissance radiale.

L'évolution dans le temps de la croissance radiale annuelle d'un arbre ou d'un peuplement forestier constitue un signal complexe qui véhicule diverses informations sur des pas de temps variables. Les variations à haute fréquence de la croissance radiale, c'est-à-dire les variations de l'ordre de l'année ou de la décennie, ont été largement étudiées pour de nombreuses espèces à travers le monde (Fritts, 1976 ; Schweingruber,1988). Elles sont principalement dues à des variations aléatoires des facteurs environnementaux comme le climat ou diverses perturbations (incendies, dégâts d'insectes, ...). Les variations à basse fréquence de la croissance radiale (à l'échelle de la décennie, du siècle, ou davantage) ont

1 - D'après nos relevés, la surface terrière moyenne (somme des sections des troncs par hectare de forêt) est de 27 $m^2$/ha pour la futaie régulière et de 15 $m^2$/ha pour le taillis-sous-futaie dans des peuplements de 100 à 140 ans.

été peu étudiées jusqu'à une époque récente. Ce signal particulier est cependant devenu récemment un sujet de préoccupation majeur dans le contexte des changements lents et continus qui affectent les environnements forestiers. Pourtant, l'extraction de cette information à partir des séries chronologiques est assez difficile. Dans ce but, diverses méthodes peuvent être appliquées mais elles restent toujours un sujet de débat (Wigley *et al.*, 1987 ; Dupouey *et al.*, 1992).

L'étude de l'évolution à long terme de la croissance radiale doit permettre d'éprouver diverses méthodes d'extraction des signaux à basse fréquence contenus dans les chronologies de cernes d'accroissements annuels.

Le hêtre, essence prépondérante en Lorraine, est considéré comme étant une des meilleures solutions pour la mise en valeur des sols calcaires. Pourtant, son écologie, appréciée principalement au point de vue édaphique lors de l'établissement du catalogue des stations forestières des plateaux calcaires de Lorraine (Becker *et al.*, 1980), est mal définie au point de vue des réactions aux variations climatiques. Les facteurs limitants de la croissance pourraient être radicalement différents de ceux rencontrés en domaine montagnard (Picard, 1995) puisque les caractéristiques bioclimatiques diffèrent entre les deux étages. Pour analyser les réactions des arbres vis-à-vis du climat, les données classiques concernant les températures et les précipitations sont utilisées. Cette approche est complétée par l'utilisation de variables synthétiques provenant d'un modèle de bilan hydrique comme l'ont déjà tenté plusieurs auteurs (Giles *et al.*, 1985 ; Robertson *et al.*, 1990 ; Foster & LeBlanc, 1993). Ce modèle intègre les données météorologiques journalières à partir d'une base physiologique (Bréda, 1994).

Il semble donc intéressant de préciser le statut écologique du hêtre, en particulier vis-à-vis du facteur hydrique (climatique et édaphique), de caractériser l'interaction de ces facteurs avec la sylviculture, et de comparer le comportement de cette essence dans une région de plaine et une région de montagne.

Ces objectifs sont traités et exposés successivement.

Dans la première partie de ce mémoire nous présentons la région étudiée et l'échantillonnage réalisé pour cette étude.

La seconde partie est consacrée à l'étude des tendances à long terme de la croissance radiale.

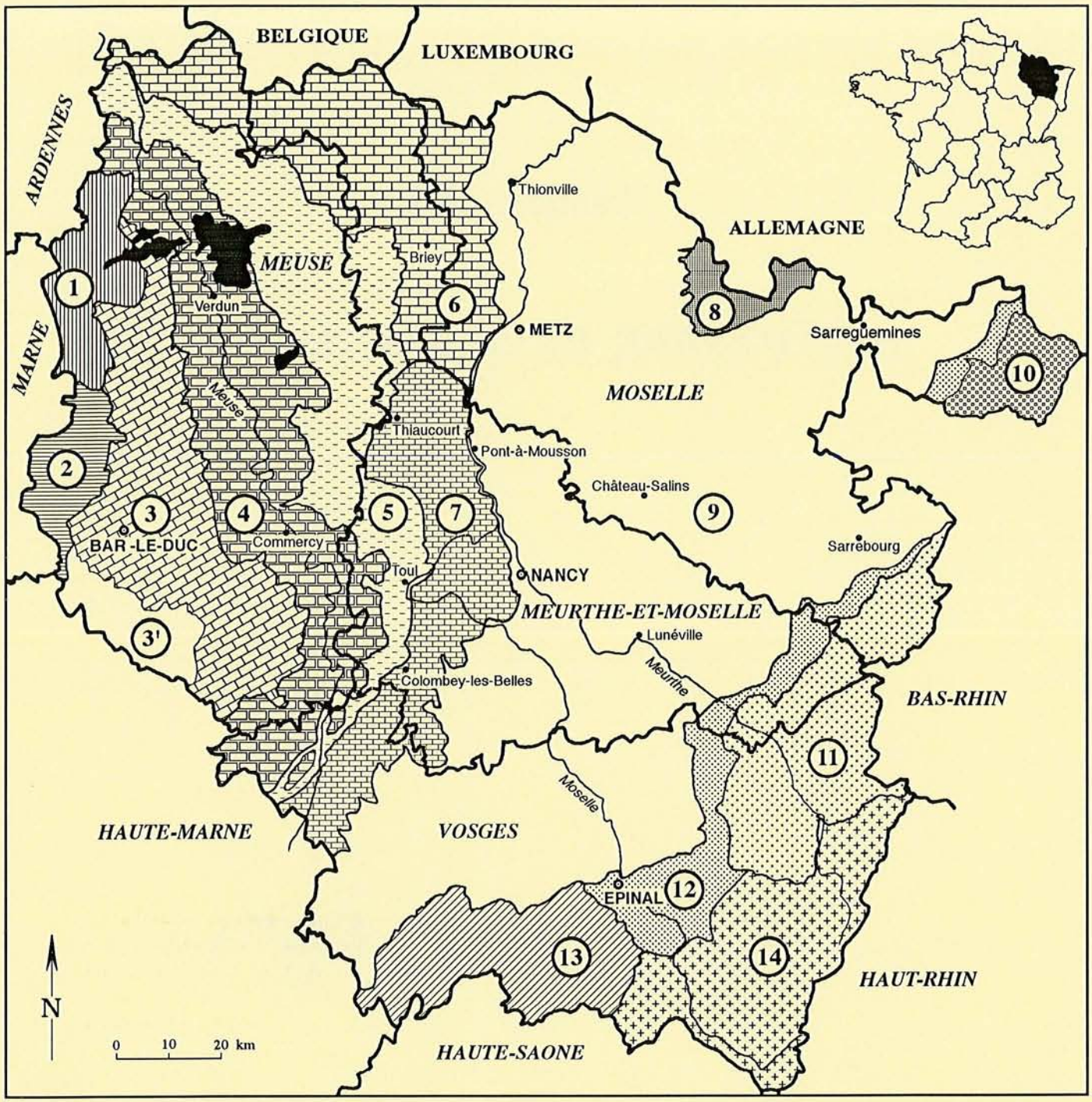
La troisième partie présente les résultats de l'étude dendroécologique, c'est-à-dire les relations existant entre la croissance et les facteurs environnementaux (types de stations, climat).

Enfin, la quatrième et dernière partie est consacrée à une synthèse et une discussion générale des résultats obtenus.

*Première partie*

# *AIRE D'ETUDE ET ECHANTILLONNAGE*

## Figure 2 : LES REGIONS FORESTIERES DE LORRAINE*




1 - Argonne
2 - Champagne humide
3 et 3' - Barrois et placages du Valanginien
4 - Côtes de Meuse
Zone Rouge
5 - Woëvre
6 - Pays-Haut
7 - Haye
8 - Warndt
9 - Plateau lorrain
10 - Basses-vosges gréseuses
11 - Hautes-vosges gréseuses
12 - Collines-sous-vosgiennes
13 - Vôge
14 - Vosges cristallines

* d'après le découpage de l'Institut Forestier National

# Chapitre I

# PRESENTATION DES PLATEAUX CALCAIRES DE LORRAINE

La Région Lorraine - composée par les quatre départements, Meuse, Moselle, Meurthe-et-Moselle et Vosges - peut être divisée en trois grandes régions, en fonction de la nature géologique des substrats et en fonction du relief (Timbal, 1979, 1980 ; Jacamon, 1983) :

- ***la Lorraine orientale*** est constituée par le versant lorrain du Massif Vosgien ; Vosges gréseuses au nord et Vosges cristallines au sud ;

- ***la Lorraine centrale***, s'étend de l'est de Nancy jusqu'au pied des Vosges. Elle comprend le plateau lorrain et la plaine sous-vosgienne correspondant respectivement aux affleurements argileux et marneux du Trias supérieur (Keuper) et moyen (Muschelkalk) ;

- ***la Lorraine occidentale*** est le Pays des Côtes : formations calcaires du Jurassique, qui s'étendent de Nancy jusqu'à la Champagne humide (Crétacé inférieur) et où est située la région des **"plateaux calcaires de Lorraine"** où nous avons travaillé. Les plateaux calcaires constituent une région naturelle très homogène et essentiellement tournée vers la production de bois. Nous allons en présenter les traits principaux.

## I - LE MILIEU PHYSIQUE

### 1 - Géologie et géomorphologie

Le Pays des Côtes, plus marqué topographiquement que la Lorraine centrale, s'organise en auréoles à faible pendage occidental (1 à 2°), où se succèdent par trois fois : une côte, un plateau de revers de côte, une plaine déprimée (Hilly & Haguenauer, 1979). Depuis la Dépression de Nancy, et en allant vers l'ouest, on passe successivement la Côte de Moselle, le Plateau de Haye, la Dépression de la Woëvre ; la Côte de Meuse, les Hauts de Meuse, la Dépression de l'Ornain ; la Côte des Bars, le plateau du Barrois et enfin la Champagne humide.

La région des "plateaux calcaires de Lorraine" exclut du pays des côtes certaines formations non calcaires, comme la dépression argileuse de la Woëvre (argiles du Callovien et de l'Oxfordien), les grès du Valanginien dans le Barrois ainsi que les fonds de vallées importantes qui reposent sur des formations argileuses ou des matériaux alluvionnaires (Becker *et al.*, 1980), (Figure 2).

La limite septentrionale de la région des plateaux calcaires coïncide avec le massif des Ardennes, c'est-à-dire avec la frontière franco-belge et avec le département de la Meuse. Au sud, les Côtes de Moselle et de Meuse se poursuivent en Bourgogne par le Plateau de Langre, mais en raison de modifications climatiques, la limite méridionale des plateaux calcaires de Lorraine est fixée aux limites du département de Haute-Marne.

## 2 - Les facteurs climatiques

Le climat régional est décrit sous le nom de "climat lorrain" (Godard, 1951 ; Dion, 1970 ; Timbal, 1979, 1980 ; Becker *et al.*, 1980). Il doit son originalité à des "luttes" d'influences climatiques, principalement celle du climat atlantique qui s'étend de l'Ouest de la France jusqu'au Bassin Parisien et celle du climat continental de l'Alsace et du sud de l'Allemagne. C'est un climat rude, où alternent des hivers longs, froids et gris et des étés peu ensoleillés mais pouvant être très chauds. Les températures moyennes sont relativement basses et les pluies, abondantes, bien réparties tout au long de l'année. Les vents forts sont rares mais les brouillards fréquents (Tableau 1).

| | Normales annuelles | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Température minimale | 5,0 °C | -2 | -1 | 1 | 3 | 7 | 11 | 12 | 12 | 9 | 6 | 2 | 0 |
| Température maximale | 14,0 °C | 4 | 6 | 10 | 14 | 18 | 22 | 23 | 23 | 20 | 15 | 8 | 5 |
| Record de froid (depuis 1951) | | -22 | -25 | -16 | -7 | -4 | 2 | 2 | 3 | -1 | -6 | -10 | -19 |
| Record de chaleur (depuis 1951) | | 15 | 20 | 23 | 28 | 33 | 34 | 38 | 36 | 33 | 27 | 21 | 18 |
| Ensoleillement journalier | 4 h 30 | 1,30 | 2,40 | 4,05 | 5,30 | 6,35 | 7,00 | 7,20 | 6,35 | 5,30 | 3,35 | 1,45 | 1,20 |
| Hauteur de pluie (mm) | 730 mm | 60 | 60 | 50 | 50 | 60 | 70 | 60 | 80 | 60 | 50 | 60 | 70 |
| Nombre de jours de gel | 83 | 18 | 15 | 14 | 6 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 9 | 16 |
| Nombre de jours de chaleur | 34 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 7 | 11 | 9 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| Nombre de jours entièrement gris | 69 | 14 | 8 | 5 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 12 | 16 |
| Nombre de jours de pluie | 171 | 17 | 14 | 15 | 14 | 15 | 14 | 13 | 13 | 12 | 12 | 16 | 16 |
| Nombre de jours de neige | 29 | 8 | 7 | 4 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 5 |
| Nombre de jours avec brouillard | 62 | 6 | 5 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 5 | 8 | 12 | 7 | 7 |
| Nombre de jours avec vent violent | 25 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 4 |

**Tableau 1** : Normales saisonnières calculées sur la période 1951 / 1980 à partir des données de la station météorologique de Nancy - Essey (D'après Kessler & Chambraud, 1990).

Depuis 1881 jusqu'à 1991, période pour laquelle nous disposons des données météorologiques de la station de Nancy - Essey, la somme des pluies annuelles ou les moyennes de températures n'ont pas évolué de façon significative. Entre ces deux dates, la température annuelle moyenne est de 9,68°C et la somme des pluies de 738 mm. L'année 1949 a été la plus sèche avec une somme de précipitation de 462 mm. A l'opposé, l'année 1882 a été la plus humide avec un bilan annuel de 1007 mm. Les records de froid et de chaleur ont été enregistrés respectivement pour les années 1887 et 1911 avec des moyennes annuelles de 7,51 et 11,19°C.

Aucune station météorologique ne se trouve sur les Côtes de Moselle. Les moyennes de températures et les hauteurs de pluie, calculées à partir des données climatiques enregistrées sur le plateau lorrain (à l'est de la dépression de Nancy), doivent donc être relativisées. Les côtes, en fonction de leur relief et de leur orientation générale par rapport aux vents dominants, exagèrent les caractéristiques du climat régional. Elles représentent des zones de plus forte pluviosité. Sur les côtes de Meuse, la somme annuelle des pluies semble comprise entre 900 à 1000 mm ; sur les Côtes de Moselle, entre 700 à 800 mm ; par contre, les dépressions de la Woëvre et de la vallée de la Moselle sont plus sèches avec une différence d'environ 150 mm par rapport aux côtes. Les côtes sont également plus froides, notamment en hiver, où les risques de gelée sont plus importants et plus longs (Dion, 1970). A titre d'exemple, Aussenac *et al.* (1981) notent qu'il existe des différences sensibles entre la station météorologique de Nancy-Essey et celle de l'arboretum d'Amance située à une dizaine de kilomètres à l'est de la première. Sur la période 1967-1979 la température moyenne observée à Amance a été inférieure de 0,4°C par rapport à celle de Nancy-Essey : cette différence est attribuée d'une part à la différence d'altitude entre les deux stations (on admet en effet un gradient de 0,5°C par 100 m, soit dans ce cas un déficit de 0,25°C) et d'autre part à la proximité de l'agglomération nancéienne. Ces deux remarques sont à prendre en considération en ce qui concerne les plateaux calcaires.

Enfin, la présence de falaises et de vallons, entaillant plus ou moins les plateaux, engendre des climats locaux qui dérivent, soit vers une thermophilie plus accentuée pour les revers de pente en exposition sud, soit vers des caractéristiques montagnardes pour les versants exposés au nord ou pour les fonds de vallons (Becker *et al.*, 1980).

## II - LE MILIEU FORESTIER

La Lorraine fait partie des régions les plus boisées de France avec un taux de boisement supérieur à 35% contre une moyenne nationale de 25,4%. La couverture forestière est globalement très liée aux grandes divisions géomorphologiques mais ce patrimoine singulier est également très en rapport avec l'histoire, tant nationale que régionale.

### 1 - Histoire de la forêt lorraine

Dion (1970) note que la forêt, dans cette région de climat rude, a fourni de tous temps le bois de chauffage indispensable à la vie des communautés rurales et urbaines, ce qui expliquerait pourquoi le défrichement est resté limité, même dans des zones très fertiles. Pourtant, la surexploitation des forêts a conduit à une grave crise à la fin du XVIII$^{e}$ siècle ; le bois étant alors le seul combustible domestique et industriel. Depuis le XIV$^{e}$ siècle jusqu'en 1830 la totalité de la fonte et de l'acier était fabriquée en France à partir de bois (Lafouge, 1991). En 1860, les hauts fourneaux utilisant le coke étaient encore minoritaires par rapport à ceux pratiquant la fonte au bois[1] . Ces énormes besoins en combustible ont conduit les forêts à un état déplorable après le XVIII$^{e}$ siècle et la période révolutionnaire. Il ne restait que très peu de futaies en France et le traitement en taillis-sous-futaie pauvre en gros bois était généralisé. Pourtant, à partir du milieu du XIX$^{e}$ siècle, les "protoindustries"[2] se détachèrent progressivement du bois et deux réformes vinrent sauver le patrimoine forestier : la création de l'Ecole Forestière de Nancy en 1824 et l'adoption du Code Forestier de 1827. Les forestiers de l'époque, comme Baudrillart, influencés par le modèle allemand, souhaitaient un aménagement scientifique et économiquement utile des forêts. Pressentant les transformations industrielles, Lorentz, premier directeur de l'Ecole, puis Parade préconisèrent la conversion des taillis en futaies pleines pour accroître le capital bois et augmenter le volume des bois d'œuvre (Lorentz & Parade, 1883).

Plus récemment, il est important de rappeler que les deux dernières guerres ont causé des dégâts considérables dans les forêts lorraines. Les forêts domaniales des Eparges, de Verdun et du Mort-Homme, qui ont été complètement dévastées en 1914-1918 (zone rouge, *cf.* Figure 2) ont été reboisées en conifères dans les années 1950, mais il reste encore beaucoup de forêts endommagées en Lorraine, malgré les efforts de recensement et de suppression des bois mitraillés (Figure 3). Les résultats de l'enquête menée par le Service Régional d'Aménagement Forestier en 1974, montraient qu'en Lorraine 29,7% de la surface boisée soumise, soit 168 753 hectares, étaient encore endommagés (Bach, 1975). Les dégâts sont de plusieurs types :

---

1 - En 1860, 43 hauts fourneaux fonctionnent au coke (33 dans la région de Briey- et 10 au Creusot), contre 120 qui fonctionnent encore au bois (50 en Haute-Marne, 42 en Haute-Saône, 28 dans la Meuse), Dion (1970). Un seul haut fourneau consommait le produit de 70 à 100 hectares de bois sans compter les industries annexes (l'auteur ne précise malheureusement pas la durée), (Plaisance, 1992). Badré (1983), rapporte que dans les cahiers de doléances de la commune d'Arrans (21) on reprochait à Buffon la construction de nouvelles forges, car elles consommaient annuellement 18000 à 20000 cordes de bois (1 corde correspondant à 3 ou 4 stères).

2 - La métallurgie comprend les hauts fourneaux, les feux d'affinerie, les ateliers d'épuration et de transformation (laminoirs, tréfileries, mouleries, etc). Divers artisanats relèvent de la métallurgie (chaudronneries, ferronnerie, fabrique de fer blanc, clouteries, fonderies diverses, etc). Parmi les industries et artisanats gros consommateurs de bois, nous pouvons citer également les salines de Lorraine qui procédaient par évaporation (Marsall, Moyenvic, Château-Salins, Salonnes, Dieuze, Rosière) ; les verreries et cristalleries lorraines (principalement dans la région de Darney et dans les Vosges) ; les poteries, tuileries, fabriques de céramiques et faïenceries (Lunéville) ; les fours à chaux, à plâtre, à salpêtre ; les distilleries (gemme dans les Vosges) ; tanneries ; etc ... (Plaisance, 1992). En Lorraine, cet auteur avance les chiffres de 71 usines métallurgiques, 75 verreries et 12 salines avant 1850.

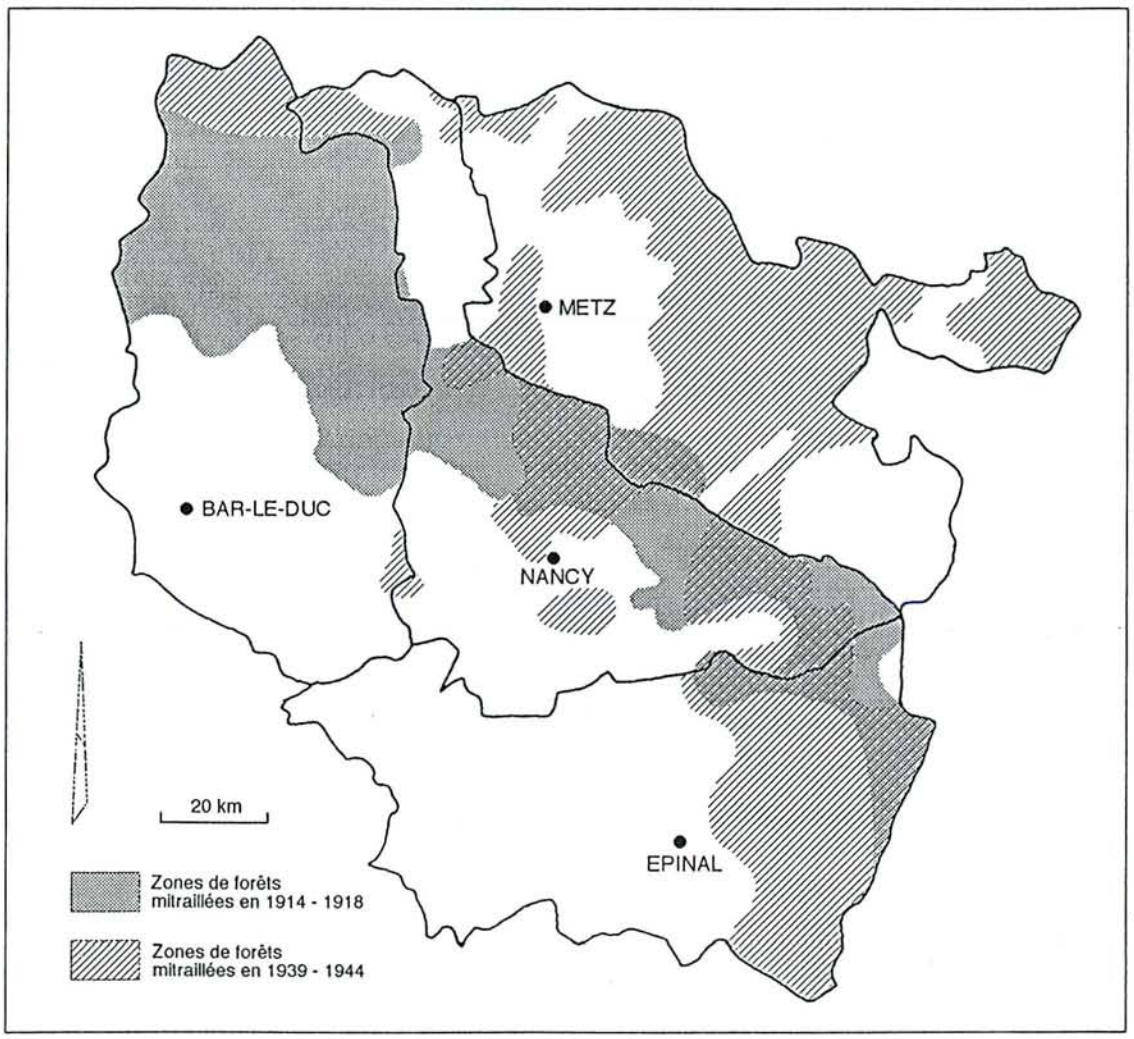



**Figure 3** : Les zones de forêts mitraillées en Lorraine (d'après Bach, 1975).

| | Nature des coupes à pratiquer en | | | |
|---|---|---|---|---|
| Périodes | **Première affectation** | **Seconde affectation** | **Troisième affectation** | **Quatrième affectation** |
| Attente | Coupes préparatoires | Taillis sous futaie | Taillis sous futaie | Taillis sous futaie |
| Première période | Coupes de conversion | Coupes préparatoires | Taillis sous futaie | Taillis sous futaie |
| Seconde période | Amélioration de la futaie | Coupes de conversion | Coupes préparatoires | Taillis sous futaie |
| Troisième période | id. | Amélioration de la futaie | Coupes de conversion | Coupes préparatoires |
| Quatrième période | id. | id. | Amélioration de la futaie | Coupes de conversion |

**Tableau 2**: Exemple d'un programme des opérations culturales étalé sur quatre périodes, en vue de la conversion d'une forêt divisée en quatre affectations (d'après Perrin H., 1954).

- la mitraille (éclats d'obus, projectiles divers, fils barbelés) déprécie très fortement le bois, d'autant plus qu'à l'heure actuelle il est très difficile de savoir si un fût sur pied est mitraillé ou non ;

- les sols ont été dégradés sur des surfaces variables d'une part, par l'impact de projectiles divers et d'autre part, par les réseaux de tranchées et autres ouvrages de protection. Il est d'ailleurs toujours possible de trouver en forêt des surfaces non déminées.

Enfin, la répartition des propriétés donne à la forêt lorraine un visage spécifique. Si, en France, les forêts soumises aux dispositions du code forestier de 1827 ne représentent que 26,6% de la surface boisée (10,5% pour les forêts domaniales et 16,1% pour les forêts communales), elles représentent 67,4% de la surface boisée de la Lorraine (Annexe 1). Les forêts domaniales proviennent à 54% des anciennes possessions des Ducs de Lorraine et de Princes divers, à 33% de possession ecclésiastique et 13% sont des acquisitions récentes comme la "zone rouge" de Verdun. Les forêts communales proviennent soit de possessions de très longue date, soit de l'attribution par l'état, après la domanialisation, des surfaces correspondant aux "droits d'usages" que les riverains possédaient dans les forêts Ducales ou Ecclésiastiques.

**2 - La conversion** (Lorentz & Parade, 1883 ; Guinier, 1947 ; Perrin H., 1952, 1954 ; Bourgenot, 1965)

Actuellement, deux types de sylviculture coexistent pour le hêtre dans le Nord-Est de la France. D'une part, cette espèce est aménagée en ***futaie régulière.*** Les peuplements correspondants sont sensiblement équiennes et le niveau de compétition entre les arbres est élevé tout au long de leur vie. Le hêtre est d'autre part géré de façon plus "traditionnelle" en ***taillis-sous-futaie.*** Ces peuplements comportent deux strates verticales différentes : une strate basse, le taillis, qui est exploité en quasi totalité tous les 25 à 30 ans, et une strate haute composée d'arbres peu nombreux (les "réserves"), qui poussent à un niveau de compétition très faible. Ces réserves sont maintenues pendant plusieurs rotations successives de taillis avant d'être récoltées. Selon Huffel (1927), l'origine de ce mode de traitement serait extrêmement ancienne. Il proviendrait de la coutume de réserver lors des coupes de taillis, certains sujets appelés baliveaux. Ce "balivage" était déjà considéré comme suivi depuis le XIV$^{ème}$ siècle dans les forêts royales puis étendu à toutes les forêts à partir du milieu du XVI$^{ème}$ siècle.

L'apparition progressive des futaies dans le paysage forestier lorrain s'est faite grâce à la "conversion". Les opérations de conversion consistent à obtenir un peuplement équienne et homogène (une futaie) à partir des semences produites par les arbres de réserve d'un taillis-sous-futaie. Les essences secondaires qui forment le taillis, comme le charme, le tilleul, les sorbiers, etc..., ne sont en général pas désirables en futaie : elles ne sont donc pas associées à la production de semences. Ceci implique, d'une part, d'avoir assez d'arbres semenciers de l'espèce que l'on veut mener en futaie et, d'autre part, d'éliminer le taillis pour que les semis de celui-ci, ou les rejets de souches trop vigoureux, ne concurrencent les semis de la future futaie. Les opérations de conversion s'effectuent en général en trois temps selon la méthode dite "***méthode classique***" inaugurée en 1820 par Lorentz en forêt d'Amance :

- les coupes de taillis-sous-futaie précédant la conversion ;
- les coupes (ou éclaircies) préparatoires à la conversion ;
- les coupes de conversion.

Lors de la **dernière coupe de taillis-sous-futaie**, un grand nombre de "baliveaux" de l'espèce désirée sont réservés : ils constitueront les porte-graines quand sera venu le moment de la régénération de la parcelle.

Vient ensuite une **période d'attente** pendant laquelle on laisse vieillir le peuplement de façon à préparer les semenciers à une bonne fructification au terme désiré et de façon à épuiser le taillis pour éviter les rejets indésirables par la suite. Pendant cette période, les opérations sylvicoles sont appelées coupes préparatoires. Dans chaque "cépée" de taillis, on élimine progressivement les brins de façon à obtenir petit à petit un "perchis sur souche" inapte à rejeter. Le maintien d'un taillis permet de surcroît de protéger le sol. Les futurs

semenciers sont dans le même temps sélectionnés pour qu'ils se développent normalement avec de larges cimes bien éclairées.

Au terme de la période de vieillissement, des **coupes de conversion** sont réalisées. Le taillis restant est plus ou moins éliminé en fonction de l'héliophilie des futurs semis ; les houppiers des porte-graines sont dégagés ; les essences secondaires sont éliminées ainsi que les sujets mal conformés. Ces opérations sont identiques à celles réalisées lors des coupes d'ensemencement en futaie et destinées à provoquer la naissance des semis de façon homogène et abondante.

Une seconde méthode de conversion des peuplements existe : c'est la "***méthode directe***". Cette pratique s'applique au cas des taillis-sous-futaie déjà enrichis dans le cadre du régime antérieur, ou comportant des débuts d'ensemencement prometteurs. Dans ce cas, les coupes préparatoires sont supprimées ainsi que la période d'attente.

Deux constatations peuvent alors être faites. Tout d'abord, la conversion sera d'autant plus facile que les peuplements initiaux de taillis-sous-futaie seront riches en réserves de l'espèce que l'on veut conserver dans la futaie et que les sols permettront une régénération abondante. Ensuite, pendant toute la période de transformation d'une parcelle de taillis-sous-futaie en futaie, un faible volume de bois sera extrait à chaque éclaircie et de ce fait aucun bénéfice ne pourra être dégagé. Ces deux remarques sont importantes pour comprendre la structure actuelle des peuplements en Lorraine.

Dans le cas des forêts domaniales, les opérations de conversion sont échelonnées dans l'espace et le temps de façon à étaler les coûts. Les massifs à convertir sont divisés en affectations (en général révocables) : dans la première on inclut les parcelles les plus riches en réserves et ayant les taillis les plus âgés si possible. Dans les affectations suivantes, on classe les parcelles par richesse en réserves décroissante. Les opérations de conversion commencent alors dans la première affectation alors que le traitement en taillis-sous-futaie est toujours appliqué dans les autres affectations avec cependant un début d'enrichissement en réserves (tableau 2).

Par contre, les communes, qui, en général, ne possèdent pas de grands domaines forestiers, furent longtemps réfractaires à la conversion d'une part, à cause d'un besoin toujours effectif de bois de feu et d'autre part, à cause de la perte financière provoquée par la non-extraction des bois pendant des périodes relativement longues.

La hêtraie des plateaux calcaires se présente actuellement ainsi :

- les plus vieilles futaies sont celles issues des premières conversions. Elles atteignent donc, au moins, l'âge de 120-130 ans. Cette durée étant égale à celle de la révolution du hêtre en futaie ; de nombreuses parcelles ont déjà été exploitées. Les régénérations en place sont alors trop jeunes pour être échantillonnées ;

- les peuplements encore gérés en taillis-sous-futaie sont quasiment inexistants en forêt domaniale puisqu'on arrive actuellement aux dernières périodes de conversion pour les dernières affectations. Quand ces peuplements existent, la densité des arbres formant la strate de futaie est très supérieure à celle existant dans les "vrais" taillis-sous-futaie ;

- les taillis-sous-futaies convenablement gérés subsistent uniquement dans les forêts communales, mais ils sont pour la plupart vieillissants car les besoins en bois de feu ont extrêmement diminué. Les dernières coupes de taillis-sous-futaie eurent lieu, en moyenne, dans les années 60 si on se réfère aux plans d'aménagements ;

- la fréquence des futaies augmente avec l'amélioration de la fertilité des stations et, parallèlement, la fréquence des taillis-sous-futaie diminue. La fructification et l'installation des semis sont en effet dépendants de la fertilité stationnelle (Becker *et al.*, 1977).

### 3 - Les régions forestières

La Lorraine est divisée en quatorze régions forestières (Figure 2), calquées sur les grandes unités géomorphologiques et d'inégale importance du point de vue de la couverture forestière (Annexe 1). Les zones les plus boisées sont celles qui constituent le massif vosgien. La surface des forêts de production représente 69% de la surface totale des Vosges, 65% si on y inclut les Collines-sous-vosgiennes. Viennent ensuite les quatre régions forestières des plateaux calcaires ( Barrois, Côtes de Meuse et Côtes de Moselle, ces dernières séparées en Pays-Haut et région forestière de Haye). Les Côtes de Meuse et la Haye sont les régions les plus boisées avec un taux de boisement de 39%. A l'opposé, la Woëvre et la Lorraine centrale (Plateau Lorrain, Warndt et Vôge) sont moins boisées avec des taux respectifs de 24 et 25%, ce qui correspond à la moyenne nationale.

Le hêtre est l'espèce la plus représentée en Lorraine ; c'est l'essence climacique (climax climatique), c'est-à-dire en équilibre avec le climat et le sol. Il compose en général la base de tous les peuplements, sur la plupart des types de sol et dans tous les étages de végétation. Le hêtre trouve en effet en Lorraine la forte humidité atmosphérique et les bonnes réserves hydriques qui lui sont nécessaires. Cependant, si les sols ne sont plus assez drainants, le hêtre est éliminé. Les chênaies-charmaies et les chênaies-frênaies remplacent alors les hêtraies : ce sont des climax édaphiques comme sur les argiles de la Woëvre ou du Plateau Lorrain.

Sur les plateaux calcaires, le hêtre est, de loin, l'essence dominante puisqu'il représente 45% des surfaces boisées de production (taillis simple non compris), contre seulement 28% pour les chênes sessile et pédonculé. La couverture de la hêtraie devrait encore être plus importante si elle n'avait pas subi les actions de l'homme. Le hêtre a été surexploité jusqu'au début du XIX$^{e}$ siècle en tant que bois de feu alors que les chênes ont été longtemps préférés, fournissant le bois d'œuvre et les glands, plus appréciés que les faines par les porcs "mis à la glandée" (Pardé, 1981). La gestion ancienne en taillis simple et taillis-sous-futaie a défavorisé le hêtre, d'une part, par rapport aux essences rejetant bien de souche (charme, chênes), et d'autre part, par rapport aux essences héliophiles et de caractère plus pionnier (chêne pédonculé, frêne, merisier), (Plaisance, 1979). Mathey (1929) note que le hêtre est éliminé du taillis quand les rotations sont inférieures ou égales à 20 ans, et qu'il ne peut être abondant que si les rotations sont de 40 ans et plus.

Les groupements climaciques de la hêtraie-chênaie des plateaux calcaires sont regroupés principalement dans deux sous-séries (Timbal, 1974, 1979, 1980) :

- la sous-série calcicole avec trois types de groupements selon l'épaisseur de l'argile de décarbonatation ;
  - le type xéro-thermophile sur calcaires superficiels (rendzines vraies ou peu brunifiées) ;
  - le type sur couche d'argile encore faible (rendzines brunifiées type) ;
  - le type neutro-basophile sur couche d'argile épaisse (sol brun calcique) ;

- la sous-série méso-neutrophile sur sols bruns à bruns lessivés.

# Chapitre II

# ECHANTILLONNAGE ET ARCHIVAGE DES DONNEES

## I - PREPARATION DU PLAN D'ECHANTILLONNAGE

Avant d'engager la phase d'échantillonnage, il était important de réfléchir aux contraintes qu'imposent les deux thèmes principaux définis pour notre étude, à savoir :

- caractériser l'évolution globale de la croissance radiale du hêtre depuis un siècle au moins en comparant des peuplements soumis à deux types de sylviculture ;

- préciser le statut écologique du hêtre, en particulier vis-à-vis du facteur hydrique ;

Le premier point sous-entend la comparaison de deux sous-échantillons équivalents où la variabilité stationnelle aura été minimisée. Pour comparer efficacement les niveaux de croissance des peuplements de futaie et de taillis-sous-futaie, les arbres doivent être choisis dans des milieux identiques. D'autre part, en fonction des protocoles d'analyse de la croissance radiale à long terme (notamment en ce qui concerne l'extraction de l'effet âge ; voir chapitre IV), il est nécessaire d'échantillonner une gamme d'âges la plus large possible dans chaque type de gestion.

Les contraintes d'échantillonnage qui découlent du second point de l'étude sont identiques à celles précédemment exposées. Elles doivent alors être appliquées à un grand nombre de types de stations.

Afin de préparer ce plan d'échantillonnage, une préétude, essentiellement bibliographique, a été entreprise. Les cartes au 25 000$^{ème}$ de l'Inventaire Forestier National (relevés de 1991), établies d'après l'interprétation de photos aériennes, nous ont permis de déterminer géographiquement la répartition des futaies et taillis-sous-futaie de hêtre. Les plans d'aménagement des forêts ont été utilisés afin d'apprécier la qualité et l'âge des peuplements. Une enquête a été menée au sein de l'Office National des Forêts afin de rechercher les peuplements rares et clairsemés, comme les très vieilles futaies ou les taillis-sous-futaie peu ou non vieillis. Les informations concernant les types de stations, les données édaphiques ou simplement géologiques ont été croisées avec celles concernant les types de peuplements. Pour le plateau de Haye, la carte pédologique de Gury (1972) a été utilisée. Enfin, une visite préalable des parcelles a été réalisée ainsi qu'une large prospection des massifs forestiers. Cette longue préétude nous a permis d'appréhender la hêtraie des plateaux calcaires dans son ensemble. Nous avons ainsi pu constater que les futaies et taillis-sous-futaie ne sont pas représentés de façon homogène sur tous les types de stations probablement en raison de l'histoire des conversions (*cf.* le chapitre V consacré à l'étude phytoécologique). Les futaies occupent actuellement les stations les plus productives et les taillis-sous-futaies non convertis subsistent dans les stations les plus pauvres, c'est à dire les stations les plus difficiles à régénérer.

Nous avons alors choisi de privilégier dans notre échantillonnage une gamme stationnelle commune aux différents types de peuplements, afin de pouvoir comparer au mieux les variations à long terme de la croissance entre la futaie et le taillis-sous-futaie. Ces types de stations sont les plus fréquents sur les côtes calcaires. Les lapiaz ou les sols très profonds sont rares et la situation topographique de plateau est de loin majoritaire par rapport aux versants et fonds de vallons. Puisque le hêtre est essentiellement présent sur ces plateaux, nous gardons une bonne image moyenne de la hêtraie des Plateaux Calcaires de Lorraine. Nous sommes cependant conscient que ce choix peut avoir limité notre capacité à étudier l'autécologie du hêtre, puisque les milieux extrêmes ont été sous-représentés dans notre échantillonnage.

Enfin, l'ensemble des plateaux calcaires devait initialement être échantillonné, mais la préparation d'un échantillon équilibré et représentatif de cette grande région naturelle n'a pas été possible dans les limites du temps qui nous était imparti. Nous avons préféré étudier un seul élément des plateaux calcaires, en l'occurrence les Côtes de Moselle et plus spécialement la région forestière de Haye, pour plusieurs raisons. Ceci nous permet de limiter les effets des gradients climatiques est-ouest et nord-sud, et de nous dégager des problèmes posés par les peuplements fortement dégradés par les deux guerres mondiales se trouvant principalement sur les Côtes de Meuse et au nord des Côtes de Moselle (Pays Haut), (Figure 2). La région forestière de Haye est constituée par de grands massifs forestiers déjà très étudiés et sur lesquels on dispose à présent de nombreuses informations (forêt domaniale de Haye, forêt domaniale de Puvenelle). C'est dans la région forestière de Haye que les premières conversions ont été réalisées ce qui nous permet d'avoir de vieilles futaies. Enfin la distribution des peuplements est à peu près équilibrée entre la futaie et le taillis-sous-futaie (Annexe 1).

## II - ECHANTILLONNAGE

### 1 - Choix des placettes et des arbres

Une visite préalable de la parcelle forestière est nécessaire pour vérifier si l'installation d'une placette est possible.

Une dizaine d'arbres (au minimum) doit pouvoir être sélectionnée parmi la strate dominante dans un peuplement homogène, en évitant les effets de lisière. Ces arbres ne doivent pas présenter de gros défauts, soit au niveau du tronc (gourmands, cicatrices, fourche basse, flexuosité trop accusée ou débutant trop près du sol), soit au niveau du houppier (houppier trop dissymétrique ou "en drapeau"), ni de maladie trop évoluée au niveau du tronc (chancre[1] chez les jeunes arbres, suintements[2] chez les adultes).

L'ensemble de ces dix arbres doit être inclu au sein d'une unité topographique et géomorphologique homogène (par exemple, pas de rupture de pente ou de dépression). La placette n'est donc pas forcément circulaire ; ce peut être un transect en rebord de plateau, selon les courbes de niveau d'une pente ou dans un fond de vallon. Les chemins, ornières de débardage, cloisonnements, places à feu sont évités autant que possible. Les parcelles fraîchement éclaircies sont exclues. Sur la placette, une surface de végétation floristiquement homogène doit pouvoir être délimitée sans ambiguïté. Si toutefois une hétérogénéité floristique est apparente et que le peuplement présente un intérêt, la surface échantillonnée est divisée en sous-placettes.

Dans le cas particulier des taillis-sous-futaie les contraintes d'échantillonnage sont les mêmes mais on recherche de surcroît des parcelles où les arbres dominants de la réserve ont des âges variés. La densité du peuplement ne doit pas non plus être trop élevée pour que les arbres soient dans des conditions de compétition les plus faibles possible. Les parcelles en cours de conversion et déjà bien enrichies sont donc évitées.

---

1 - Le chancre du hêtre est une déformation provoquée par un champignon ascomycète *Nectria ditissima* Tul. et localisée sur l'écorce des branches et du tronc. Son importance varie avec le milieu et le type de peuplement. Les attaques du pathogène sont d'autant plus fortes et fréquentes que la station est fertile. En taillis-sous-futaie, le hêtre disséminé dans un peuplement aux essences variées est rarement victime du chancre ; en futaie mixte, la fréquence du chancre augmente et dans les peuplements purs il constitue une grave menace pour les régénérations naturelles (Perrin, 1974, 1975, 1981 ; Perrin & Vernier 1979).

2 - Les suintements ne sont pas spécifiques d'une maladie unique. Ce sont des écoulements de sève oxydée par des fissures de l'écorce correspondant à une perte de son intégrité. Ces suintements apparaissent dans la maladie du "T", les attaques d'armillaire, les pullulations de scolytes mais aussi lors de l'attaque conjointe de la cochenille du hêtre *Cryptococcus fagisuga* et du champignon *Nectria coccinea* (Perrin, 1977 ; Abgrall & Soutrenon, 1991).

**2 - Description de la placette** (*cf.* annexe 2)

**2.1 - Caractéristiques topographiques**

Plusieurs descripteurs sont utilisés pour caractériser chaque site d'étude :

- ***les coordonnées géographiques*** de la placette (latitude et longitude), sont relevées sur la série des cartes au 25 000ème de l'Institut Géographique National ;

- ***une position topographique*** est donnée (plateau, rebord de plateau, haut de versant, versant, bas de versant, fond de vallon large ou étroit ...) ;

- ***la pente*** du site ainsi que ***son exposition*** sont mesurées respectivement à l'aide d'un dendromètre Blume-Leiss et d'une boussole. Les deux mesures sont exprimées en degrés ;

- enfin, ***un plan de la placette*** est relevé (position relative des arbres échantillonnés, emplacement de la fosse pédologique, accès à la placette, ...).

**2.2 - Caractéristiques pédologiques**

Au voisinage de chaque arbre, un sondage à la tarière pédologique est réalisé pour détecter une éventuelle hétérogénéité au niveau de la profondeur de sol facilement exploitable par les racines. Au centre de la placette, une fosse pédologique est ouverte le plus profondément possible en fonction de la nature du sol : soit jusqu'à la roche mère non ou peu fragmentée ; soit jusqu'à ce que l'enracinement des arbres ne soit plus perceptible. Dans le cas des sols très profonds, un sondage à la tarière est effectué au fond de la fosse. Le profil pédologique est décrit précisément en notant sur le terrain :

- le type d'humus (*cf.* annexe 3)
- la profondeur et l'épaisseur de chaque horizon ;
- le type de transition entre chaque horizon (régulière, progressive, ...) ;
- la texture de la terre fine (argileuse, limono-argileuse ...) ;
- la structure des agrégats (grumeleuse, anguleuse, polyédrique ...) ;
- le pourcentage et la nature des éléments grossiers (blocs de calcaire, galets de quartz ...) ;
- la taille (grosse, moyenne, fine) et la densité des racines (forte, moyenne, faible, nulle) dans chaque horizon ;
- la profondeur d'apparition d'une réaction effervescente à l'acide chlorhydrique ;
- le pourcentage, la taille et la couleur des taches d'oxydoréduction dues à des phénomènes hydromorphiques ;
- l'activité biologique dans les horizons (présence de vers de terre, de petits vertébrés ...).

Les différents horizons sont prélevés en vue de la détermination de leur couleur au laboratoire selon le code Munsell, après séchage à l'air ambiant et tamisage à 2 mm.

L'horizon $A_1$ est prélevé en au moins cinq points différents sur la placette, en vue d'une mesure de son pH (pH "eau" ; Baize, 1988).

Par la suite, un indice de réserve en eau est calculé pour chaque sol. L'indice de réserve utile $I_{ru}$, calculé en millimètres d'eau, est exprimé pour chaque horizon comme :

$$I_{ru} = Epaisseur\ de\ l'\ horizon \times Coefficient\ de\ texture \times \left(1 - \frac{\%\ d'\ éléments\ grossiers}{100}\right)$$

L'indice de réserve utile pour un sol est exprimé comme la somme des indices des différents horizons qui le constituent. Les coefficients de texture, ou valeurs des capacités de rétention de l'eau en fonction de la texture, varient beaucoup selon les auteurs. Après analyse bibliographique, Duhamel (1984) retient les coefficients suivants :

| Texture de la terre fine | Coefficient de texture |
|---|---|
| Sg | 0,38 |
| Sf ou SgL | 0,58 |
| LS | 0,77 |
| Ls | 0,85 |
| L | 1,00 |
| LSA | 1,00 |
| SA | 1,00 |
| Al | 0,90 |
| As | 0,85 |
| A | 0,80 |
| La | 1,15 |
| LA | 1,31 |

Sg = sable grossier, Sf = sable fin, S et s = sable, A et a = argile, L et l = limon.

### 2.3 - Caractéristiques floristiques

Sur chaque placette, un relevé floristique complet est réalisé sur une surface de 400 m² au minimum, ce qui correspond à l'aire minimale couramment admise pour les forêts collinéennes françaises. Cinq strates sont individualisées : muscinale ; herbacée ; arbustive basse ; arbustive haute ; arborescente. Les strates arbustives basses et hautes sont employées pour séparer, dans les taillis-sous-futaie, le taillis exploitable des autres arbustes ligneux qui n'en font pas partie.

Pour chaque strate un pourcentage de recouvrement au niveau du sol est donné.

Dans chaque strate, la végétation est inventoriée le plus exhaustivement possible et quantifiée par l'attribution d'un coefficient d'abondance-dominance (Braun-Blanquet, 1983) :

+ ; individus très peu abondants ;
1 ; individus peu abondants à abondants, recouvrement inférieur à 5% ;
2 ; individus abondants à très abondants, recouvrement compris entre 5 et 25% ;
3 ; individus en nombre variable, recouvrement compris entre 25 et 50% ;
4 ; individus en nombre variable, recouvrement compris entre 50 et 75% ;
5 ; individus en nombre variable, recouvrement supérieur à 75% ;

## 3 - Description des arbres

### 3.1 - Dendrométrie

Chaque arbre est soumis à une série de mesures et d'observations :

- *la circonférence* à 1,30 m est mesurée au mètre à ruban ;

- *les hauteurs* (de l'arbre, des premières grosses branches, de la base du houppier) sont mesurées à l'aide d'un dendromètre Blume-Leiss ;

- *la surface de projection du houppier* au sol est estimée à partir de la mesure de quatre rayons ($r_1$ à $r_4$), soit deux diamètres perpendiculaires ($d_1$ et $d_2$), le premier étant choisi dans le sens de l'élongation maximale du houppier : $Surface\,de\,projection = \frac{\pi}{4}\left(r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_4 + r_4 r_1\right) = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot d_2}{4}$

- ***l'angle des*** **premières** ***grosses branches*** part rapport au fût est relevé ;

- ***la distance*** séparant l'arbre choisi de son plus proche voisin de statut social comparable est mesurée ;

- ***la circonférence*** de ce plus proche voisin est relevée ;

- ***la concurrence en cime*** est estimée comme un pourcentage de la couronne en contact avec celle des arbres voisins ;

- ***le nombre de souches*** présentes dans le voisinage immédiat de l'arbre est noté ; leur âge est estimé (récente, ancienne, très ancienne) ;

Ces différentes mesures permettent de calculer d'autres variables :

- ***La longueur relative du houppier*** ou rapport exprimé en pourcentage entre la longueur du houppier et la hauteur totale de l'arbre ;

- ***le volume et la surface du houppier***, peuvent être calculés grâce à la longueur du houppier (lh) et à ses quatre projections au sol ($r_1$ à $r_4$). La cime est considérée comme la somme de chacun des quatre huitièmes d'ellipsoïde de révolution calculables avec les données de base :

$$Volume\,du\,houppier = \frac{\frac{4\cdot\pi}{3}(lh\cdot r_1\cdot r_2)}{8} + \frac{\frac{4\cdot\pi}{3}(lh\cdot r_2\cdot r_3)}{8} + \frac{\frac{4\cdot\pi}{3}(lh\cdot r_3\cdot r_4)}{8} + \frac{\frac{4\cdot\pi}{3}(lh\cdot r_4\cdot r_1)}{8}$$

$$Volume\,du\,houppier = \frac{\pi\cdot lh}{6}\cdot\left[(r_1r_2)+(r_2r_3)+(r_3r_4)+(r_4r_1)\right] = \frac{\pi\cdot lh\cdot d_1\cdot d_2}{6}$$

Pour chaque parcelle, des mesures de ***surfaces terrières*** (somme des sections des troncs par hectare de forêt) sont réalisées à l'aide du relascope de Bitterlisch : une mesure au centre de la placette et quatre mesures en périphérie. La surface terrière au niveau de la placette est alors exprimée comme la moyenne des cinq mesures. Dans le cas particulier du taillis-sous-futaie, seule la strate arborescente a été prise en compte.

### 3.2 - Carottage

Chaque arbre est carotté "à cœur" à l'aide d'une tarière de Pressler en évitant les éventuelles anomalies du tronc (méplat, empattement trop prononcé, cicatrice, ...) (Figure 4). Le carottage s'effectue dans une direction quelconque en situation de plateau et parallèlement aux courbes de niveau en situation de pente pour éviter les bois de compression ou de tension. Après extraction de l'échantillon, les sondages sont rebouchés sur toute leur longueur par un tourillon de hêtre traité au mercurothiolate de sodium (fongicide). La plaie est enfin noyée sous une couche de mastic horticole.

La tarière de Pressler couramment utilisée mesure 40 cm de long et 5 mm de diamètre intérieur. Pour certains arbres de taillis-sous-futaie, une tarière de 50 cm et d'un diamètre de 12 mm a dû être employée. Cependant, ces carottages "spéciaux" n'ont pas été généralisés (deux personnes sont en effet nécessaires pour enfoncer la tarière et trois pour la ressortir !).

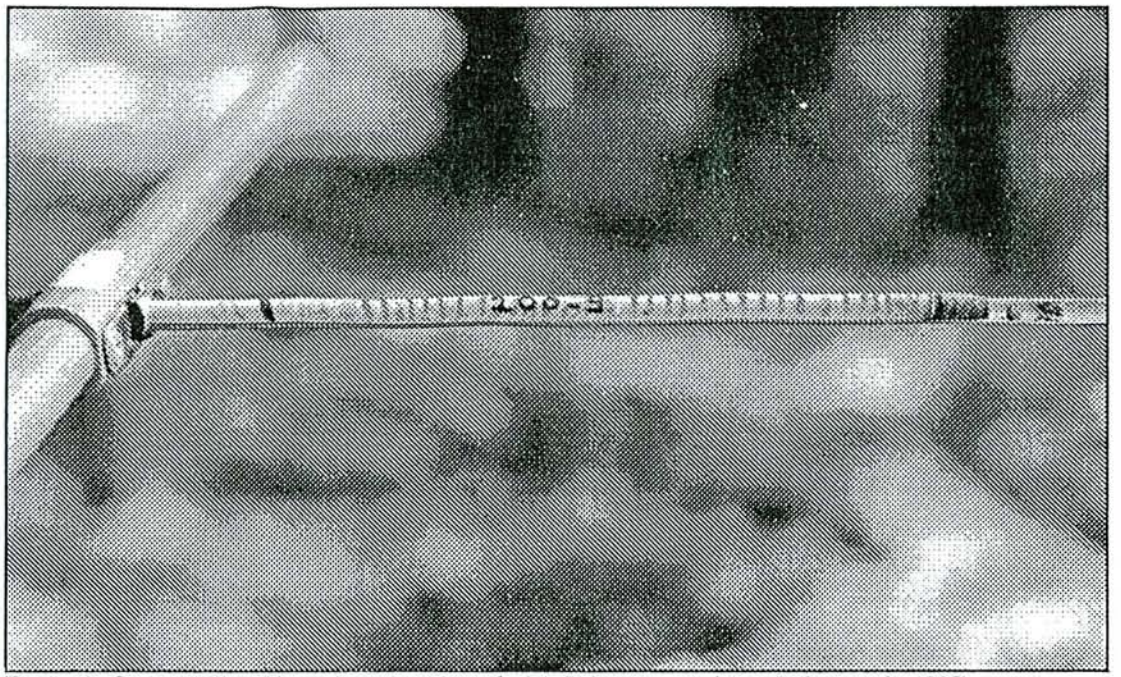


**Figure 4** : Carottage d'un *Pinus nigra* Arnold ssp. *laricio* Poiret var. *corsicana* (Lebourgeois, 1995)

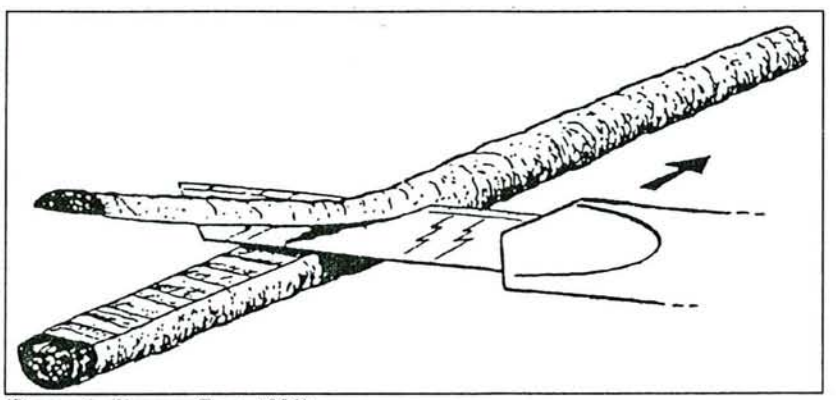


**Figure 5** : Planage (Bert, 1992)

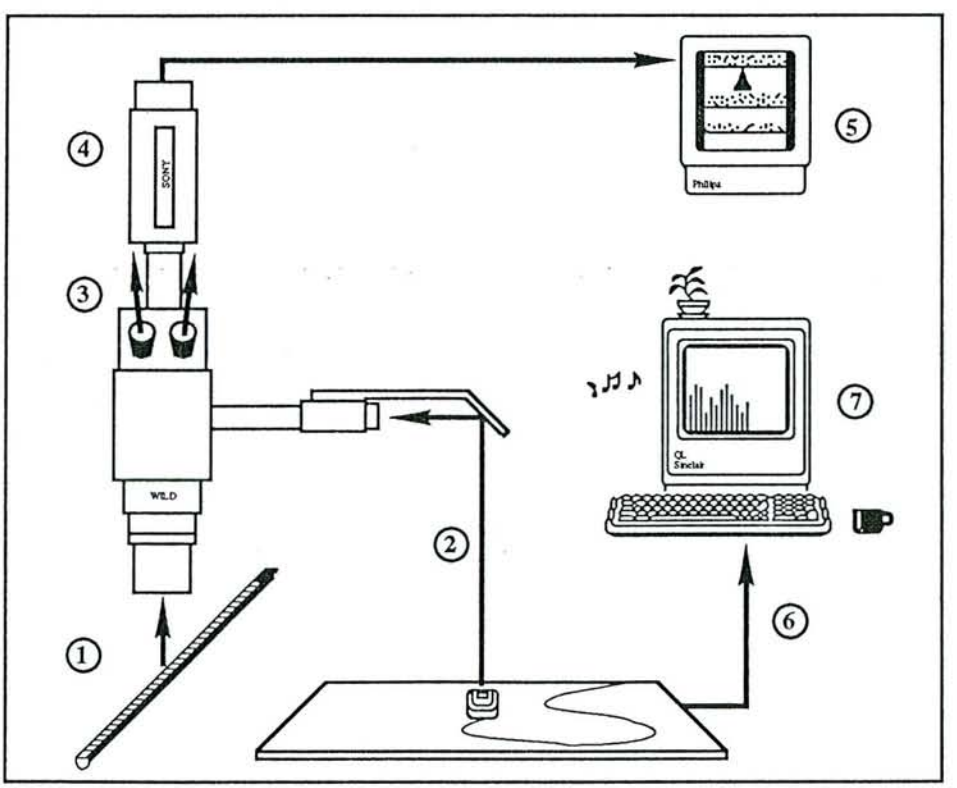



**Figure 6** : Saisie des largeurs de cernes. L'opérateur reçoit une image (3) où se superposent celle de la carotte (1) et celle du viseur de la souris (2). Cette image est transmise à un moniteur (5) via une caméra vidéo (4). Les mesures saisies sur la tablette à digitaliser sont transmises à un micro-ordinateur (6) où elles sont converties en largeurs de cernes réelles (7).

### 3.3 - Mesure des largeurs de cernes

#### 3.3.1 - Préparation des échantillons

La lecture des largeurs de cernes est possible uniquement lorsqu'une surface de mesure a été préparée par "planage" : les carottes de sondage sont tranchées en deux à l'aide d'un cutter selon un plan strictement perpendiculaire au fil du bois, après un trempage d'une heure en eau tiède (Figure 5). Cette méthode présente plusieurs avantages : elle est rapide ; elle ne patine pas le bois et les lumens des vaisseaux ne sont pas bouchés. Ces deux dernières raisons prennent une grande importance dans le cas du hêtre qui présente un bois homogène à pores nombreux et des vaisseaux de petit diamètre ; les cernes étant seulement soulignés par la présence d'une zone de fibres aplaties et à parois épaisses sur le bord extérieur de la zone de bois final (Venet, 1974).

Les décennies sont repérées sur chaque carotte afin de faciliter les futures opérations de mesure.

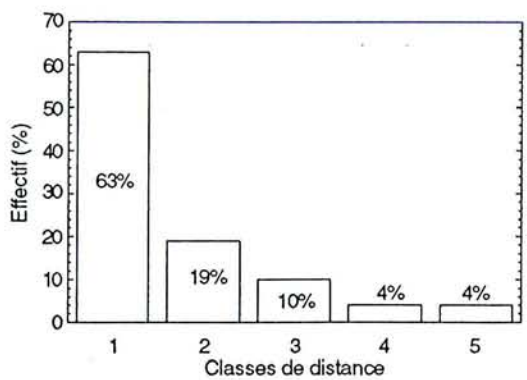



**Figure 7** : pourcentage de carottes par classe de distance au cœur. La classe 1 correspond aux carottes passant à moins de 5 mm du cœur ; la classe 2 correspond aux carottes passant entre 5 et 10 mm du cœur ; la classe 3, entre 10 et 15 mm ; la classe 4, entre 15 et 20 mm ; la classe 5 pour les carottes passant à plus de 20 mm du cœur.

#### 3.3.2 - Mesure des accroissements annuels

La largeur du bois initial et du bois final de chaque cerne est mesurée à l'aide d'un système vidéo-informatique asservi à un programme de saisie développé au laboratoire par M. Becker (Figure 6) :

- une loupe binoculaire permet d'agrandir l'image de la carotte de 16 à 40 fois ;
- l'image du viseur de la souris d'une table à digitaliser est superposée à l'image de la carotte par l'intermédiaire d'une chambre claire ;
- la mesure des cernes se fait par la saisie de points, à l'aide de la souris, à la transition des zones à mesurer ;
- la mesure, dépendante de l'échelle de grossissement, est convertie en largeur réelle au centième de millimètre près et encodée sur support informatique.

Outre les corrections et divers contrôles toujours possibles lors de la saisie, ce système très souple permet une mesure optimale des largeurs de cernes en suivant le fil du bois, c'est à dire toujours selon une direction strictement perpendiculaire au cerne.

Les mesures sont réalisées depuis l'écorce jusqu'au cœur. Le carottage a été réalisé de février 1992 à janvier 1993. Le cerne 1992 étant incomplet sur un grand nombre de carottes, les mesures ont débuté à partir du cerne élaboré en 1991.

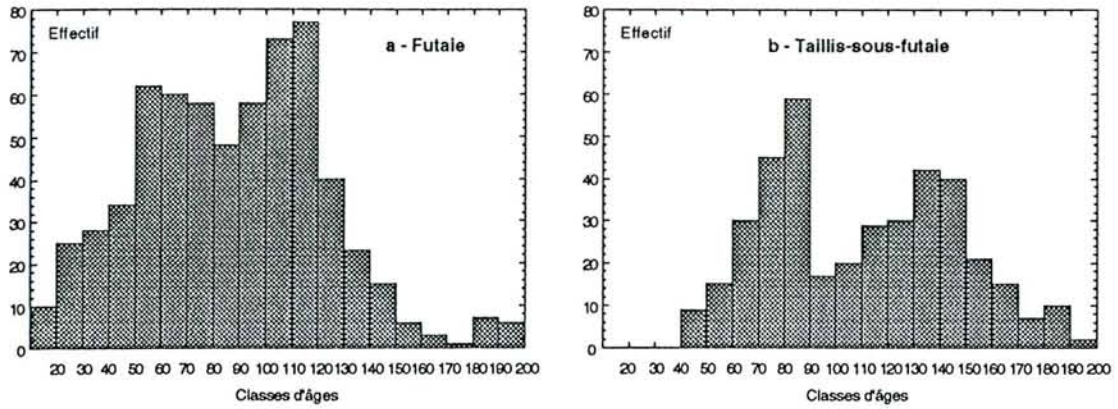



**Figure 8** : Effectif des arbres de futaie (a) et de taillis-sous-futaie (b) en fonction de l'âge à 1,30 m. L'échelle des abscisses indique les bornes supérieures et inclues des classes

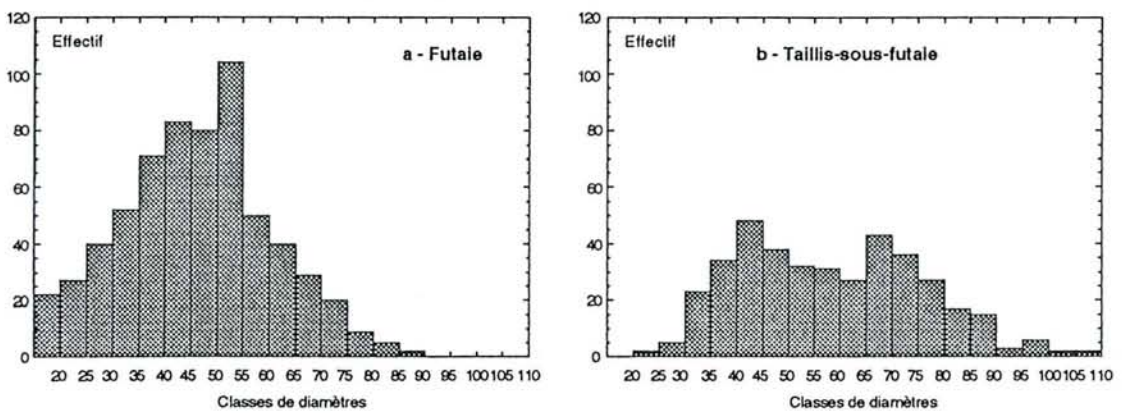



**Figure 9** : Effectif des arbres de futaie (a) et de taillis-sous-futaie (b) en fonction du diamètre (cm) à 1,30 m. L'échelle des abscisses indique les bornes supérieures et inclues des classes

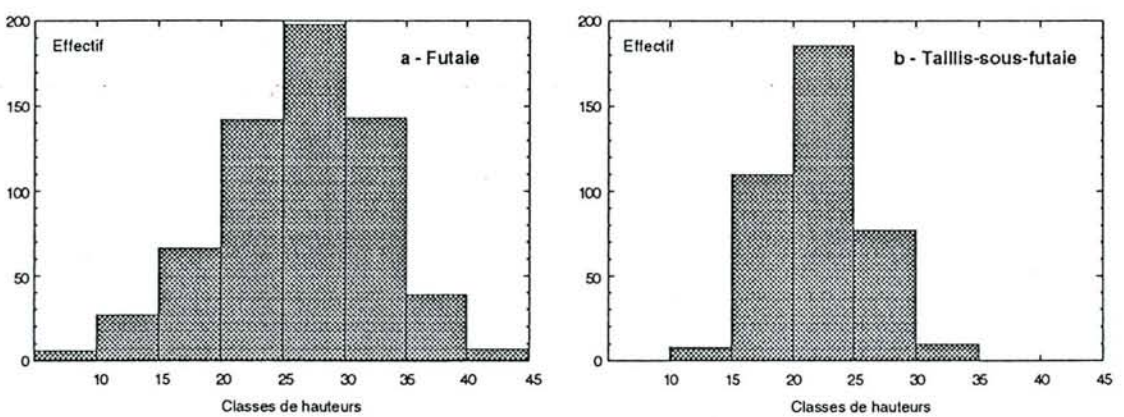



**Figure 10** : Effectif des arbres de futaie (a) et de taillis-sous-futaie (b) en fonction des hauteurs (m). L'échelle des abscisses indique les bornes supérieures et inclues des classes

Lorsque l'éprouvette de sondage ne traverse pas la moelle, l'estimation de l'âge de l'arbre peut sembler difficile. Il convient tout d'abord d'évaluer la distance séparant le cœur de l'arbre et le bord interne du dernier cerne mesurable près du cœur. Classiquement, on peut superposer à la carotte une mire transparente, où des cercles concentriques sont tracés. On recherche alors la position idéale de la carotte sous cette mire en faisant coïncider les rayons de courbure des cernes avec ceux des cercles de la mire (Liu, 1986). La distance séparant le bord de la carotte et le cœur présumé est mesurée. Cette technique, extrêmement pratique dans le cas de cernes larges et très contrastés, n'est pas applicable au hêtre pour les raisons inverses. Cependant, si les cernes sont peu contrastés chez le hêtre, les rayons ligneux sont bien visibles et assez longs. Depuis la moelle, ils irradient en étoile et dessinent des rayons parfaitement rectilignes. Ces rayons nous ont permis de mesurer l'éloignement du cœur en estimant graphiquement la position d'un point moyen de convergence de plusieurs rayons ligneux visibles sur la carotte, en direction du cœur présumé. Cette distance est alors convertie en nombre de cernes en divisant la longueur estimée par la largeur moyenne des cinq derniers cernes mesurés. Cette méthode permet de retrouver assez fidèlement l'âge de l'arbre à 1,30 m, mais ces cernes estimés seront exclus des analyses. Les erreurs pouvant être commises sur l'âge des arbres sont peu importantes car dans la majorité des cas la carotte passe très près du cœur (Figure 7) ; (nous pouvons rappeler que l'âge réel de l'arbre n'est jamais connu ; il s'agit ici de l'âge à la hauteur de 1,30 mètres).

### 3.3.3 - Transformation des accroissements annuels en surfaces

Pour étudier la dynamique de la croissance radiale, donc estimer l'évolution de la productivité des peuplements, les surfaces de cernes sont souvent préférées. Les accroissements annuels exprimés en surface terrière annuelle rendent mieux compte de la production de biomasse que les largeurs de cernes (Federer *et al.*,1989 ; Jordan & Locaby, 1990 ; Briffa, 1992). D'un point de vue purement géométrique, les surfaces minimisent les effets du vieillissement (Becker et al., 1994b).

La surface d'un cerne d'âge *a* correspond à la surface terrière de l'arbre à l'âge *a* moins la surface terrière de l'arbre à l'âge (*a-1*), soit :

$$S_{ca} = \pi \cdot (R_{a-1} + l_{ca})^2 - \pi \cdot R_{a-1}^2 \text{ ou } S_{ca} = \pi \cdot l_{ca} \cdot (2 \cdot R_{a-1} + l_{ca})$$

avec :
$S_{ca}$ surface du cerne d'âge a ;
$R_{a-1}$ rayon de l'arbre à l'âge (a-1) ;
$l_{ca}$ largeur du cerne d'âge a.

En effectuant ce calcul, on admet la cylindricité des fûts et le centrage parfait du cœur. Ceci n'est évidemment pas toujours le cas mais le grand nombre d'arbres échantillonnés nous permet cette approximation statistique.

## 4 - Structure de l'échantillon

Au total, 102 placettes ont été décrites et 1025 arbres échantillonnés, soit 63 placettes de futaie avec 634 arbres et 39 placettes de taillis-sous-futaie avec 391 arbres.

Cet ensemble correspond à 93971 cernes annuels : 53095 en futaie et 40876 en taillis-sous-futaie.

Les arbres de futaie sont âgés de 11 à 203 ans avec des circonférences de 31 à 275 cm et des hauteurs de 9,5 à 44 m. Les arbres de taillis-sous-futaie ont entre 39 et 196 ans ; leur circonférence varie de 53 à 350 cm et leur hauteur de 11,5 à 35 m (Figures 8, 9 et 10).

| etude | | | |
|---|---|---|---|
| **responsable** | **nom du responsable** | **caractère** | |
| localisation | localisation de la région étudiée | caractère | |
| annee | date du début de l'étude | date | |
| nbcarotte | nombre de carottes prélevées par arbre | réel | |
| dircarotte | direction de prélèvement des carottes | caractère | |
| unitmescer | unité de mesure des cernes | caractère | |
| unitloc | unité de localisation des placettes | caractère | degré, grade ... |
| typemesunit | type de mesure de l'unité de localisation | caractère | |
| unitmespente | unité de mesure de la pente | caractère | degré, % |
| typemeshoup | type de mesure de projection du houple | caractère | |
| typeveg | description des strates de végétation | caractère | |
| methbase | méthode de mesure des bases | caractère | à pH 7, au pH du sol |

| cerne | | | |
|---|---|---|---|
| **nocarotte** | **numéro de la carotte** | **entier** | |
| **annee** | **année de formation du cerne** | **entier** | **< 1999** |
| _age | age cambial du cerne | entier | 1 à1000 |
| position | numéro du cerne à partir de l'écorce | entier | 1 à1000 |
| largini | largeur du bois initial | réel | |
| largfin | largeur du bois final | réel | |
| largtot | largeur totale du cerne | réel | |
| stini | surface du bois initial | réel | |
| stfin | surface du bois final | réel | |
| sttot | surface totale du cerne | réel | |

| carotte | | | |
|---|---|---|---|
| **nocarotte** | **numéro de la carotte étudiée** | **entier** | |
| noarbre | numéro de l'arbre étudié | entier | |
| noinra | second numéro (facultatif) | caractère | |
| annee | date de prélèvement | date | < 31/12/99 |
| direction | direction de prélèvement de la carotte | caractère | N-S-E-W |
| hauteur | hauteur de prélèvement | réel | 0 à 15 m |
| distcoeur | distance au cœur | réel | mm |
| nbcercoeur | nombre de cernes jusqu'au cœur | entier | |
| ecorce | épaisseur de l'écorce | réel | 0 à 100 mm |
| largaubier | largeur du bois d'aubier | réel | 0 à 200 mm |
| nbceraubier | nombre de cernes dans l'aubier | entier | |
| torsion | couple de torsion | réel | 0 à 1000 cm.kg |
| typetar | type de tarière utilisée | caractère | dur, tendre |
| interdat | interdatation réalisée ou non | caractère | oui, non |

| arbre | | | |
|---|---|---|---|
| **noarbre** | **numéro de l'arbre étudié** | **entier** | |
| noplac | numéro de placette | entier | |
| codespe | code de l'espèce | caractère | 4 lettres |
| noinra | second numéro (facultatif) | caractère | |
| hauteur | hauteur de l'arbre | réel | 0 à 60 m |
| hthoup | hauteur de la base du houpier | réel | 0 à 40 m |
| htbra | hauteur des premières grosses branche | réel | 0 à 40 m |
| diam | diamètre de l'arbre | réel | 0 à 200 cm |
| stsocial | statut social | caractère | dominant ... |
| concime | concurence en cime | réel | 0 à 100 % |
| distvois | distance au plus proche voisin | réel | 0 à 50 m |
| projhoup1 | projection du houpier (direction 1) | réel | 0 à 10 m |
| projhoup2 | projection du houpier (direction 2) | réel | 0 à 10 m |
| projhoup3 | projection du houpier (direction 3) | réel | 0 à 10 m |
| projhoup4 | projection du houpier (direction 4) | réel | 0 à 10 m |
| defolia | pourcentage de défoliation | réel | 0 à 100 % |
| jauniss | pourcentage de jaunissement | réel | 0 à 100 % |
| nbgeaig | nombre de génération d'aiguilles | réel | |

| placette | | | |
|---|---|---|---|
| **noplac** | **numéro de la placette étudiée** | **entier** | |
| latplac | latitude | réel | |
| longplac | longitude | réel | |
| altplac | altitude | réel | |
| nomcom | nom de la commune | caractère | |
| nomforet | nom de la forêt | caractère | |
| noign | numéro de carte IGN | caractère | |
| pente | pente de la placette | réel | degré ou % |
| expos | exposition | caractère | N,S,E,W |
| positopo | position topographique | caractère | |
| masque | masque | réel | degré ou % |
| indrad | indice de climat radiatif | réel | 0 à 2 |

| dataplac | | | |
|---|---|---|---|
| **noplac** | **numéro de placette** | **entier** | |
| **datplac** | **date de l'étude** | **date** | |
| noinra | second numéro de placette (facultatif) | caractère | |
| noserie | numéro de série | entier | |
| noparcel | numéro de parcelle | entier | |
| traitsyl | type de traitement sylvicole | caractère | futaie ... |
| surfrel | surface du relevé | réel | 0 à 1000 m2 |
| typestation | type de station | caractère | |
| siteclim | site climatique | caractère | |

| datastra | | | |
|---|---|---|---|
| **noplac** | **numéro de placette** | **entier** | |
| **datplac** | **date du relevé** | **date** | |
| **strate** | **strate rencontrée** | **caractère** | **herbacée ...** |
| _recouvrt | taux de recouvrement | réel | 0 à 100 % |

| espece | | | |
|---|---|---|---|
| **codespe** | **code espèce du végétal** | **caractère** | **4 lettres** |
| _nomlat | nom scientifique latin du végétal | caractère | |
| nomaut | nom de l'auteur | caractère | |
| nomfran | nom scientifique Français du végétal | caractère | |
| N | azote | entier | coefficients d'Ellenberg |
| lum | lumière | entier | |
| eau | eau | entier | |
| continent | continentalité | entier | |
| pH | pH | entier | |
| temp | température | entier | |
| typesp | type | caractère | herbacée ... |

| synonyme | | | |
|---|---|---|---|
| **nomlat** | **nom latin synonyme** | **caractère** | |
| nomaut | nom de l'auteur | caractère | |
| codespe | code de l'espèce | caractère | 4 lettres |

| dataesp | | | |
|---|---|---|---|
| **noplac** | **numéro de placette** | **entier** | |
| **datplac** | **date du relevé** | **date** | |
| **strate** | **type de strate** | **caractère** | **herbacée ...** |
| **codespe** | **code espèce** | **caractère** | **4 lettres** |
| abon_dom | coefficient d'abondance-dominance | caractère | +, 1, 2, 3, 4, 5 |

| siteclim | | | |
|---|---|---|---|
| **siteclim** | **nom de la station météo** | **caractère** | |
| perval | période couverte par les données mét | caractère | |
| latsite | latitude de la station | réel | |
| longsite | longitude de la station | réel | |
| altsite | altitude de la station | réel | m |

| dataclim | | | |
|---|---|---|---|
| siteclim | nom de la station météo | caractère | |
| **anclim** | **année du relevé** | **entier** | **1800 à 2000** |
| **mclim** | **mois du relevé** | **entier** | **1 à 12** |
| Tmin | température minimale | réel | -50 à +20 °C |
| Tmax | température maximale | réel | -10 à +50 °C |
| Tmoy | température moyenne | réel | -20 à +30 °C |
| pluvio | pluviométrie | réel | 0 à 500 mm |

| datasol | | | |
|---|---|---|---|
| **noplac** | **numéro de placette** | **entier** | |
| **datsol** | **date du relevé pédologique** | **date** | |
| typesol | type de sol | caractère | brun lessivé ... |
| formatsuperf | formation superficielle | caractère | limons éoliens ... |
| rochemere | roche mère | caractère | granit ... |
| typehumus | type d'humus | caractère | mull eutrophe ... |
| resutile | réserve utile | réel | 0 à 2000 mm |
| hydromorph | degré d'hydromorphie | caractère | faible, moyenne ... |
| profdecarb | profondeur de décarbonatation | caractère | 0 à 200 cm |

| horizon | | | |
|---|---|---|---|
| **noplac** | **numéro de placette** | **entier** | |
| **datsol** | **date du relevé** | **date** | |
| **horizon** | **nom de l'horizon** | **caractère** | |
| profondeur | profondeur | réel | 0 à 300 cm |
| epaisseur | épaisseur | réel | 0 à 200 cm |
| transition | transition | caractère | nette ... |
| texture | texture | caractère | argileuse ... |
| structure | structure | caractère | polyhédrique ... |
| pierrosite | pierrosité | caractère | % ou faible ... |
| argile | pourcentage d'argile | réel | 0 à 100 % |
| limonf | pourcentage de limon fin | réel | 0 à 100 % |
| limong | pourcentage de limon grossier | réel | 0 à 100 % |
| sablef | pourcentage de sable fin | réel | 0 à 100 % |
| sableg | pourcentage de sable grossier | réel | 0 à 100 % |
| coulmun | couleur selon le code Munsell | caractère | |
| coulsubj | couleur subjective | caractère | |
| actibiol | activité biologique | caractère | |
| racine | enracinement | caractère | |
| surfoxred | pourcentage de taches d'oxydoréducti | réel | 0 à 100 % |
| tailoxred | taille des taches d'oxydoréduction | caractère | |
| ph_H2O | pH eau | réel | 1 à 12 |
| pH_KCl | ph KCl | réel | 1 à 12 |
| Ca | taux de calcium | réel | meq/100g |
| Mg | taux de magnésium | réel | meq/100g |
| P | taux de potassium | réel | meq/100g |
| Mn | taux de manganèse | réel | meq/100g |
| Ph | taux de phosphore | réel | meq/100g |
| Al | taux d'aluminium | réel | meq/100g |
| S | taux de saturation (S) | réel | |
| T | capacité d'échange totale (T) | réel | meq/100g |
| SdivT | 100*S/T | réel | 0 à 100 |
| Ccarbon | taux de carbone | réel | 0 à 100 % |
| N | taux d'azote | réel | 0 à 100 % |
| CdivN | rapport C/N | réel | |
| MO | taux de matière organique | réel | 0 à 100 % |
| effervesc | intensité de l'effervescence à HCl | caractère | O/N, forte ... |
| CaCO3 | taux de calcaire | réel | 0 à 100 % |

**Tableau 3** : Liste des variables définies dans la base de données (code, nom de la variable, type, unité et bornes). Les variables en gras sont des clefs de concordance entre les différentes tables.

## III - CREATION D'UNE BASE DE DONNEES

### 1 - Introduction

Comme nous venons de le voir, une étude phytoécologique, et *a fortiori* dendroécologique, fournit d'énormes quantités de données. La gestion, et surtout la conservation à long terme de ces données devient alors une question fondamentale. Jusqu'à présent, les données de base des différentes études étaient encodées et traitées à l'aide de logiciels divers conçus pour la plupart au sein du laboratoire. Le stockage était fait sur différents systèmes informatiques dans de gros fichiers indépendants ou, au pire, sur des listings ou des cartes perforées en ce qui concerne les plus anciennes études floristiques. La compatibilité des différents dossiers n'étaient donc pas évidente, pas plus que leur pérennité.

Dans le souci d'améliorer la vitesse et la souplesse des analyses et des interrogations de données, et dans le souci de conserver ces données à long terme, un projet de mise au point et d'optimisation d'une base de données relationnelle a été lancé.

Trois niveaux de contraintes ont dû être pris en compte :

→ contraintes liées à la nature des études ;

- prévoir un catalogue exhaustif des variables à définir dans la base afin de pouvoir insérer sans problème les études antérieures et de ne pas être limité lors des études futures ;
- prévoir une gestion historique des différents relevés ; en effet, sur un site géographiquement déterminé, on peut être amené à réaliser plusieurs relevés à des dates différentes (étude diachronique de la végétation par exemple, Thimonier, 1994).

→ contraintes liées à l'optimisation de l'utilisation de la base ;

- ne pas créer une table démesurée. Sur une "placette", sont regroupées en principe toutes les données relatives à la végétation, le sol et la dendrométrie ; mais afin de clarifier et de regrouper les données en thèmes, plusieurs tables devaient être constituées ;
- prévoir des processus de saisie de données simplifiés et soumis à différents contrôles ou calculs.

→ contraintes informatiques ;

- évaluer la taille de la base ;
- créer les divers éléments de la base ;
- créer des index, petites tables servant à ordonner les autres tables. Ils optimisent, d'une part, les temps de recherche et limitent les accès disque, et d'autre part, assurent l'unicité des lignes d'une table ;
- créer des "clusters" dont le rôle est de regrouper les tables utilisées dans une même zone de stockage du disque. Cette méthode permet de réduire l'espace de stockage en ne gardant qu'une seule copie des données identiques dans des tables ou des enregistrements liés.

```
                              MENU PRINCIPAL

   Pour chaque table, les actions suivantes peuvent être realisees :
   visualiser, inserer, modifier, supprimer

   Choisissez une table parmi la liste proposee :

 0 - Identification de l'etude        8 - Description du sol
 1 - Donnees cernes                   9 - Description des horizons
 2 - Donnees carottes                10 - Abondance / dominance des especes
 3 - Donnees arbre                   11 - Donnees strates
 4 - Placette : donnees fixes        12 - Station meteorologique
 5 - Placette : donees variables     13 - Donnees climatiques
 6 - Caractéristique des espèces     14 - Interdatation (par insertion)
 7 - Listes des synonymes            15 - Interdatation (par suppression)

                  Entrez le numero correspondant a votre choix :
                  puis "enter".
                                                  "F4" pour sortir

   Char Mode: Replace Page 1                              Count: *0
```

**Figure 12** : menu principal de la base de données dendroécologique donnant accès aux tables où l'on désire travailler.

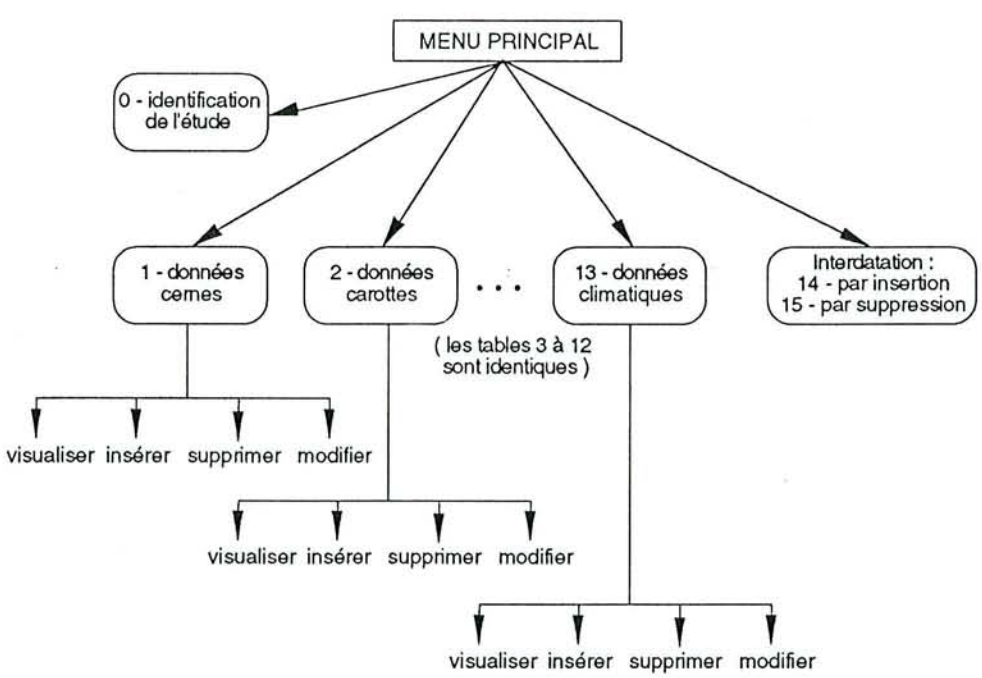



**Figure 13** : Diagramme de l'organisation générale des tables.

### 2 - Conception

La base de données dendroécologique a été développée sous ORACLE. ORACLE est un Système de Gestion de Base de Données Relationnelle utilisant le langage SQL (Bond, 1991 ; Cheu & Linden 1990 ; Colston 1989 ; Moran & Dimmick 1989). La création des divers éléments de la base et son optimisation ont été assurées par un étudiant D.E.S.S. Informatique Double Compétence (Laurent, 1992).

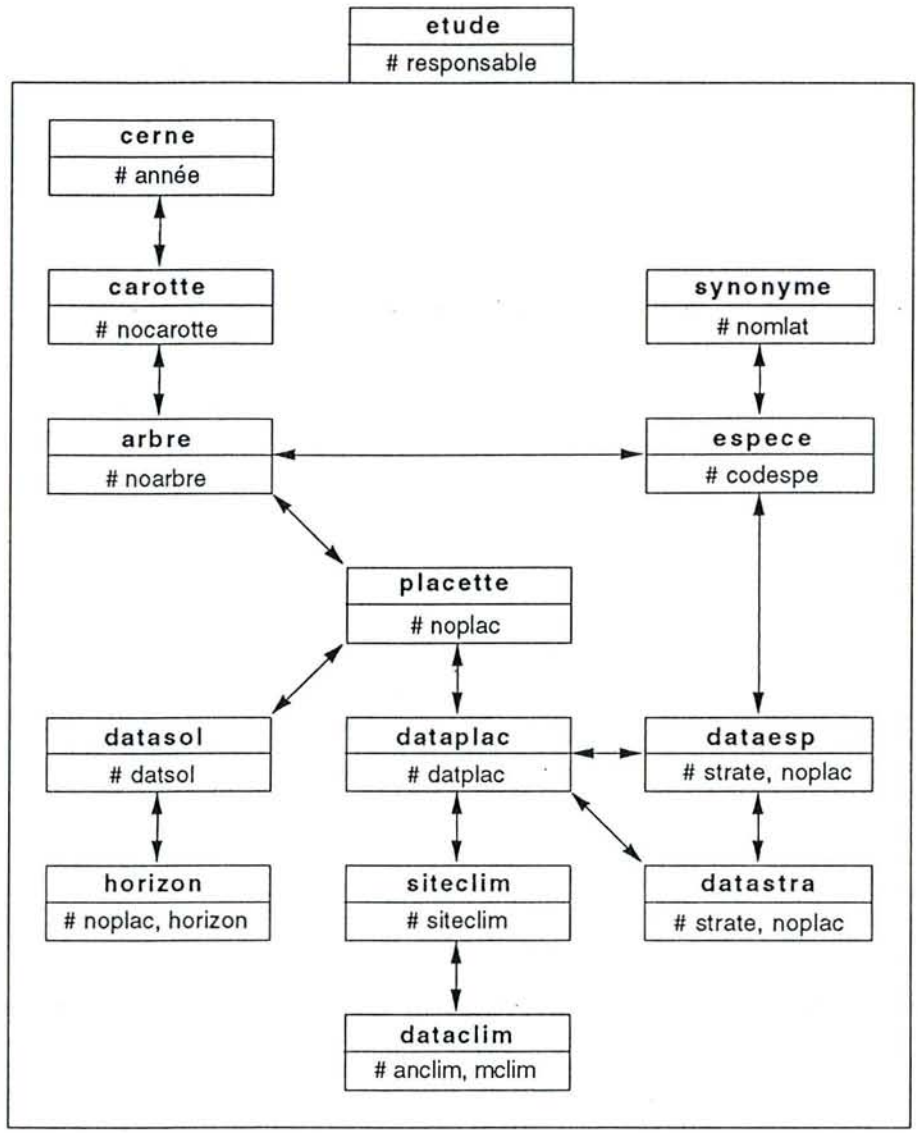



**Figure 11**: Schéma entité association

### 3 - Présentation

Le tableau 3 et la figure 11 présentent l'ensemble des tables définies dans la base avec les variables spécifiques et les variables servant de lien entre les tables.

Chaque placette d'étude est localisée géographiquement de façon invariable par sa longitude, sa latitude, son altitude, sa situation topographique ... ; ces données sont enregistrées dans la table **placette**. Certains paramètres peuvent évoluer avec le temps (numéro de parcelle, surface étudiée, traitement sylvicole ...) ; ces données sont enregistrées dans la table **dataplac**.

Sur une placette, un relevé de végétation peut être réalisé à une date donnée et refait à une date ultérieure. Pour chaque strate de végétation (table **datastra**), un relevé comprend une liste d'espèces ; chaque espèce étant affectée d'un coefficient d'abondance-dominance (table **dataesp**). Le nom latin de l'espèce peut être soumis à des évolutions de nomenclature au cours du temps ; à chaque espèce répertoriée dans la table **espece** peuvent être liés des synonymes dans la table **synonyme**. Les noms "actuels" d'espèces sont ceux employés par Tutin *et al.* dans Flora Europaea pour les plantes à fleurs et par Rameau *et al.* (1989) dans la Flore Forestière Française pour les mousses et les fougères. A chaque espèce végétale est associé un code permanent de quatre lettres dans la table **espece**.

Chaque site peut être soumis à une description pédologique simple (type de sol, roche mère, ...) ou plus complexe (description des horizons, analyses chimiques ...). Comme les relevés de végétation, les relevés pédologiques peuvent être refaits à des dates différentes. Ces informations sont stockées dans les tables **datasol** et **horizon**.

Chaque placette peut être rattachée à un poste météorologique (table **siteclim**) et à une somme de données climatiques (table **dataclim**).

Un ensemble d'arbres peut être associé à un site précédemment décrit. Chaque individu est caractérisé par sa hauteur, son diamètre, son état de concurrence, son état sanitaire ... (table **arbre**). Une ou plusieurs éprouvettes de sondage peuvent être réalisées sur chaque arbre, à une certaine hauteur, selon une direction donnée (table **carotte**). Sur chaque carotte sont mesurées des largeurs (largeur du bois initial, du bois final, du cerne complet ...) qui sont fonction de l'année d'élaboration du cerne et de l'âge de l'arbre lorsque ce cerne a été édifié (table **cerne**).

Chaque étude est réalisée par un auteur, dans une région donnée, etc., ces informations générales sont stockées dans une table **etude**.

Au total, l'encodage de 144 variables différentes a été prévu. Ce nombre n'est pas une limite ; d'autres champs de saisies peuvent être créés au besoin.

Deux modules spéciaux ont été ajoutés à la base. Ils permettent la manipulation des données cernes en rendant possible l'insertion ou la suppression d'un cerne dans une série chronologique de façon rapide et sûre.

#### 4 - Utilisation

Tout utilisateur possédant les privilèges d'accès à la base peut agir sur celle-ci au moyen de menus interactifs (Figures 12 et 13).

Tous les menus qui font référence aux tables sont conçus sur le même schéma, sauf le menu de la table **etude** et les deux menus correspondant à l'interdatation. Pour ces trois menus, l'accès aux tables est direct à partir du menu principal. Pour les autres menus, l'accès aux tables se fait par l'intermédiaire d'un sous-menu permettant de sélectionner le traitement à réaliser : insertion de nouvelles données, suppression ou modification de données enregistrées, ou simplement visualisation des données. Différents contrôles ont été développés pour assurer l'unicité des lignes d'une table, notamment au moment d'une insertion ou d'une modification. En mode insertion, si la variable était inexistante auparavant, la sauvegarde est automatique et immédiate.

Les masques de saisie sont constitués de façon à simplifier l'encodage manuel des données, notamment pour les tables **dataesp** et **horizon**. Le module SQL*loader (Moran &Dimmick, 1989) permet d'insérer des fichiers non Oracle dans la base. Ce module est particulièrement efficace pour inclure les données relatives aux cernes par exemple, issues directement du système semi-automatique de mesure.

Ce même module permet également d'interroger la base, de réaliser d'éventuelles et importantes corrections et de créer des fichiers de données sous format "texte", interprétables par d'autres applications. Dans le cas particulier du logiciel statistique SAS, il existe des procédures permettant de lire directement les données à traiter dans la base de données (SAS, 1989). L'implantation de la base sous UNIX permet un fonctionnement simultané avec plusieurs utilisateurs. Les requêtes simultanées à la base sont gérées automatiquement.

*Deuxième partie*

# *ANALYSE DE LA CROISSANCE RADIALE A LONG TERME*

**Chapitre III**

# INTRODUCTION A LA DENDROCHRONOLOGIE ET METHODES GENERALES

## I - BASES DE LA DENDROCHRONOLOGIE

De nombreux auteurs se sont intéressés à la nature et au déterminisme des accroissements radiaux chez les végétaux ligneux, ainsi qu'à la possibilité de les utiliser en temps que marqueurs temporels (Annexe 4). Cette dernière idée est apparue indépendamment chez plusieurs auteurs, pendant une période de temps assez longue. Le développement moderne de la dendrochronologie est cependant relativement récent et attribué à l'américain Andrew E. Douglass qui définit les principes, mit au point les techniques et les utilisa intensivement (Studhalter, 1955 ; Studhalter *et al.*, 1963). Il constata que des séries d'irrégularités dans les largeurs de cernes ne se reproduisent pas dans le temps (Douglass, astronome, recherchait à l'origine des cycles de croissance dus aux phases solaires) ; par contre, "*ces séries d'irrégularités se reproduisent merveilleusement bien dans des milliers d'arbres différents, vivant en même temps dans une région donnée*". Ces variations sont imputables à un facteur agissant à grande échelle, principalement d'origine climatique (Douglass, 1935).

A partir de 1904, Douglass fut le premier à comprendre et à appliquer les deux principes clefs de la dendrochronologie (Fritts, 1976) :

1° - ***l'interdatation des cernes peut être utilisée comme un outil chronologique.***

L'interdatation des séries chronologiques peut avoir un intérêt immédiat comme en archéologie, histoire de l'art, architecture, etc. (Lambert & Maurice, 1992). On parle alors de dendrochronologie au sens littéral du mot : la datation à l'aide du bois.

L'interdatation constitue également la première étape de toute étude dendrochronologique (au sens large[1]). Il est en effet indispensable d'acquérir la certitude qu'un cerne "observé" correspond bien à l'année présumée de son élaboration avant de s'intéresser aux facteurs agissant sur la formation de ce cerne. "*Crossdating is the most important principle of dendrochronology*" ; (Fritts, 1976). Cette étape de préparation des données sera développée dans un paragraphe spécial consacré à l'interdatation ;

2° - ***les largeurs de cernes sont des intégrateurs complexes des conditions environnementales.***

L'arbre, tributaire de son environnement, agit comme un intégrateur complexe des conditions extérieures. Les informations contenues dans les cernes sont alors l'objet de plusieurs disciplines : la climatologie (on parle de dendroclimatologie) ; l'écologie (dendroécologie) ; la dendrométrie et la sylviculture, etc. (Becker *et al.*, 1988).

---

1 - Sous le terme dendrochronologie sont regroupées toutes les disciplines qui utilisent directement ou indirectement l'information "date" contenue dans une succession de cernes. Ces spécialités sont la dendroclimatologie, la dendroécologie, la dendrochimie, mais aussi la dendrochronologie, etc. Toutes ces spécialités sont liées ; avant de réaliser une étude dendroécologique il est nécessaire de bien connaître les problèmes relatifs à la datation ; une étude dendroclimatique sera pertinente si on connait l'écologie d'une essence, etc.

## II - INTERDATATION DES LARGEURS DE CERNES

### 1 - Définition

En forêt tempérée, chaque anneau de croissance correspond à une période végétative comprise à l'intérieur d'une année calendaire : sous nos latitudes, l'activité cambiale des végétaux ligneux s'interrompt pendant l'hiver pour reprendre au printemps suivant. Ces cernes annuels sont qualifiés d'*éniautes* (De Martin, 1974). Connaissant la date de formation du dernier cerne sous l'écorce, assigner une date d'élaboration à chacun des cernes comptés en direction du cœur peut sembler immédiat. Cependant, on doit tenir compte de deux types d'erreurs, ou troubles *alléniautiques* : la présence éventuelle de faux cernes (dédoublement d'un cerne annuel) et l'absence d'un ou d'une série de cernes (cernes manquants), sur tout ou partie de la circonférence de l'arbre.

L'interdatation, ou synchronisation, de plusieurs séries chronologiques a pour but de détecter ces éventuels décalages dans le temps (Fritts, 1976).

### 2 - Principe et méthodes courantes

Les facteurs environnementaux limitant la croissance peuvent avoir des origines biotiques et abiotiques. Parmi les facteurs abiotiques agissant sur la croissance, on peut évoquer principalement le climat. On peut citer également la nature du sol, l'exposition, l'altitude : facteurs stables tout au long de la vie d'un arbre, mais qui conditionnent une plus ou moins grande réactivité de ceux-ci aux conditions extérieures. Les facteurs biotiques peuvent être, par exemple, une défoliation, une prolifération d'insectes xylophages, etc. Les arbres sont donc susceptibles de réagir de façons variées en fonction de leur situation. Pourtant, Douglass a montré que dans une même région, les facteurs climatiques extrêmes (comme des sécheresses ou des grands froids) étaient responsables de la formation de cernes caractéristiques. L'interdatation des chronologies est alors possible grâce au **principe des facteurs limitants** (Fritts, 1971). Si un seul des paramètres déterminants de la croissance vient à faire défaut, les largeurs de cernes sont immédiatement affectées.

Deux étapes sont nécessaires pour synchroniser les séries dendrochronologiques : la mise en évidence des caractéristiques des cernes sur chaque chronologie ; puis la comparaison de chaque "*relevé des caractéristiques*" (Serre, 1980), afin de vérifier leur synchronisme et détecter ainsi d'éventuels décalages dans le temps. Deux méthodes générales sont employées pour réaliser les synchronisations : avant la mesure des cernes ou après.

L'Ecole américaine préconise la synchronisation **avant la mesure** des largeurs de cernes, à l'aide des "skeleton plots" (Douglas, 1928, *in* Serre, 1980 ; Stockes et Smiley, 1968 *in* Swetnam *et al.*, 1985). Sur des bandes de papier millimétré symbolisant une chronologie, les cernes présentant un grand contraste de largeur avec leurs voisins sont reportés sous la forme de traits verticaux plus ou moins longs en fonction de leur importance : ils représentent les années caractéristiques ou "pointer years" (Serre, 1980 ; Schweingruber, 1988). Plusieurs relevés peuvent alors être mis en coïncidence. Cette technique est nécessaire quand il s'agit de dater des chronologies très longues ou lorsque les cernes manquants sont supposés nombreux. Pourtant, cette méthode requiert de l'expérience. Elle est très subjective puisqu'elle s'effectue avant toute mesure de cerne. Elle est très lourde à mettre en œuvre quand on ne dispose pas d'une chronologie de référence (master chronology) ou quand les chronologies à interdater sont très nombreuses. Enfin, les cernes caractéristiques qui peuvent être retenus sont soit des cernes très fins, soit des cernes très larges. Nous verrons pourtant que des cernes de largeur "normale" peuvent parfois faire partie de séries caractéristiques.

Les méthodes d'interdatation qui s'appliquent **après la mesure** des cernes ont toutes une base graphique. On peut comparer plusieurs séries entre elles ou comparer une série à interdater à une chronologie maîtresse, en utilisant les largeurs de cernes brutes ou leurs transformations logarithmiques. Le calcul de différents indices, pour quantifier le synchronisme de plusieurs chronologies, est également utilisé, en général sur des

mesures "filtrées" afin d'éliminer le facteur "âge de l'arbre" (Lambert *et al.*, 1988). De Martin (1974), regroupe dans sa synthèse, le coefficient de coïncidence, le coefficient de corrélation et le coefficient de corrélation des rangs, les coefficients de "sensitivity" et de "cross-dating". Le test de la "Gleichläufigkeit" (test non paramétrique de parallélisme encore appelé test W) est également une méthode courante (Eckstein, 1969 ; Schweingruber, 1988 ; Kelly *et al.*, 1989). Cependant, Guibal *et al.* (1991) remarquent, en comparant différents tests statistiques de synchronisation, que "*le cas où la position correcte (d'une chronologie) se distingue des autres par une valeur numérique du test nettement tranchée est rare. La décision finale relève, après vérification visuelle, du dendrochronologue seul*". Ce constat avait déjà été fait par Douglass en 1943 (*in* Pilcher, 1990) : "*pour obtenir une interdatation fiable, rien ne vaut la comparaison minutieuse, par un même opérateur, des largeurs de cernes de différents arbres. Il n'existe pas de procédure automatique, pas de méthode empirique, pas de formule, pas de coefficient de corrélation qui puisse remplacer l'oeil humain pour comparer différentes séries de cernes ; l'opérateur ne peut espérer se dégager de sa responsabilité*".

### 3 - Application

L'interdatation de nos carottes de hêtre a été réalisée à l'aide de deux méthodes complémentaires :

- la construction d'une chronologie provisoire de référence ;
- la recherche statistique d'années caractéristiques (calcul d'un coefficient de coïncidence annuel) ;

Sur un ensemble de chronologies, les erreurs potentielles, c'est-à-dire les décalages, sont par définition relativement rares, surtout si un grand nombre d'arbres a été échantillonné. De plus, on connaît toujours l'année de formation du dernier cerne sous l'écorce ; c'est un point de départ important qui fait souvent défaut en ce qui concerne la datation de séries archéologiques. Une chronologie de référence provisoire peut être calculée en moyennant les chronologies individuelles en fonction de la date, de façon à obtenir une évolution interannuelle moyenne des accroissements radiaux d'une espèce donnée au sein d'une région écologiquement homogène (soumise à un même macroclimat). Ceci n'est évidemment possible que si le nombre d'échantillons est suffisamment grand, ce qui conditionne la représentativité de la chronologie moyenne (Lambert *et al.*, 1988 ; Guibal, 1991).

Les années caractéristiques servant à la datation, au sens des premières études américaines, étaient essentiellement dues à un seul facteur limitant et d'origine climatique (précipitations ou température). Ces premières études furent réalisées en régions semi-arides ou froides : les séries chronologiques présentaient donc une grande variabilité interannuelle et, en l'absence de troubles alléniautiques, une excellente coïncidence. En climat tempéré, comme nous l'avons dit précédemment, une somme de facteurs environnementaux agit sur la croissance et de ce fait peut provoquer des réactions de compensation atténuant les effets du climat. Il est donc généralement admis qu'une année de croissance caractéristique peut être due à un stress mais, plus généralement, à la combinaison fortuite et durable de facteurs climatiques qui engendrent une réaction universelle de la part des arbres. A l'opposé, les arbres peuvent réagir de façon variable lors de conditions climatiques moyennes. La recherche d'années caractéristiques peut alors être envisagée statistiquement par le calcul concomitant de deux variables :

1° - pour chaque arbre a et entre chacune des années calendaires n et n-1, une évolution relative de la croissance entre deux cernes consécutifs peut être calculée :

$$ERC_n = 100 \cdot \frac{(L_n - L_{n-1})}{L_{n-1}}$$

où : $\mathbf{ERC_n}$ est l'évolution de la largeur des cernes entre l'année n-1 et l'année n ;
$\mathbf{L_n}$ est la largeur de cerne mesurée pour l'année n ;
$\mathbf{L_{n-1}}$ est la largeur de cerne mesurée pour l'année n-1 ;

Une moyenne des ERC peut être calculée pour chaque date disponible en utilisant l'ensemble des carottes. On obtient alors une valeur moyenne de l'évolution relative de la croissance radiale pour l'ensemble de l'échantillon entre deux années consécutives ;

2° - les valeurs de l'ERC précédemment définie peuvent être divisées en classes. On peut calculer, pour chaque classe, à partir de l'ensemble de l'échantillon, une fréquence de cernes présentant une ERC comprise entre les bornes de la classe. Le pourcentage de cernes dans chaque classe indique alors un sens d'évolution moyen de la croissance radiale des cernes entre l'année n-1 et l'année n (augmentation, stase ou diminution).

A l'aide de ces paramètres, nous pouvons considérer qu'une année sera d'autant plus caractéristique que la valeur moyenne de l'évolution relative de la croissance radiale sera forte et qu'elle affectera la majeure partie des cernes. En pratique, pour un effectif minimum de cent cernes, une année caractéristique présente une évolution relative moyenne de croissance radiale d'au moins 10% en valeur absolue par rapport à l'année précédente et un sens de variation de croissance identique pour au moins 70% de l'échantillon. Ces critères de choix sont très suffisants pour réaliser l'interdatation des chronologies. Par contre, pour une étude plus poussée du synchronisme des évolutions des largeurs de cernes, on peut envisager de ne pas tenir compte de la valeur de l'évolution relative moyenne de croissance radiale. Ceci permettrait de mettre en évidence des années caractéristiques "plates".

Après cette première phase de calcul débute la phase d'interdatation proprement dite. Chaque dendrogramme individuel est comparé visuellement à la chronologie provisoire moyenne, une importance particulière étant accordée au synchronisme des années les plus caractéristiques. Cette comparaison est réalisée à l'aide d'un programme graphique développé au laboratoire par M. Becker. Si un décalage est relevé, la carotte échantillon est réexaminée de façon à déterminer la source de l'erreur (erreur de saisie lors de la mesure ; erreur d'interprétation ; cerne dédoublé ; cerne manquant ; etc). Quand tous les profils dendrochronologiques sont interdatés, le processus est réitéré une seconde fois (voire une troisième en fonction de la fréquence des erreurs) : nouveau calcul d'une chronologie moyenne provisoire, nouvelle recherche des années caractéristiques, nouvelle synchronisation. L'interdatation terminée, on peut calculer une courbe de référence maîtresse, et déterminer précisément les années de croissance caractéristiques pour une espèce dans une région donnée. Il est important de rappeler que cette courbe moyenne de référence n'a de valeur que si elle est utilisée à des fins de datation.

## 4 - Résultats

### 4.1 - Les erreurs détectées par l'interdatation

Sur un total de 1025 chronologies (représentant un total de 93 971 cernes), 143 erreurs ont été détectées sur 124 arbres :

- 92 cernes ont été fusionnés (faux cernes) ..... (64% des corrections) ;
- 29 cernes ont été dédoublés (cernes présumés faux à tort) . (20% des corrections) ;
- 10 cernes avaient été mesurés deux fois ..... (7% des corrections) ;
- 7 cernes manquants ont été ajoutés ..... (5% des corrections) ;
- 5 cernes oubliés ont été mesurés à nouveau ..... (3% des corrections).

L'ensemble des carottes de hêtre n'a donc pas présenté de grosses difficultés d'interdatation. Les erreurs sont en majeure partie dues à des fautes d'interprétation, très fréquentes dans le cas du hêtre. Les cernes manquants sont très rares (tableau 4). De manière générale, la fréquence des cernes manquants est plus élevée à l'étage montagnard qu'à l'étage collinéen, ceci en raison des rigueurs du climat, et les conifères sont plus enclins que les feuillus à ne pas faire de cernes annuels lors de stress climatiques intenses.

| Site d'étude | Espèce | Nombre d'arbres échantillonnés | Nombre total de cernes mesurés | Nombre de cernes manquants | Nombre de cernes manquants pour 10 000 cernes |
|---|---|---|---|---|---|
| **Plateaux calcaires** | **Hêtre** | **1025** | **93 971** | **7** | **0,745** |
| Plateau Lorrain | Chênes | 1034 | 91 000 | ≈ 0 | ≈ 0 |
| Pays de Loire | Pin Laricio | 2024 | 69 740 | 25 | 3,58 |
| **Vosges** | **Hêtre** | **1312** | **134 000** | **127** | **9,7** |
| Vosges | Sapin | 1200 | 120 000 | **≈ 1800** | **≈ 150** |
| Jura | Sapin | 1248 | 115 170 | 168 | 14,59 |

**Tableau 4** : Fréquence observée de cernes manquants dans différentes études réalisées au laboratoire.

### 4.2 - Les années caractéristiques du hêtre sur les plateaux calcaires de Lorraine

D'après les définitions exposées précédemment, les années caractéristiques sont recherchées sur trois périodes, en fonction du nombre minimum de cernes disponibles par date (supérieur à 100, supérieur à 50, supérieur à 30). Le tableau 5 présente les principales années caractéristiques relevées pour le hêtre sur les plateaux calcaires de Lorraine. La figure 14 présente ces mêmes années caractéristiques surperposées à la courbe moyenne de référence calculée après interdatation complète des échantillons. Enfin, le tableau 6 donne une synthèse du nombre d'années caractéristiques pour différentes périodes.

| Période considérée | 1991-1854 | 1853-1839 | 1838-1827 | 1826-1800 |
|---|---|---|---|---|
| Nombre de dates disponibles | 138 | 15 | 12 | 27 |
| Nombre minimum de cernes disponibles par date | 100 | 50 | 30 | <30 |
| Nombre d'années caractéristiques identiques pour au moins 90% des arbres | 6 | 0 | 0 | 0 |
| Nombre d'années caractéristiques identiques pour au moins 80% des arbres | 27 | 1 | 2 | 0 |
| Nombre d'années caractéristiques identiques pour au moins 70% des arbres (=nombre total d'années caractéristiques retenues sur la période) | 51 | 3 | 3 | 0 |

**Tableau 6** : Nombre d'années caractéristiques en fonction des effectifs de cernes disponibles.

### 5 - Conclusion sur l'interdatation

La méthode employée pour mettre en évidence les années caractéristiques et interdater nos séries chronologiques s'est révélée très performante et rapide à mettre en œuvre. La recherche statistique - non subjective - des années caractéristiques, nous a permis de mettre en évidence un grand nombre de particularités interannuelles et de successions d'années caractéristiques (signatures). Ces nombreux repères facilitent beaucoup la comparaison visuelle des séries à une chronologie de référence.

Le grand nombre d'années caractéristiques que nous avons pu mettre facilement en évidence semble montrer que les hêtres des plateaux calcaires ont réagi au cours du temps de façon synchrone à des aléas ou des combinaisons d'aléas climatiques particuliers. Ce point sera abordé dans le chapitre consacré à la dendroclimatologie.

Cette méthode ne peut cependant pas s'appliquer à toutes les études dendrochronologiques. Son efficacité est directement liée d'une part, au nombre de chronologies disponibles et, d'autre part, à la fréquence des troubles alléniautiques. Pour construire une courbe de référence valide et rechercher statistiquement les années caractéristiques, il faut disposer d'un grand nombre de chronologies, et il faut être à peu près certain que les faux cernes, cernes manquants et autres défauts sont globalement rares.

| | Date | Evolution relative moyenne de la croissance par rapport à l'année précédente (%) | Nombre de cernes disponibles à cette date | Fréquence de l'évolution interannuelle au seuil de 10% (% du nombre de cernes) | | | Fréquence de l'évolution interannuelle au seuil de : | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Diminution | Maintien | Augmentation | 20% | 30% | 40% | 50% |
| Nombre de cernes supérieur à 100 | * 1976 | -50,77 | 1021 | **99** | 1 | 0 | 97 | 93 | 84 | |
| | * 1870 | -55,91 | 208 | **96** | 1 | 3 | 94 | 90 | 84 | 75 |
| | * 1894 | 109,62 | 437 | 4 | 4 | **92** | 88 | 82 | | |
| | * 1952 | -35,12 | 950 | **92** | 4 | 4 | 84 | 70 | | |
| | * 1964 | -32,37 | 990 | **91** | 6 | 3 | 82 | | | |
| | * 1983 | -31,46 | 1025 | **90** | 8 | 2 | 77 | | | |
| | * 1989 | -33,83 | 1025 | **90** | 8 | 2 | 78 | | | |
| | * 1955 | 63,17 | 964 | 4 | 7 | **89** | 81 | 72 | | |
| | * 1947 | -31,78 | 927 | **88** | 7 | 5 | 80 | | | |
| | * 1859 | 73,18 | 138 | 7 | 6 | **87** | 82 | 78 | | |
| | * 1985 | 56,03 | 1025 | 2 | 13 | **85** | 77 | | | |
| | * 1928 | -22,76 | 778 | **85** | 8 | 7 | 72 | | | |
| | * 1925 | 45,67 | 738 | 5 | 11 | **84** | 74 | | | |
| | * 1959 | -25,29 | 978 | **84** | 10 | 6 | 71 | | | |
| | * 1980 | 36,04 | 1023 | 5 | 12 | **83** | | | | |
| | * 1865 | -28,68 | 175 | **83** | 6 | 11 | 78 | | | |
| | * 1977 | 82,18 | 1022 | 9 | 9 | **82** | 75 | 70 | | |
| | * 1950 | 51,20 | 941 | 8 | 10 | **82** | 73 | | | |
| | * 1987 | 40,43 | 1025 | 7 | 11 | **82** | 70 | | | |
| | * 1871 | 159,31 | 216 | 13 | 6 | **81** | 80 | 79 | 76 | 73 |
| | * 1916 | 62,56 | 640 | 9 | 10 | **81** | 75 | | | |
| | * 1935 | 56,76 | 846 | 7 | 12 | **81** | 74 | | | |
| | * 1951 | 42,66 | 947 | 7 | 12 | **81** | 70 | | | |
| | * 1915 | -22,19 | 632 | **81** | 10 | 9 | 70 | | | |
| | * 1858 | -19,47 | 133 | **80** | 8 | 11 | 75 | | | |
| | * 1896 | -23,03 | 448 | **80** | 10 | 10 | | | | |
| | * 1934 | -27,89 | 842 | **80** | 12 | 8 | 70 | | | |
| | * 1936 | 44,69 | 850 | 9 | 12 | **79** | 70 | | | |
| | * 1900 | -22,97 | 477 | **79** | 10 | 11 | | | | |
| | * 1880 | -22,30 | 298 | **79** | 11 | 10 | | | | |
| | * 1933 | -19,39 | 831 | **79** | 13 | 8 | | | | |
| | * 1962 | -23,24 | 986 | **79** | 14 | 7 | | | | |
| | * 1882 | 64,67 | 319 | 13 | 9 | **78** | 71 | | | |
| | * 1921 | -18,05 | 698 | **78** | 13 | 9 | | | | |
| | 1875 | 70,94 | 243 | 10 | 13 | **77** | | | | |
| | * 1881 | -15,08 | 312 | **77** | 10 | 13 | | | | |
| | * 1884 | -21,27 | 345 | **77** | 11 | 12 | | | | |
| | * 1878 | 46,37 | 273 | 12 | 12 | **76** | | | | |
| | * 1893 | -22,00 | 432 | **76** | 11 | 13 | | | | |
| | 1867 | 82,51 | 192 | 15 | 10 | **75** | | | | |
| | * 1903 | 59,78 | 499 | 10 | 15 | **75** | | | | |
| | * 1910 | 53,43 | 575 | 10 | 15 | **75** | | | | |
| | 1868 | -21,63 | 196 | **75** | 7 | 18 | | | | |
| | 1887 | -17,02 | 377 | **75** | 11 | 14 | | | | |
| | * 1918 | -16,93 | 667 | **75** | 11 | 14 | | | | |
| | * 1913 | 66,15 | 609 | 14 | 12 | **74** | | | | |
| | * 1958 | 41,63 | 978 | 11 | 15 | **74** | | | | |
| | 1869 | 57,46 | 201 | 19 | 8 | **73** | | | | |
| | * 1978 | 43,44 | 1023 | 9 | 18 | **73** | | | | |
| | 1911 | -11,74 | 580 | **72** | 13 | 15 | | | | |
| | 1946 | 29,75 | 923 | 16 | 14 | **70** | | | | |
| Nombre de cerne supérieur à 30 | 1834 | 96,68 | 40 | 9 | 3 | **88** | 88 | 80 | 80 | 70 |
| | * 1846 | -29,38 | 70 | **86** | 7 | 7 | 73 | | | |
| | * 1832 | -35,64 | 37 | **81** | 11 | 8 | 78 | 73 | | |
| | 1839 | -25,83 | 51 | **78** | 14 | 8 | 71 | | | |
| | * 1845 | 66,43 | 60 | 16 | 7 | **77** | | | | |
| | * 1833 | -22,29 | 39 | **74** | 5 | 21 | | | | |

**Tableau 5 : Les années caractéristiques pour le hêtre sur les côtes de Moselle**

- Les années précédées d'une étoile ont été reconnues caractéristiques sur les données non interdatées.
- Valeur moyenne relative de l'évolution de la croissance entre l'année n-1 et l'année n citée.
- Nombre de cernes disponibles à cette date.
- Nombre relatif de cernes présentant une diminution, un maintien et une augmentation de croissance (deux cernes consécutifs étant considérés comme semblables s'ils présentent une évolution relative de largeur comprise entre -10 et 10%) ; seules les fréquences au moins égales à 70% pour une des classes ont été conservées.
- Nombre relatif de cernes (au moins égal à 70%), présentant soit une diminution, soit une augmentation de croissance au seuil précédent de 10%, pour des seuils compris entre 20 et 50%.

(Exemple : En **1976**, on observe une diminution relative de la croissance par rapport à 1975 de **50,77%**, sur un nombre total de **1021** cernes. **99%** des cernes observés présentent une diminution de croissance de plus de 10%, **1%** des cernes ne présentent pas d'évolution de croissance, **0%** de cerne présente une augmentation de croissance. **97%** des cernes ont une diminution de croissance supérieure à 20%, **93%** des cernes ont une diminution de croissance supérieure à 30%, **84%** des cernes ont une diminution de croissance supérieure à 40%, moins de 70% des cernes ont une diminution de croissance supérieure à 50%.)

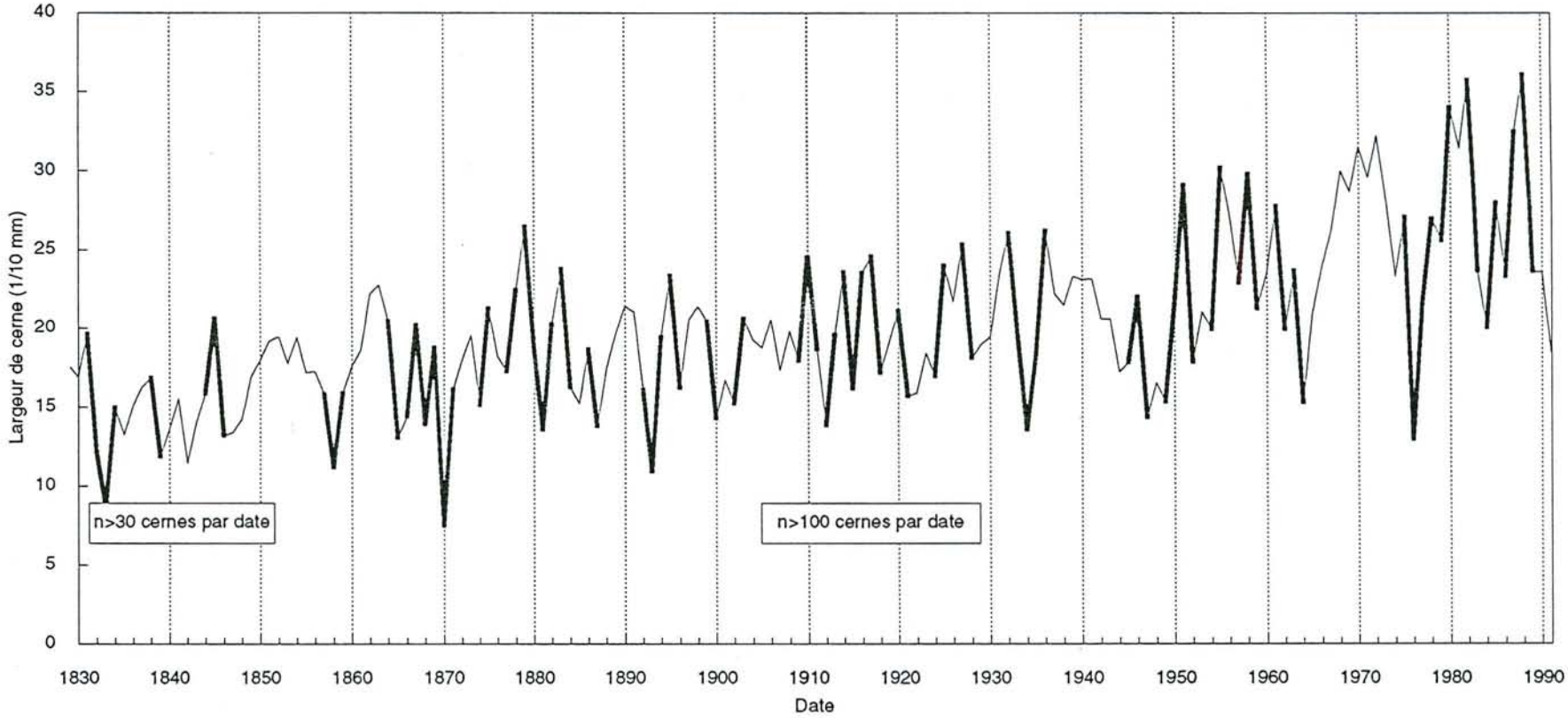



**Figure 14 : Courbe de référence maîtresse et années caractéristiques.**
Courbe de croissance moyenne pour l'ensemble des 1025 hêtres de plateaux calcaires, représentée à partir d'un nombre de cernes par date supérieur à 30.
Les années caractéristiques sont surlignées. Elles correspondent à une évolution de croissance relative, entre l'année n-1 et l'année n, au moins égale à 10% (en valeur absolue) et synchrone pour 70% des arbres au moins.

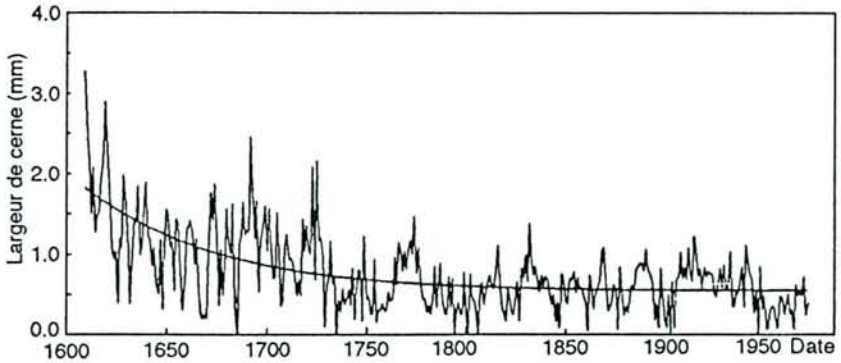



**Figure 15** : Dendrogramme d'un *Pinus ponderosa* en croissance libre dans un site semi-aride non perturbé. Après la période d'accroissement des largeurs de cernes pendant la période juvénile (non représentée), les largeurs évoluent, en fonction du temps, selon une fonction exponentielle décroissante, (d'après Cook, 1990).

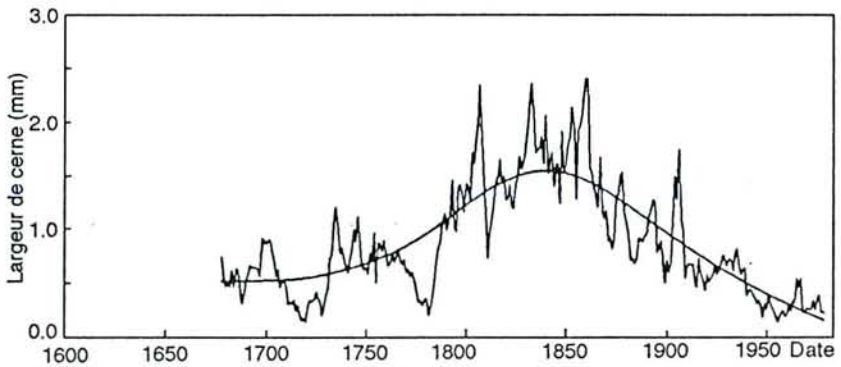



**Figure 16** : Exemple d'une perturbation endogène (chablis) affectant la croissance radiale d'un *Picea rubens*, (d'après Cook, 1990).

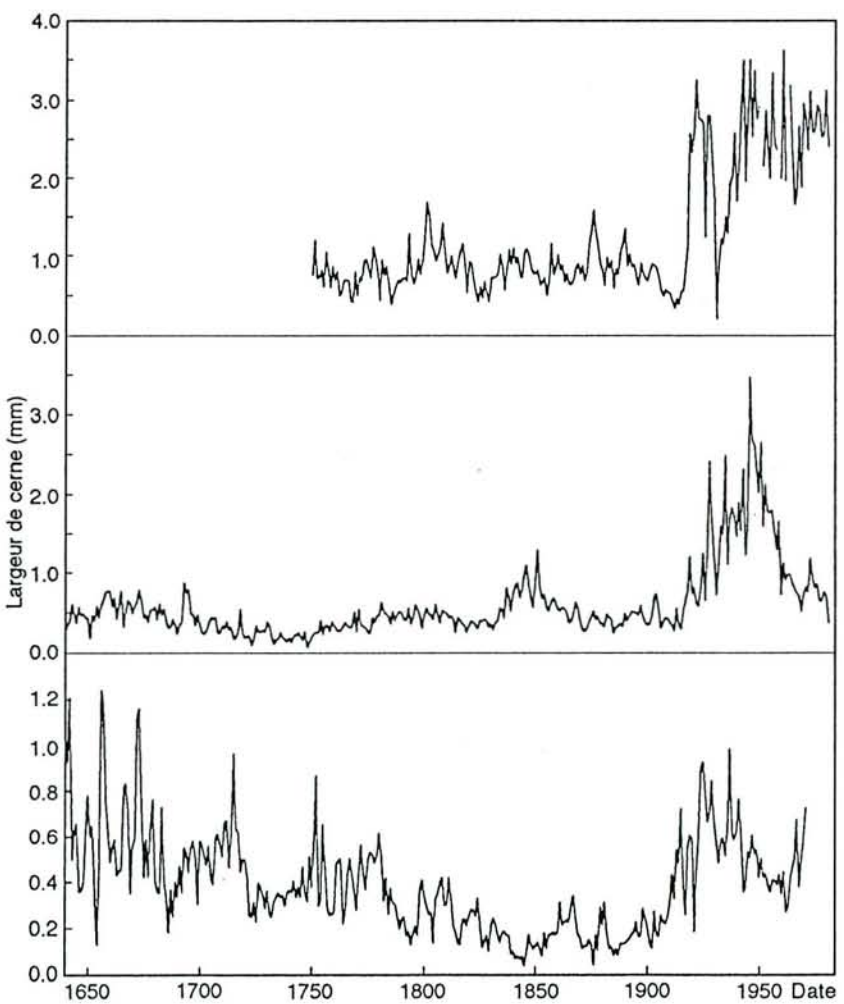



**Figure 17** : Exemple d'une perturbation exogène affectant simultanément la croissance de trois *Tsuga canadensis* dans les années 1900, (d'après Cook, 1990).

## III - LE CERNE ET LE TEMPS

### 1 - Le cerne et les facteurs de variation

Les nombreux facteurs influençant la taille des accroissements annuels ont été résumés par Graybill (1982) et Cook (1987, 1990) sous la forme d'un modèle linéaire. La largeur (ou la surface) d'un cerne, élaboré par un arbre au temps t, peut symboliquement être transcrite ainsi :

$$R_t = A_t + C_t + Pl_t + Pr_t + E_t$$

où,
$\mathbf{R_t}$ est la largeur (ou la surface) du cerne observé ;
$\mathbf{A_t}$ est la composante associée aux facteurs biologiques ;
$\mathbf{C_t}$ est la composante climatique ;
$\mathbf{Pl_t}$ et $\mathbf{Pr_t}$ représentent respectivement les perturbations locales et régionales influant sur un peuplement ;
$\mathbf{E_t}$ représente la part stochastique non explicable de la croissance ;

$\mathbf{A_t}$, la composante biologique, est un facteur prépondérant dans l'évolution des largeurs de cernes en fonction du temps. En vieillissant, l'arbre perd de sa vigueur et de ce fait élabore des cernes de plus en plus fins. Classiquement, l'évolution de la largeur des cernes en fonction de l'âge se fait en deux phases : une augmentation de la largeur dans les jeunes âges puis une diminution, suivie ou non d'une stabilisation, jusqu'à la mort de l'arbre (Figure 15). Cette évolution est différente si on considère les surfaces de cernes. Une diminution des largeurs de cernes en fonction du temps correspond toujours à une augmentation globale du diamètre du tronc. La régulation de la croissance radiale est difficilement interprétable en terme de largeur de cerne ; par contre la surface de celui-ci détermine une *surface conductrice* prépondérante pour la croissance. La surface du cerne produit sous l'écorce peut en effet augmenter, se stabiliser, ou diminuer en fonction du diamètre du tronc. La composante biologique intègre donc les contraintes géométriques d'accroissement et les variations liées à l'augmentation de l'âge. Cet "effet âge" rend impossible la comparaison directe du niveau de croissance moyen des cernes d'âges différents élaborés à une même date ;

$\mathbf{C_t}$, la composante climatique, est commune à l'ensemble des arbres d'une même région ; mais des variations micro-climatiques locales peuvent se superposer à la composante climatique générale.

Les effets du milieu sont intégrables à deux échelles :

- $\mathbf{Pl_t}$ regroupe les perturbations locales (ou endogènes), c'est-à-dire qui n'affectent pas l'ensemble de la placette ou du peuplement : ces perturbations ne sont pas communes à tous les arbres d'un même site. Diverses causes peuvent perturber la croissance radiale, comme la compétition inter-arbre (densité) ; les accidents locaux (chablis) ; la sylviculture (éclaircies sélectives) ; les micro-variations stationnelles (fertilité, obstacle à l'enracinement, disponibilité en eau) ; les incendies, les inondations, les glissements de terrain ... (Figure 16) ;

- $\mathbf{Pr_t}$ intègre les perturbations régionales (ou exogènes), c'est-à-dire qui affectent l'ensemble des arbres d'une placette, d'un peuplement ou d'une région. Il peut s'agir de perturbations climatiques à long terme (variation du régime des pluies, augmentation des températures moyennes) ; de l'action bénéfique ou délétère de divers polluants ($CO_2$ atmosphérique ; dépôts azotés ; soufre, ozone ...) ; de l'évolution des pratiques sylvicoles (fréquence et intensité des éclaircies) ; des attaques d'insectes ; des feux ; des maladies ; etc. (Figure 17) ;

$\mathbf{E_t}$, la part non explicable de la croissance, est la variance qui reste quand tous les autres facteurs ont été pris en considération. Elle inclut les erreurs de mesure, le potentiel génétique de chaque arbre, etc.

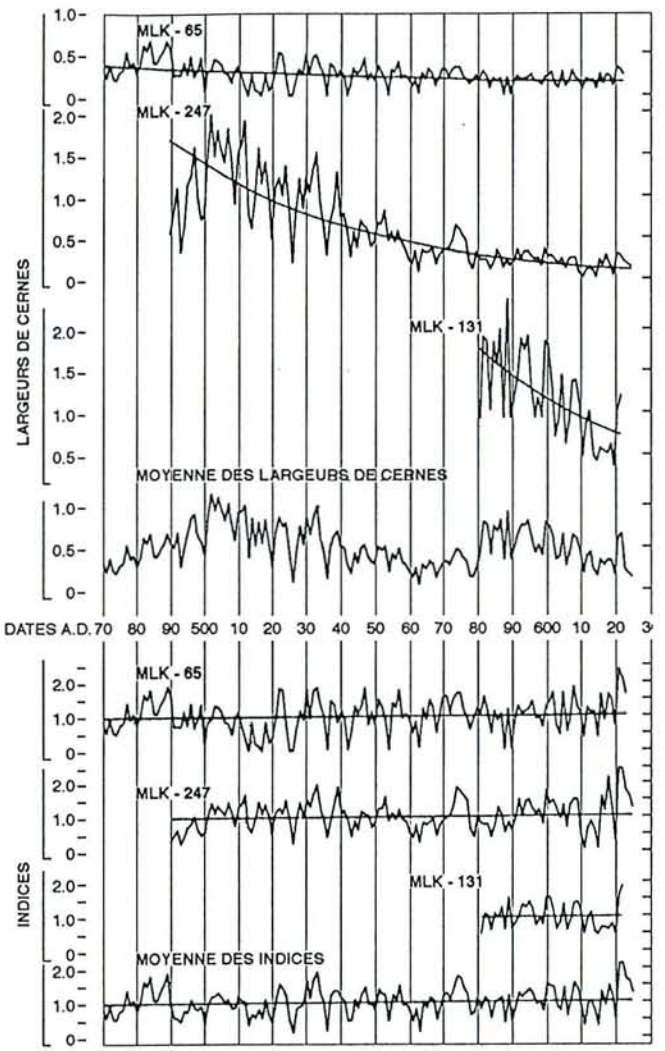



**Figure 18 : Exemple de standardisation "arbre par arbre".** Trois chronologies sont représentées en haut de la figure. Si les largeurs de cernes de ces séries sont moyennées en fonction de la date, la courbe moyenne, représentée juste en dessous, montre des périodes de faible et forte croissance associées à la variabilité de l'âge des échantillons. Cet effet âge peut être retiré en estimant mathématiquement la décroissance biologique des largeurs de cernes de chaque série et en divisant chacune de ces largeurs par la valeur prédite par le modèle. Les chronologies, dans la moitié inférieure de la figure, sont exprimées en indices de croissance. Elles peuvent alors être moyennées en fonction de la date de façon à obtenir une chronologie moyenne dégagée de l'effet de l'âge ; (d'après Fritts, 1976).

### 2 - Le temps et les facteurs de variation

Les facteurs exposés précédemment agissent sur la croissance radiale à différentes échelles de temps. Trois "fréquences" sont classiquement reconnues et étudiées en dendrochronologie :

- ***la haute fréquence*** intègre les variations de croissance à l'échelle de l'année. Ces variations sont en général dues à des évolutions stochastiques des conditions environnementales comme le climat, ou d'autres perturbations ponctuelles (feu, défoliations parasitaire, etc.) ;

- ***la moyenne fréquence*** intègre les variations de croissance à l'échelle de quelques années. Ces variations peuvent avoir encore une fois des origines climatiques (crises à l'échelle de la décennie), mais aussi des origines sylvicoles (réaction à une éclaircie par exemple) ;

- ***la basse fréquence*** intègre les variations de croissance à l'échelle de la décennie, du siècle, ou de plusieurs siècles. Ici s'inscrivent les tendances de croissance dues à l'âge en général et les tendances liées à des évolutions lentes et continues des conditions environnementales (évolution des pratiques sylvicoles, pollutions, dérives climatiques).

Cette notion de temps est extrêmement importante car les méthodes d'analyse dépendent de la "fréquence" que l'on désire étudier. Ce facteur temporel introduit la notion de signal et de bruit de fond dont nous reparlerons.

Il est également important de ne pas confondre la fréquence du signal étudié et la période sur laquelle on l'étudie : une étude de la croissance radiale à long terme (pendant une période de temps très longue) n'implique pas forcément une étude des signaux à basse fréquence ; on peut réaliser des études dendroclimatiques (signal à haute fréquence) sur une période de 3000 ans (à long terme).

## IV - SIGNAL ET BRUIT DE FOND : CHOIX DE L'INFORMATION A TRAITER

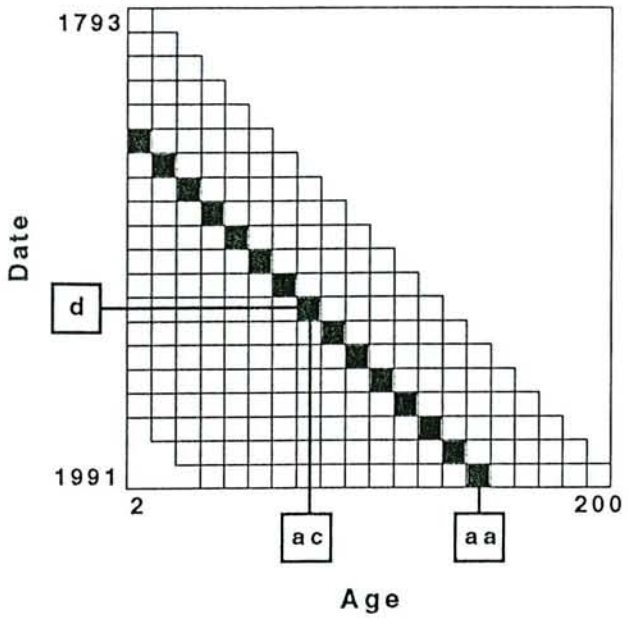
D'un point de vue historique, les signaux à haute et moyenne fréquence, c'est-à-dire les variations de croissance contrôlées principalement par les facteurs climatiques, ont été étudiés les premiers. L'interprétation de ces signaux reste actuellement un domaine très fouillé, et les méthodes d'analyse sont très évoluées, (Serre, 1976, 1978 ; Serre-Bachet & Tessier, 1985 ; Tessier, 1986, 1989 ; Biondi, 1992 ; Briffa & Schweingruber, 1992 ; Grissino-Mayer & Butler, 1993, etc.). A l'heure actuelle, il existe de nombreux travaux de dendroclimatologie concernant des espèces et des régions du monde entier. Comparativement, les signaux à basse fréquence (autres que ceux liés à l'augmentation de l'âge des arbres), restent peu étudiés. Les méthodes de standardisation, c'est-à-dire les méthodes d'extraction des signaux à basse fréquence des séries chronologiques, sont encore un sujet de débat (Wigley *et al.*, 1987 ; Innes, 1991 ; Dupouey *et al.*, 1992). La méthode de standardisation choisie est pourtant la clef de l'interprétation des séries de cernes.

L'étude globale de tous les facteurs influençant la croissance radiale, c'est-à-dire la résolution de l'équation à cinq inconnues de Cook, est en effet impossible d'emblée. Les auteurs ont cherché implicitement à simplifier le modèle d'une part, en minimisant l'action de certains facteurs, et d'autre part, en séparant le ***signal*** à étudier d'un ***bruit de fond*** indésirable.

### 1 - Cas de l'étude des signaux à haute fréquence

Les premiers auteurs s'intéressant au signal climatique ont cherché à sélectionner des arbres isolés et très âgés, poussant dans des régions soumises à de forts stress climatiques. Ce faisant, les perturbations non climatiques de la croissance radiale à long terme étaient fortement tamponnées. Autrement dit, les auteurs espéraient maximiser l'information à haute fréquence par rapport à celle de basse fréquence. Les tendances observées pouvaient être alors identifiées sans ambiguïté comme étant dues uniquement à l'effet âge :

**Figure 19 : Structure de l'échantillonnage**

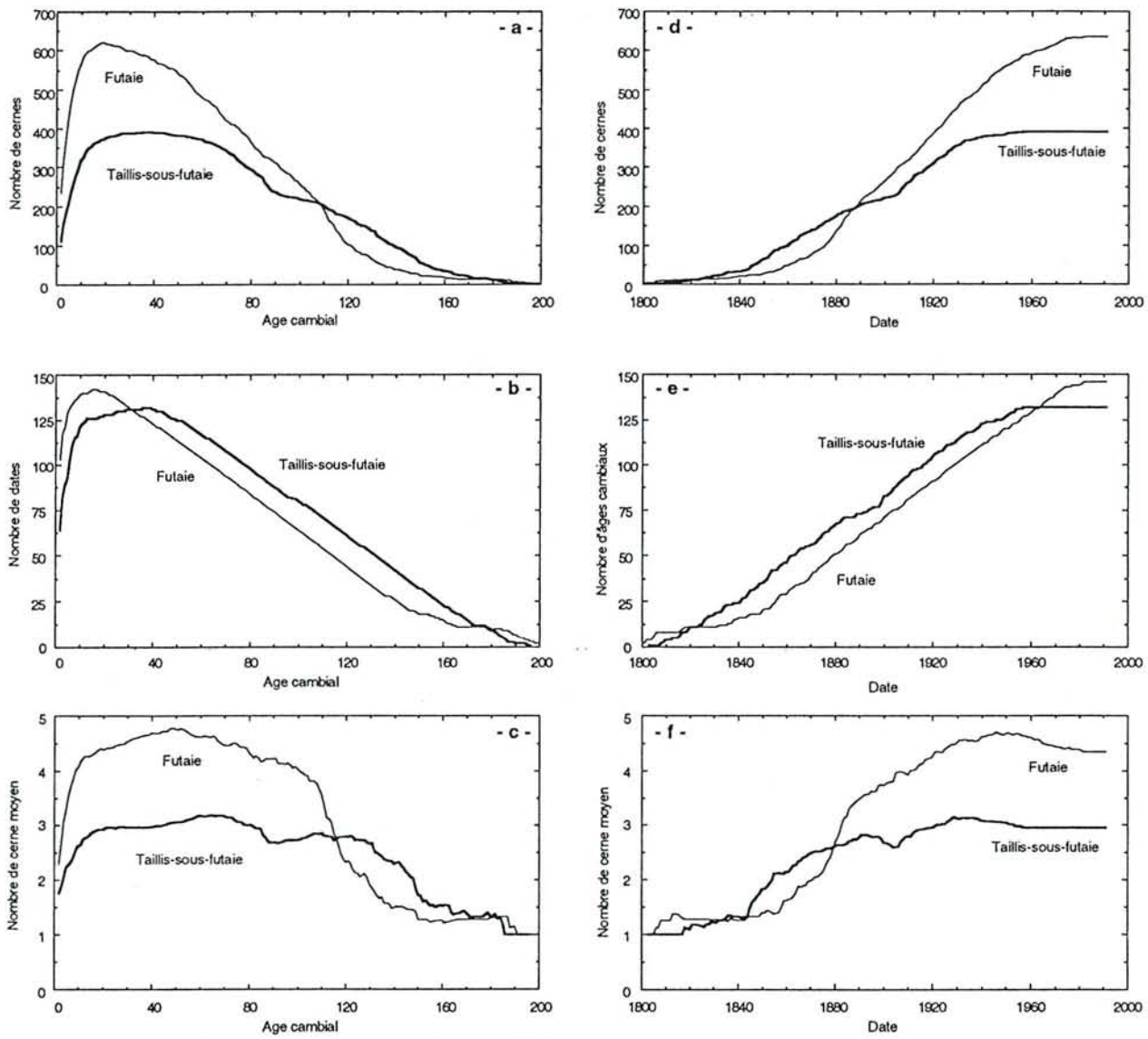



**aa** ; **âge actuel d'un arbre** = âge de l'arbre quand celui-ci a été carotté ;

**ac** ; **âge cambial d'un cerne** = âge de l'arbre quand le cerne considéré a été édifié. En 1991, année de carottage, l'âge cambial correspond à l'âge actuel des arbres.

A chaque âge cambial **a** correspond une date **d**. Chaque couple (a,d) est représenté par un effectif de cernes **n**. Pour la futaie, n varie entre 0 et 15 avec une moyenne de 4 cernes pour chaque couple (a,d). Pour le taillis-sous-futaie, n varie entre 0 et 14 avec une moyenne de 3 cernes pour chaque couple (a,d).

Pour les très jeunes âges cambiaux correspondant à des dates récentes, ainsi que pour les âges cambiaux avancés correspondant à des dates anciennes, aucun cerne n'est disponible. Le plus jeune arbre carotté en futaie était âgé de 11 ans et de 39 ans en taillis-sous-futaie. Le plus vieil arbre carotté en futaie était âgé de 203 ans et de 196 ans en taillis-sous-futaie.




**a** : Nombre de cernes disponibles en fonction de l'âge cambial.
**b** : Nombre de dates pour lesquelles des cernes sont disponibles en fonction de l'âge cambial.
**c** : Effectif moyen des cernes en fonction de l'âge cambial ; rapport entre le nombre de cernes et le nombre de dates disponibles pour chaque âge cambial.
**d** : Nombre de cernes disponibles en fonction de la date.
**e** : Nombre d'âges cambiaux pour lesquels des cernes sont disponibles en fonction de la date.
**f**: Effectif moyen des cernes en fonction de la date ; rapport entre le nombre de cernes et le nombre d'âges cambiaux disponibles pour chaque date.

$R_t = A_t + C_t + E_t$, (Douglass, 1914, *in* Briffa *et al.*, 1987). La composante biologique $A_t$, considérée ici comme du bruit, pouvait alors être retirée par une étape analytique appelée ***standardisation***. Selon Schulman (1945, *in* Cook *et al* 1990), la standardisation permet d'une part, de s'affranchir des tendances de croissance dues à l'âge des arbres, et d'autre part, de construire des courbes moyennes de croissance à partir des largeurs de cernes indicées de nombreux arbres n'ayant pas le même âge ni le même taux de croissance (Figure 18).

De façon générale, l'étude du signal climatique implique que tous les autres facteurs susceptibles d'affecter la croissance radiale soient considérés comme du bruit. Le modèle de Cook s'écrit alors :

$$R_t = C_t + G_t + E_t \text{ ; avec } G_t = f(A_t , Pl_t , Pr_t)$$

La standardisation des séries chronologiques revient donc à estimer $G_t$ afin de l'extraire des séries chronologiques. Cette extraction est réalisée en divisant chaque largeur de cerne mesurée par la valeur prédite du modèle utilisé pour estimer $G_t$ (Fritts, 1976 ; Serre-Bachet, 1982 ; McLaughlin *et al.*, 1983) :

$$I_t = R_t / G_t$$

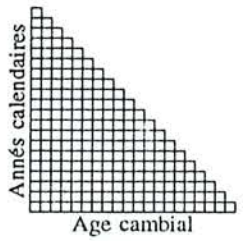
L'estimation de la tendance indésirable $G_t$ peut se faire selon de nombreuses méthodes qui procèdent soit de façon déterministe (en ajustant *a priori* un modèle mathématique plus ou moins complexe à chaque série chronologique) ; soit de façon stochastique (en "filtrant" les variations de croissance sur chaque dendrogramme brut), (Briffa *et al.*, 1987). Cook *et al.* (1990) donnent une bonne synthèse et critique de toutes ces méthodes. Toutes ces méthodes de standardisation rendent très efficace la préparation des données en vue d'études dendroclimatiques puisqu'elles permettent de travailler sur des séries de cernes provenant d'échantillons différents, où toutes les variations à long terme causées par des facteurs bio-écologiques sont éliminées (Schweingruber, 1988).

**2 - Cas de l'étude des signaux à basse fréquence**

L'étude des tendances à long terme de la croissance radiale consiste à rechercher dans les séries chronologiques les signaux à basse fréquence liés à des évolutions lentes et continues des conditions environnementales. Cependant, ces facteurs évoluent conjointement avec la composante biologique due à l'augmentation de l'âge des cernes. En effectuant, comme précédemment, une standardisation "arbre par arbre", ces deux signaux sont éliminés ensemble des séries chronologiques. Kuivinen & Lawson (1982) ont montré lors d'une étude dendroclimatique du bouleau dans le sud du Groenland, qu'il existait une dérive positive à long terme de la croissance radiale qui pouvait être corrélée aux augmentations de températures observées entre 1880 et 1895 et entre 1925 et 1940, mais que cette tendance était inférieure à celle observée par d'autres auteurs dans des conditions semblables (Cropper & Fritts, 1981), probablement à cause d'une standardisation "excessive" à l'aide de polynômes. D'après Hari & Arovaara (1984), il est impossible de séparer l'effet âge des facteurs environnementaux par une méthode de standardisation classique arbre par arbre si ceux-ci sont âgés de moins de 80 ans. Pour étudier les facteurs qui influencent la croissance radiale à long terme il est donc souhaitable de procéder autrement. La première solution consiste à ne pas standardiser les chronologies, la seconde solution est de trouver une méthode de standardisation appropriée au but recherché.

Sans standardisation, une moyenne des largeurs ou surfaces de cernes brutes peut être calculée en fonction des différentes dates disponibles pour étudier l'évolution à long terme des accroissements radiaux. Ceci pourrait effectivement être réalisé si on disposait d'une matrice de données où, pour chaque combinaison âge cambial/année calendaire, des cernes étaient disponibles. Or, il est impossible d'obtenir un tel lot de données à cause de la répartition actuelle des classes d'âges dans des forêts cultivées (Figure 19). S'il reste sur pied des arbres de 200 ans, il est impossible de trouver en quantité suffisante des arbres qui ont eu 200 ans il y a deux siècles. En l'absence d'arbres fossiles ou sub-fossiles, l'échantillon de cernes est toujours

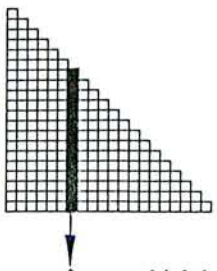
Pour chaque lot de données :



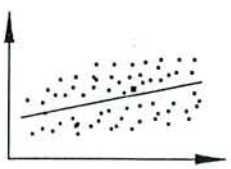

Analyse sans standardisation :

Analyses avec standardisation :

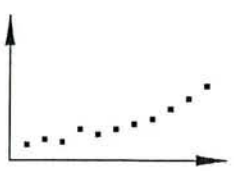
**Méthode à âge constant**



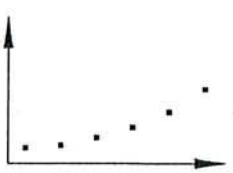
Pour un âge cambial donné, on analyse les largeurs ou les surfaces de cernes ...



sur une base de temps annuelle,

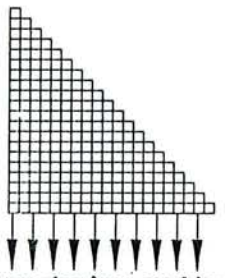


sur des périodes de dix ans,

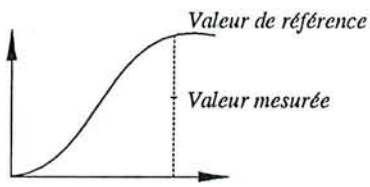


ou sur des périodes de vingt ans.

**Création et analyse d'indices de croissance**

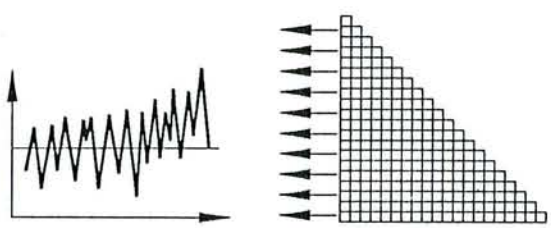


A partir de tous les âges cambiaux disponibles,



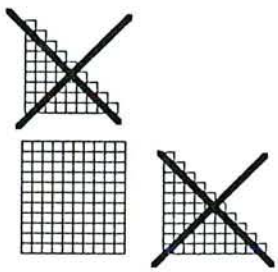

$$\textit{Indice de croissance} = \frac{\textit{Valeur mesurée}}{\textit{Valeur de référence}}$$

une courbe "âge" est calculée et utilisée pour transformer les largeurs ou les surfaces de cernes en indices de croissance dégagés de l'effet âge.

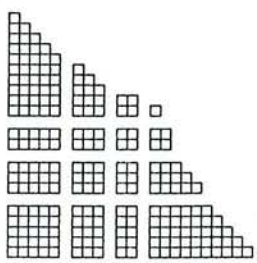


Pour chaque année calendaire, les indices de croissance sont moyennés de façon à obtenir une courbe retraçant l'évolution de la croissance radiale sur plusieurs années.

**Analyse de variance**



A partir d'un sous-ensemble du lot initial de données,



ou à partir du lot initial de données découpé en classes d'effectifs constants,

on étudie conjointement, par analyse de variance, les effets âge et date ainsi que leur interaction.

**Figure 20** : Synthèse de trois méthodes appliquées pour étudier l'évolution à long terme de la croissance radiale.

déséquilibré : les dates anciennes ne sont représentées que par de jeunes cernes, et les cernes âgés n'ont été formés qu'à des dates récentes. Autrement dit, l'âge cambial moyen des cernes dont on dispose augmente avec la date. La courbe moyenne de l'évolution de l'ensemble des largeurs de cernes en fonction des différentes dates disponibles fait alors surtout ressortir la composante biologique qui lie les largeurs de cernes à l'augmentation de l'âge cambial. Il est alors impossible de tirer des conclusions valides concernant l'évolution de la croissance radiale en fonction de modifications environnementales. Par contre, pour étudier l'évolution à long terme des accroissements radiaux sans standardiser les valeurs initiales, on peut choisir de fixer le facteur âge. Cette méthode a été développée par Becker (1987a) ; c'est la méthode dite "à âge constant", où la croissance radiale est analysée en fonction de la date, à un âge de référence courant donné (***première méthode d'analyse***).

Dans le cas particulier de l'étude des signaux à basse fréquence contenus dans les séries chronologiques, la standardisation implique de pouvoir corriger chaque largeur ou surface de cerne de façon à supprimer uniquement "l'effet âge". Il est alors obligatoire d'échantillonner un grand nombre d'arbres d'âges différents. L'effet âge peut être estimé indépendamment de la date en recherchant une loi liant l'évolution des accroissements annuels à l'âge courant. Cette méthode permet d'obtenir des indices de croissance à partir d'une courbe âge régionale (***seconde méthode d'analyse***).

Le calcul d'indices de croissance à partir d'une courbe âge implique que la forme de celle-ci ne varie pas avec le temps (Cook *et al.*, 1990). Si des évolutions lentes et continues des conditions environnementales affectent la croissance radiale au cours du temps, une partie de cette information est incluse dans la courbe âge et donc exclue des indices de croissance lors de la standardisation. Il est alors préférable d'analyser simultanément les facteurs âge et date. Cette analyse conjointe peut être faite en employant les analyses de variance (***troisième méthode d'analyse***).

Il est enfin important d'ajouter que toutes ces méthodes ne sont pas adéquates pour l'étude des signaux à haute fréquence, c'est-à-dire de la variabilité d'origine climatique.

Les trois méthodes d'analyse à long terme de la croissance radiale vont être développées dans le prochain chapitre. Puisque les résultats intermédiaires sont souvent importants et nécessaires à la poursuite des analyses, nous présenterons successivement méthodes et résultats afin que l'exposé soit plus clair. La figure 20 donne un résumé des différentes méthodes appliquées.

# Chapitre IV

# ANALYSE DE LA CROISSANCE RADIALE A LONG TERME

## I - RECHERCHE D'UNE TENDANCE A LONG TERME DE LA CROISSANCE RADIALE PAR LA METHODE A AGE CONSTANT.

### 1 - Méthode à âge constant sur une base annuelle

#### 1.1 - Principe

La question clef concernant l'étude de l'évolution à long terme de la croissance radiale est de savoir si les arbres poussent actuellement aussi bien, mieux, ou moins bien que dans le passé, indépendamment du vieillissement qui provoque une diminution naturelle des largeurs de cernes. Becker (1987a) proposa d'aborder le problème en posant la question : "*les arbres ayant 70 ans (par exemple) aujourd'hui poussent-ils globalement aussi bien que leurs aînés lorsqu'ils avaient cet âge de référence de 70 ans?*". Autrement dit, les largeurs de cernes d'un âge cambial donné sont-elles stables au cours du temps?

Afin de répondre à cette question, nous pouvons extraire de notre échantillon tous les cernes d'un âge cambial donné pour voir si les largeurs ont évolué avec le temps. Une moyenne des largeurs et des surfaces des cernes élaborés à une même date peut être calculée puisque nous avons échantillonné plusieurs arbres de même âge actuel. Pour que cette moyenne soit significative d'un niveau de croissance à un moment donné, il faut s'assurer que chaque point moyen tamponne convenablement les variations individuelles liées à la station, au niveau de compétition, etc. Chaque moyenne annuelle doit donc prendre en compte un nombre suffisant de largeurs de cernes d'un même âge cambial. Ainsi, pour renforcer ces moyennes, on prend en compte dans un même calcul tous les cernes d'un âge cambial donné avec une fourchette de deux ans, et les moyennes calculées sur moins de cinq valeurs sont éliminées. Cette fourchette de deux ans permet également d'estomper les effets climatiques interannuels majeurs.

Pour chaque âge cambial, un graphique est alors construit en reportant, en fonction de la date, les largeurs et les surfaces de cernes moyennes. Au delà de cent ans, le nombre des cernes disponible est insuffisant pour calculer des moyennes significatives. Bien que nous disposions de 53 095 cernes concernant les arbres de futaie et de 40 876 cernes concernant les arbres de taillis-sous-futaie, chaque point moyen n'a été calculé qu'à partir de cinquante quatre données au maximun pour les arbres de futaie et trente huit pour les arbres de taillis-sous-futaie. Les quarantes graphiques construits ainsi sont présentés, pour la futaie et le taillis-sous-futaie, sur les planches 1 et 1 bis.

#### 1.2 - Premiers résultats et complément de la méthode

Tous les nuages de points correspondant aux arbres de futaie montrent très nettement que le niveau de croissance a augmenté au cours du temps, quel que soit l'âge cambial considéré. Cette augmentation est perceptible avec les largeurs et les surfaces de cernes. Cette tendance existe également pour les cernes correspondant aux arbres de taillis-sous-futaie mais, à cause d'une variance interannuelle plus importante, les changements de niveau de croissance sont moins nets.

Afin de tester la signification de ces tendances, nous avons recherché une corrélation entre la largeur ou la surface des cernes et la date, sur chacun des nuages de points. Le meilleur ajustement, liant l'évolution des

accroissements moyens au temps, est rarement une relation linéaire simple, mais plutôt une relation curviligne plus ou moins complexe. Avec de tels modèles polynomiaux, il est difficile de quantifier l'accroissement moyen en fonction du temps et de comparer les résultats entre eux ; en effet le procédé d'ajustement polynomial est purement mécanique et conduit à l'obtention d'une fonction dont les paramètres ne possèdent aucune signification propre (Dagnelie, 1975a et b). Pour pouvoir comparer aisément les deux types de traitement sylvicole pour un même âge cambial, de simples droites de régression sont calculées sur une période de temps commune à la futaie et au taillis-sous-futaie. Sur chaque graphique, la probabilité pour que la pente de la droite de régression soit nulle est reportée (*** = probabilité inférieure ou égale à 0,01% ; ** = probabilité comprise entre 0,01 et 1% ; * = probabilité comprise entre 1 et 5 % ; NS = probabilité supérieure à 5%, pente non significative).

### 1.3 - Résultats

Les résultats des ajustements linéaires sont synthétisés dans les tableaux 7 et 8.

**Pour les arbres de futaie**, l'observation des graphiques, tant en largeur qu'en surface, indique que le niveau de croissance moyen a augmenté très significativement en fonction du temps pour tous les cernes d'un âge donné. Si l'on considère les largeurs de cernes, la pente de la tendance augmente jusqu'à l'âge de 50 ans pour atteindre la valeur de 1,62 $100^{ème}$ de mm par an. De 60 à 100 ans, cette pente se stabilise autour de 1,2 $100^{ème}$ de mm par an. Si l'on considère les surfaces de cernes, on constate que la pente de la tendance ne cesse d'augmenter jusqu'à 100 ans.

**Pour les arbres de taillis-sous-futaie**, les niveaux de croissance des cernes de 40 à 70 ans ont significativement augmenté au cours du temps, en largeur et en surface. Les valeurs de cette tendance sont toujours inférieures à celles observées pour les cernes de futaie, mais, comme celle-ci, la tendance maximale est atteinte aux âges de 50-60 ans si l'on considère les largeurs de cernes, et elle ne fait qu'augmenter si l'on considère les surfaces. Cette tendance positive est confirmée avec les surfaces des cernes de 80 et 90 ans, mais elle n'est pas significative pour des âges supérieurs. Enfin, il est important de noter l'évolution particulière des largeurs et des surfaces de cernes de 10 à 30 ans : on observe, soit une absence de tendance, soit une tendance décroissante.

## 2 - Méthode à âge constant sur une base décennale ou bi-décennale

### 2.1 - Principe

Les variations interannuelles de la croissance radiale sont un bruit de fond indésirable pouvant masquer l'existence d'une tendance à long terme. Au lieu de calculer des moyennes annuelles de largeur ou de surface de cernes, nous calculons ces moyennes sur des périodes de dix ou de vingt ans. Ces points sont reportés, avec leurs intervalles de confiance calculés pour un risque de 5%, sur les planches 2 et 2 bis en ce qui concerne les moyennes décennales et sur les planches 3 et 3 bis en ce qui concerne les moyennes bi-décennales. Chaque point est au minimum le résultat d'une moyenne de trente largeurs ou surfaces de cernes.

### 2.2 - Résultats

Les résultats obtenus ne sont pas différents de ceux exposés précédemment, mais la disparition de la variabilité interannuelle permet d'interpréter les graphiques plus facilement. Les informations apportées par les largeurs ou les surfaces de cernes sont identiques, mais l'utilisation des surfaces moyennes tend à rendre plus clairs les phénomènes.

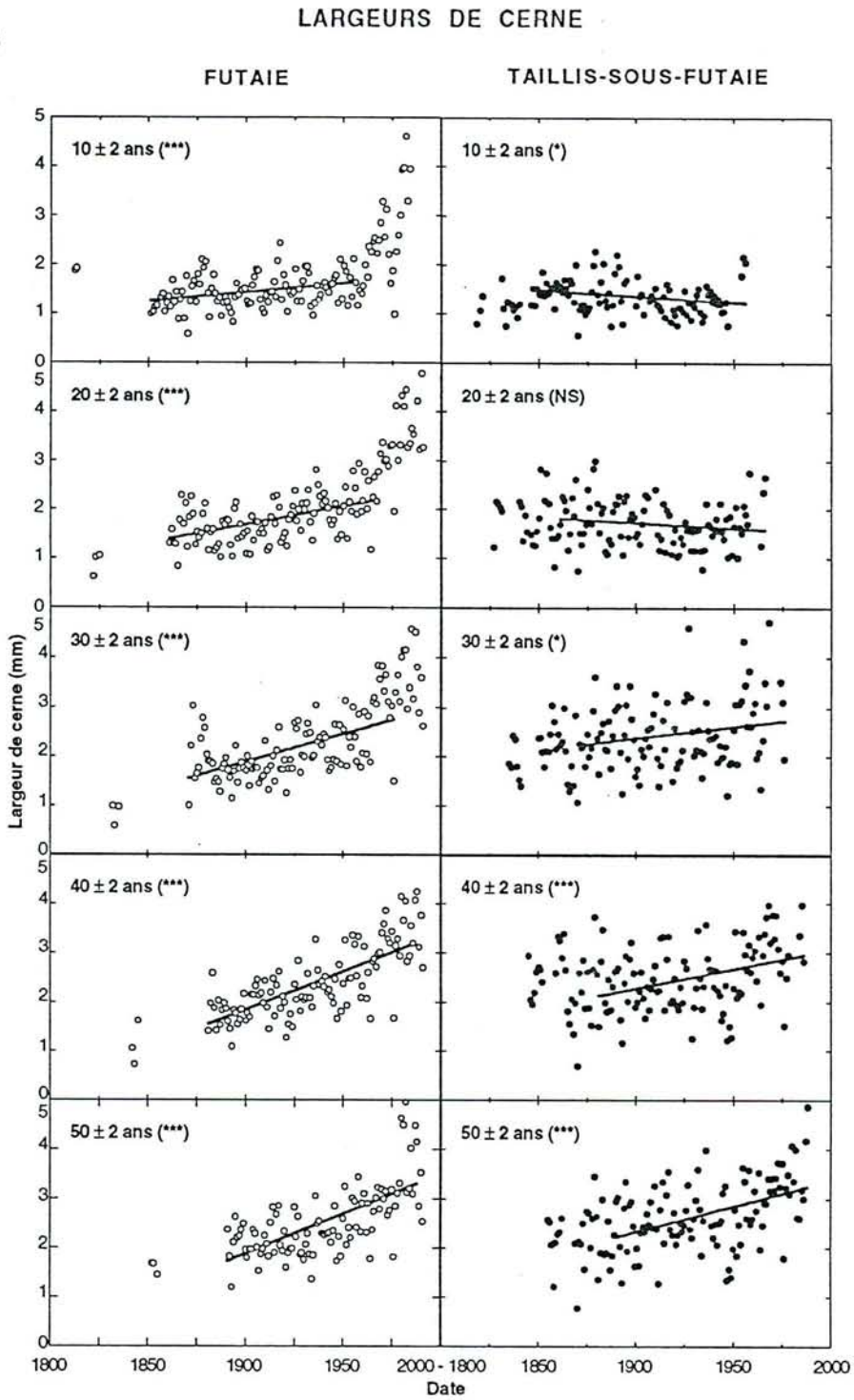
| | | FUTAIE | | | | | | | TAILLIS-SOUS-FUTAIE | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Age ± 2 ans | Période | Effectif | R | Pente | Ecart type | I.C. 95% | p (%) | | Effectif | R | Pente | Ecart type | I.C. 95% | p (%) | | Test d'égalité des pentes |
| 10 | 1851-1956 | 105 | 0,335 | 0,365 | 0,101 | 0,200 | 0,05 | ** | 94 | 0,213 | -0,244 | 0,117 | 0,232 | 3,95 | * | ≠ (0,6%) |
| 20 | 1861-1966 | 106 | 0,512 | 0,744 | 0,122 | 0,242 | 0,01 | *** | 98 | 0,141 | -0,218 | 0,157 | 0,311 | 16,72 | NS | |
| 30 | 1871-1976 | 106 | 0,577 | 1,137 | 0,157 | 0,311 | 0,01 | *** | 99 | 0,203 | 0,466 | 0,228 | 0,452 | 4,39 | * | ≠ (8,5%) |
| 40 | 1881-1986 | 106 | 0,725 | 1,546 | 0,144 | 0,285 | 0,01 | *** | 99 | 0,357 | 0,779 | 0,207 | 0,410 | 0,03 | ** | ≠ (3,07%) |
| 50 | 1891-1988 | 98 | 0,657 | 1,619 | 0,19 | 0,377 | 0,01 | *** | 96 | 0,435 | 1,043 | 0,222 | 0,440 | 0,01 | *** | = (16%) |
| 60 | 1901-1991 | 91 | 0,501 | 1,202 | 0,22 | 0,437 | 0,01 | *** | 89 | 0,392 | 1,143 | 0,287 | 0,570 | 0,01 | *** | = (>50%) |
| 70 | 1911-1991 | 81 | 0,506 | 1,248 | 0,239 | 0,475 | 0,01 | *** | 79 | 0,268 | 0,871 | 0,356 | 0,708 | 1,68 | * | = (>50%) |
| 80 | 1921-1991 | 71 | 0,433 | 1,169 | 0,293 | 0,584 | 0,02 | ** | 69 | 0,2 | 0,648 | 0,389 | 0,776 | 10 | NS | |
| 90 | 1931-1991 | 61 | 0,397 | 1,258 | 0,379 | 0,758 | 0,16 | ** | 59 | 0,214 | 0,86 | 0,519 | 1,039 | 10,29 | NS | |
| 100 | 1941-1991 | 51 | 0,474 | 1,682 | 0,447 | 0,897 | 0,04 | ** | 49 | 0,071 | 0,343 | 0,698 | 1,402 | 62,6 | NS | |
| 110 | 1951-1991 | 41 | 0,195 | 0,838 | 0,676 | 1,365 | 22,26 | NS | 41 | 0,215 | -1,125 | 0,816 | 1,648 | 17,61 | NS | |
| 120 | 1961-1991 | 31 | 0,085 | 0,47 | 1,019 | 2,078 | 64,79 | NS | 31 | 0,114 | 0,854 | 1,379 | 2,812 | 54,09 | NS | |

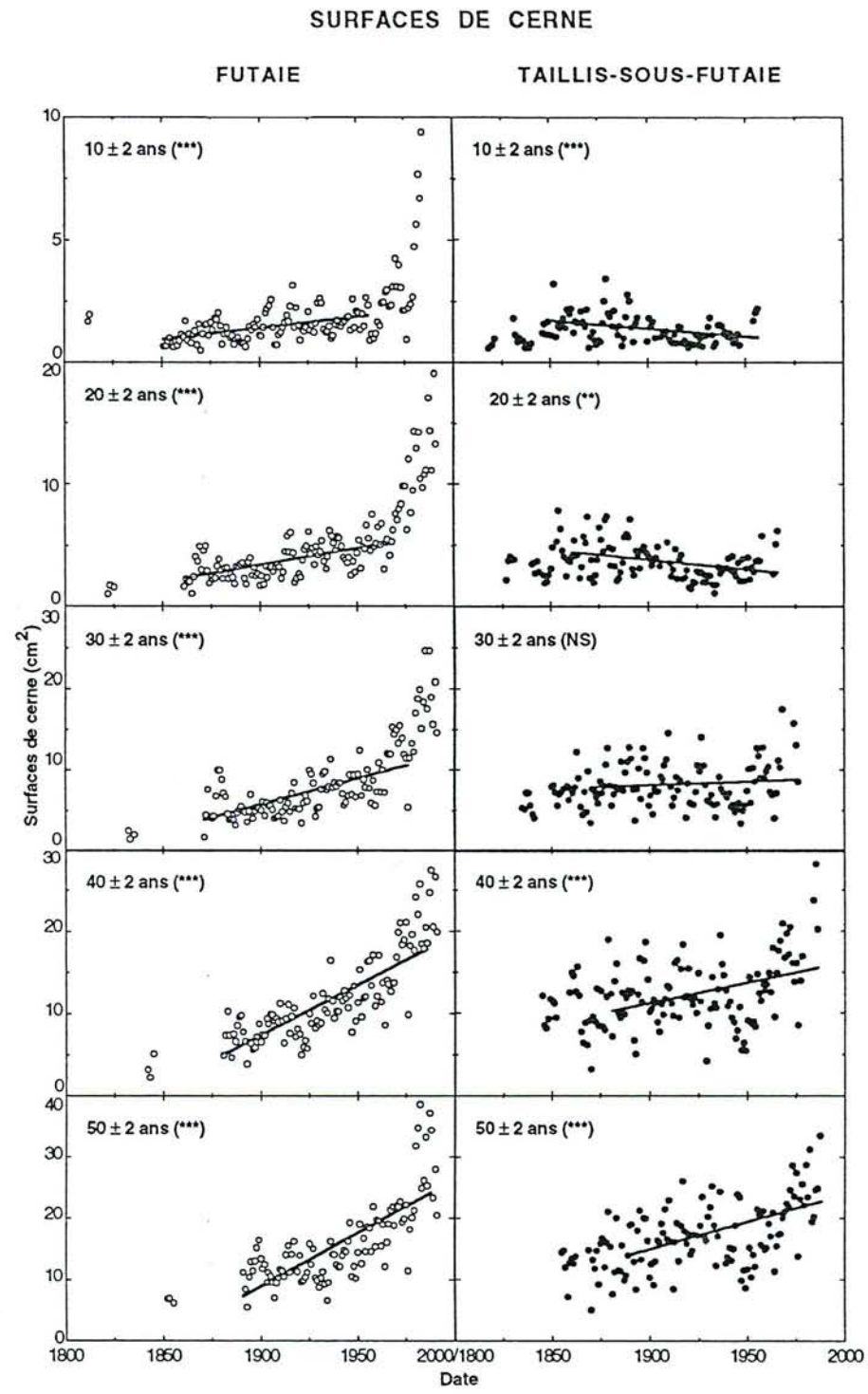
**Tableau 7** : Evolution des largeurs de cernes en fonction de la date, pour différents âges courants.

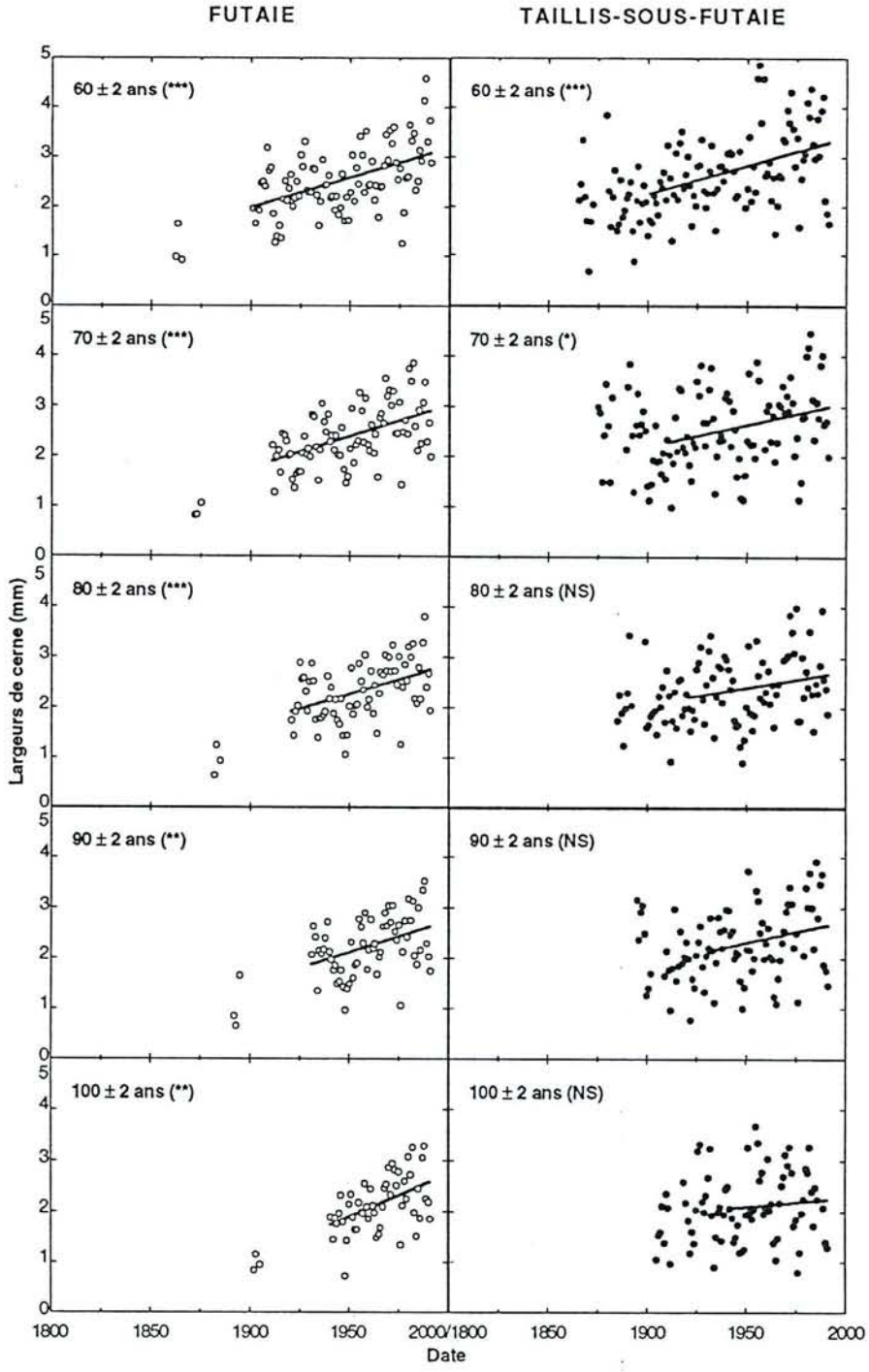
| | | FUTAIE | | | | | | | TAILLIS-SOUS-FUTAIE | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Age ± 2 ans | Période | Effectif | R | Pente | Ecart type | I.C. 95% | p (%) | | Effectif | R | Pente | Ecart type | I.C. 95% | p (%) | | Test d'égalité des pentes |
| 10 | 1851-1956 | 105 | 0,524 | 0,923 | 0,148 | 0,293 | 0,01 | *** | 94 | 0,348 | -0,655 | 0,184 | 0,365 | 0,06 | ** | ≠ (<0,1%) |
| 20 | 1861-1966 | 106 | 0,626 | 2,794 | 0,341 | 0,676 | 0,01 | *** | 98 | 0,34 | -1,592 | 0,449 | 0,890 | 0,06 | ** | ≠ (<0,1%) |
| 30 | 1871-1976 | 106 | 0,672 | 6,408 | 0,693 | 1,373 | 0,01 | *** | 99 | 0,089 | 0,811 | 0,924 | 1,832 | 38,23 | NS | |
| 40 | 1881-1986 | 106 | 0,813 | 12,195 | 0,856 | 1,696 | 0,01 | *** | 99 | 0,358 | 4,955 | 1,312 | 2,602 | 0,03 | ** | ≠ (0,14%) |
| 50 | 1891-1988 | 98 | 0,746 | 17,489 | 1,595 | 3,163 | 0,01 | *** | 96 | 0,454 | 8,932 | 1,81 | 3,591 | 0,01 | *** | ≠ (1,44%) |
| 60 | 1901-1991 | 91 | 0,63 | 15,798 | 2,066 | 4,101 | 0,01 | *** | 89 | 0,419 | 12,674 | 2,946 | 5,851 | 0,01 | *** | = (>50%) |
| 70 | 1911-1991 | 81 | 0,662 | 18,184 | 2,354 | 4,682 | 0,01 | *** | 79 | 0,307 | 10,585 | 3,738 | 7,439 | 0,59 | ** | = (21,5%) |
| 80 | 1921-1991 | 71 | 0,561 | 19,528 | 3,471 | 6,918 | 0,01 | *** | 69 | 0,272 | 10,877 | 4,696 | 9,364 | 2,36 | * | = (30%) |
| 90 | 1931-1991 | 61 | 0,519 | 21,834 | 4,686 | 9,367 | 0,01 | *** | 59 | 0,331 | 20,034 | 7,575 | 15,158 | 1,05 | * | = (>50%) |
| 100 | 1941-1991 | 51 | 0,588 | 29,154 | 5,735 | 11,510 | 0,01 | *** | 49 | 0,124 | 8,72 | 10,216 | 20,524 | 39,76 | NS | |
| 110 | 1951-1991 | 41 | 0,331 | 21,922 | 9,991 | 20,172 | 3,42 | ** | 41 | 0,135 | -11,336 | 13,333 | 26,919 | 40,04 | NS | |
| 120 | 1961-1991 | 31 | 0,204 | 19,656 | 17,475 | 35,632 | 26,99 | NS | 31 | 0,182 | 23,587 | 23,701 | 48,326 | 32,79 | NS | |

**Tableau 8** : Evolution des surfaces de cernes en fonction de la date, pour différents âges courants.

Dans chaque tableau, pour chaque type de traitement sylvicole et pour différents âges courants, on donne le nombre de points pris en compte dans la régression, le coefficient de corrélation, la pente (en centième de mm par an), l'écart-type, l'intervalle de confiance calculé pour un risque de 5% et la probabilité pour que la pente calculée soit nulle.


LARGEURS DE CERNE
FUTAIE
TAILLIS-SOUS-FUTAIE
10 ± 2 ans (***)
10 ± 2 ans (*)
20 ± 2 ans (***)
20 ± 2 ans (NS)
30 ± 2 ans (***)
30 ± 2 ans (*)
40 ± 2 ans (***)
40 ± 2 ans (***)
50 ± 2 ans (***)
50 ± 2 ans (***)
Largeur de cerne (mm)
Date


SURFACES DE CERNE
FUTAIE
TAILLIS-SOUS-FUTAIE
10 ± 2 ans (***)
10 ± 2 ans (***)
20 ± 2 ans (***)
20 ± 2 ans (**)
30 ± 2 ans (***)
30 ± 2 ans (NS)
40 ± 2 ans (***)
40 ± 2 ans (***)
50 ± 2 ans (***)
50 ± 2 ans (***)
Surfaces de cerne (cm2)
Date





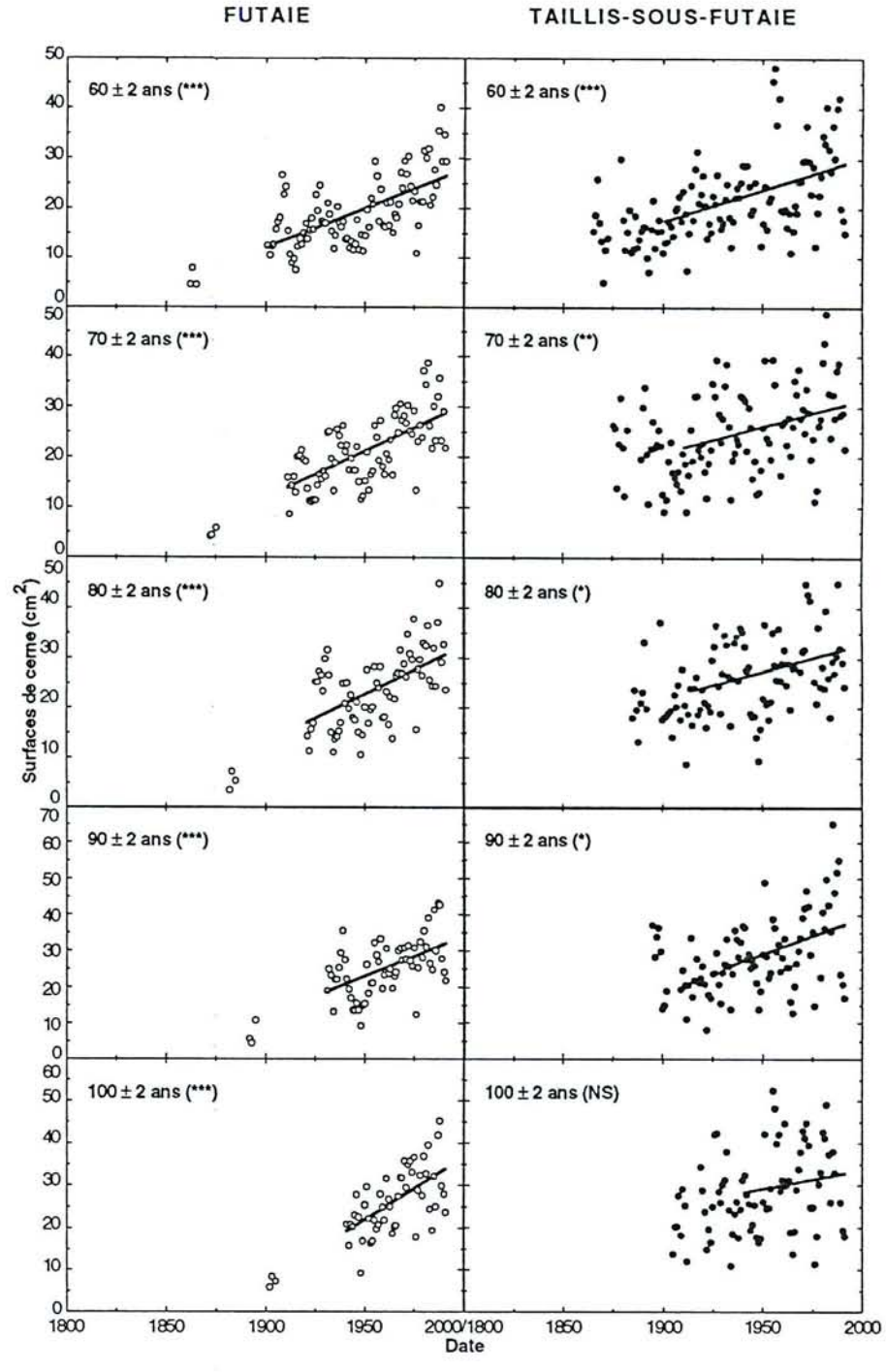
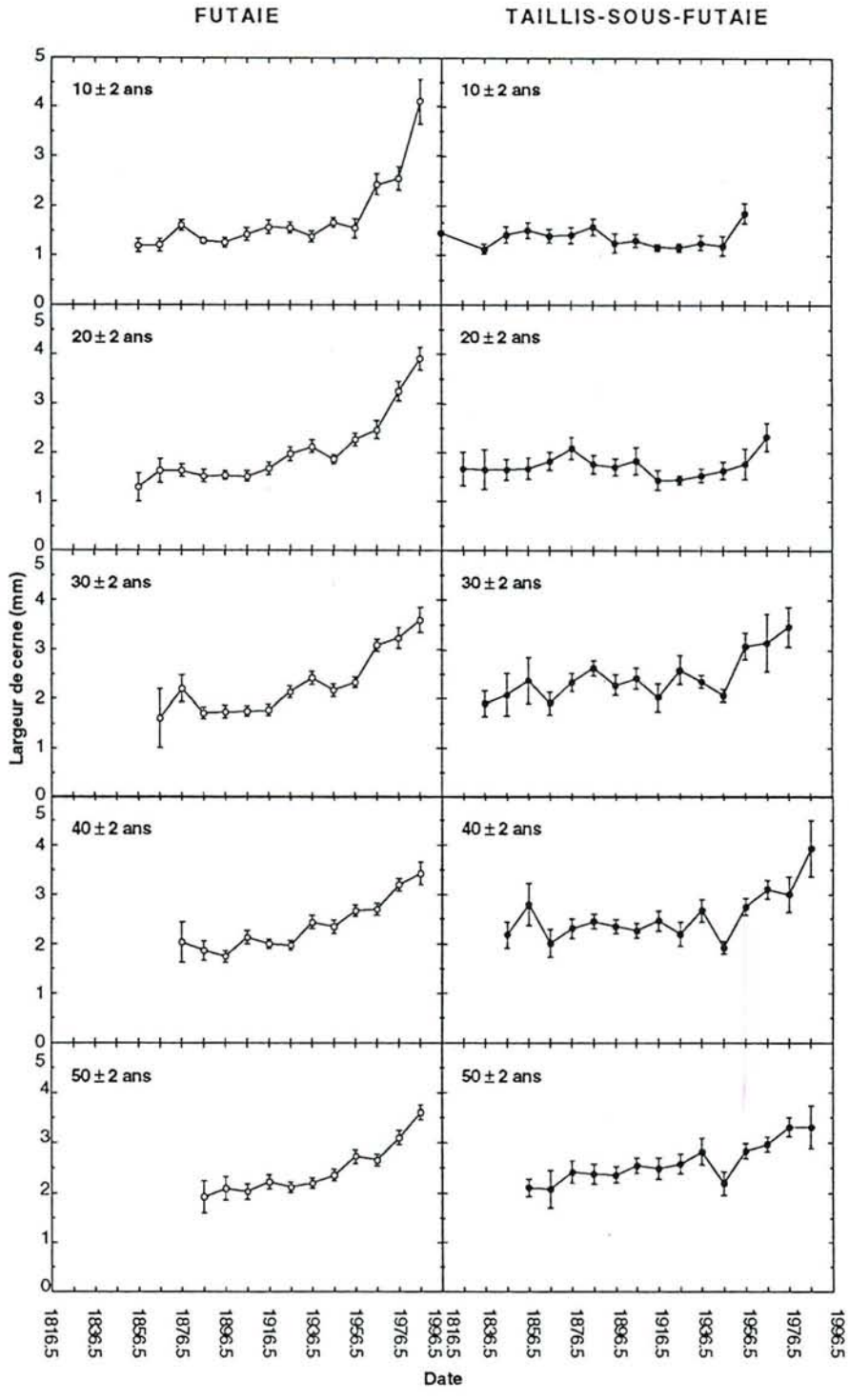




Planche 1 bis


FUTAIE
TAILLIS-SOUS-FUTAIE
10 ± 2 ans
20 ± 2 ans
30 ± 2 ans
40 ± 2 ans
50 ± 2 ans
Largeur de cerne (mm)
Date

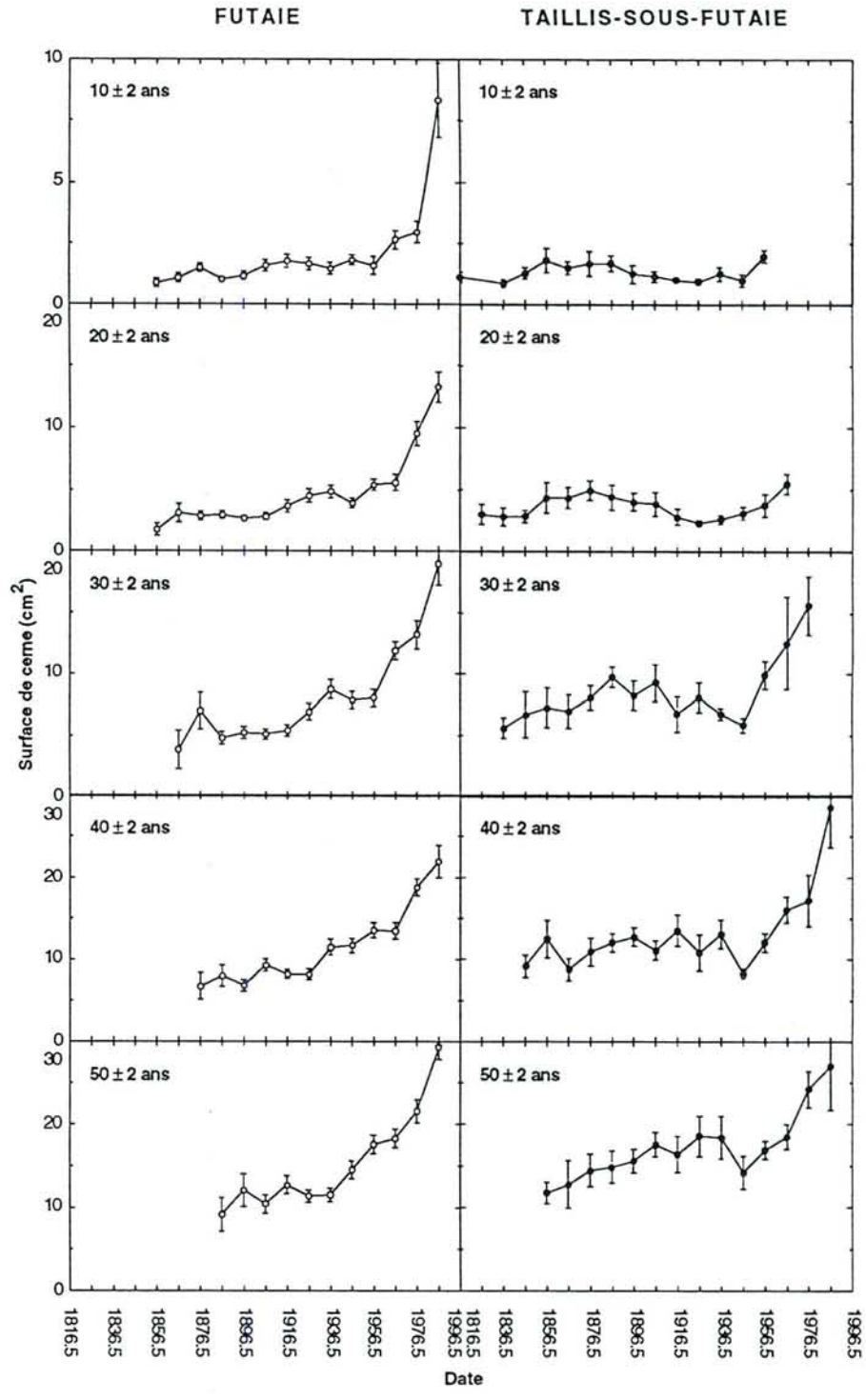
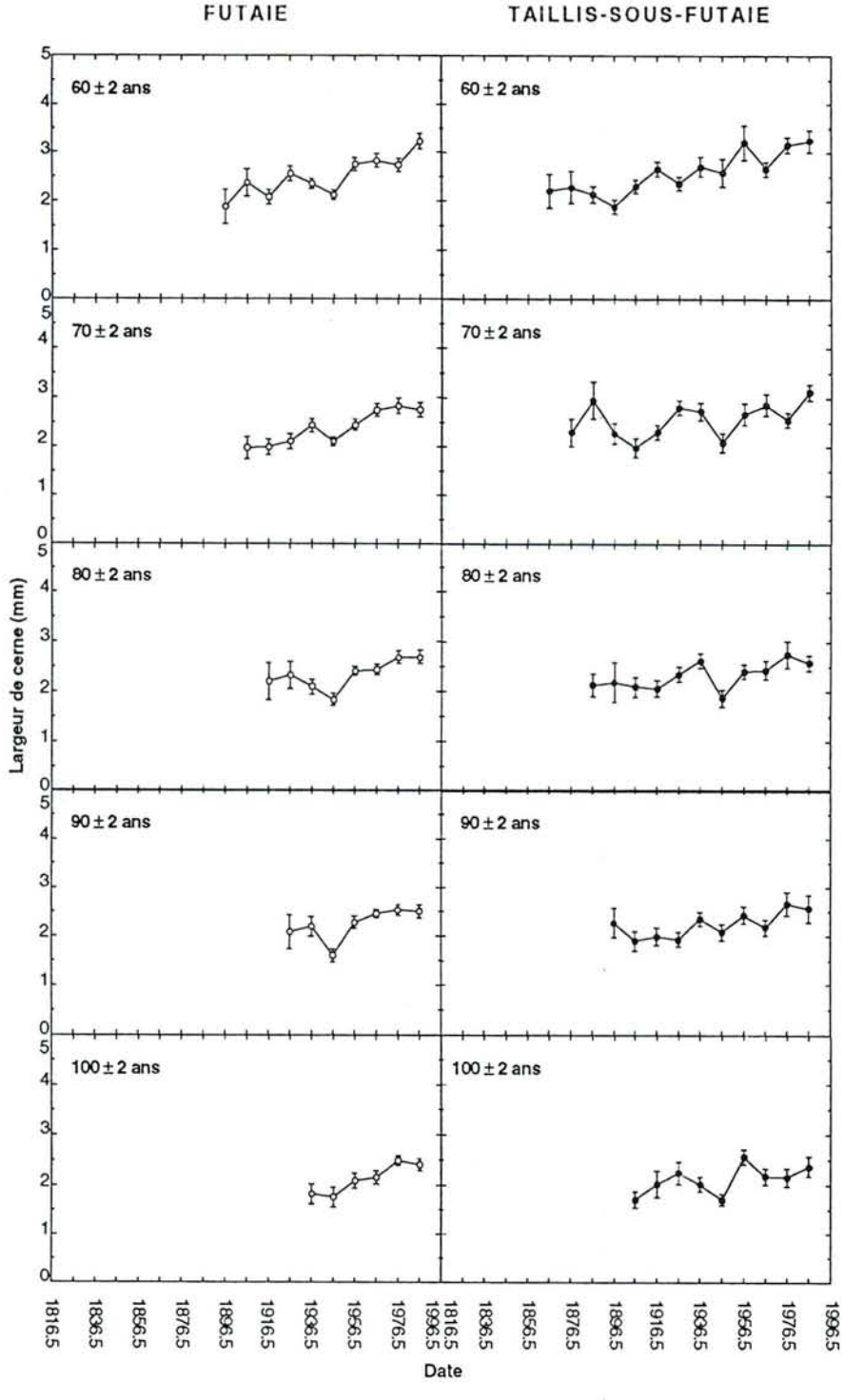

FUTAIE
TAILLIS-SOUS-FUTAIE
10 ± 2 ans
20 ± 2 ans
30 ± 2 ans
40 ± 2 ans
50 ± 2 ans
Surface de cerne (cm²)
Date

Planche 2



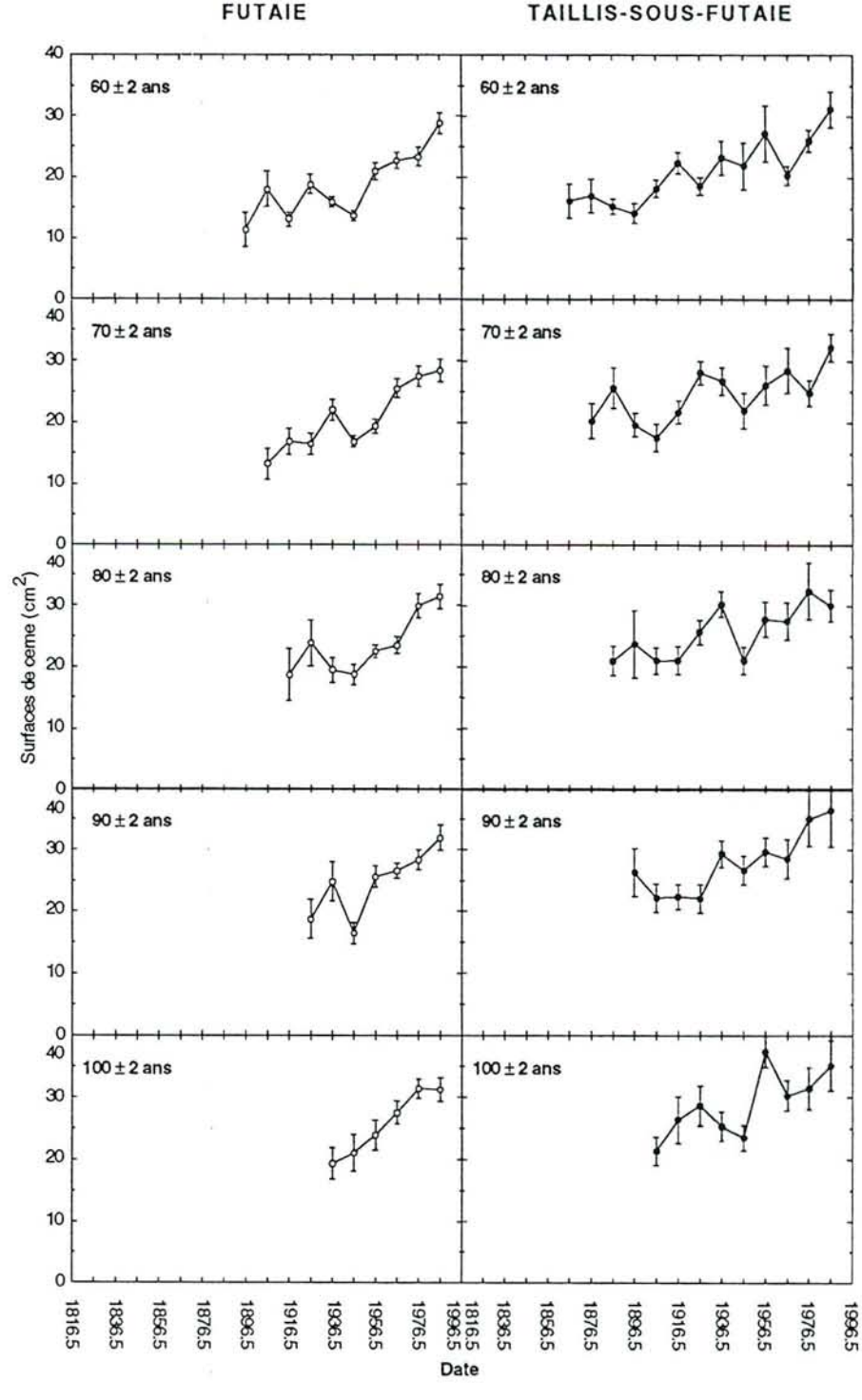
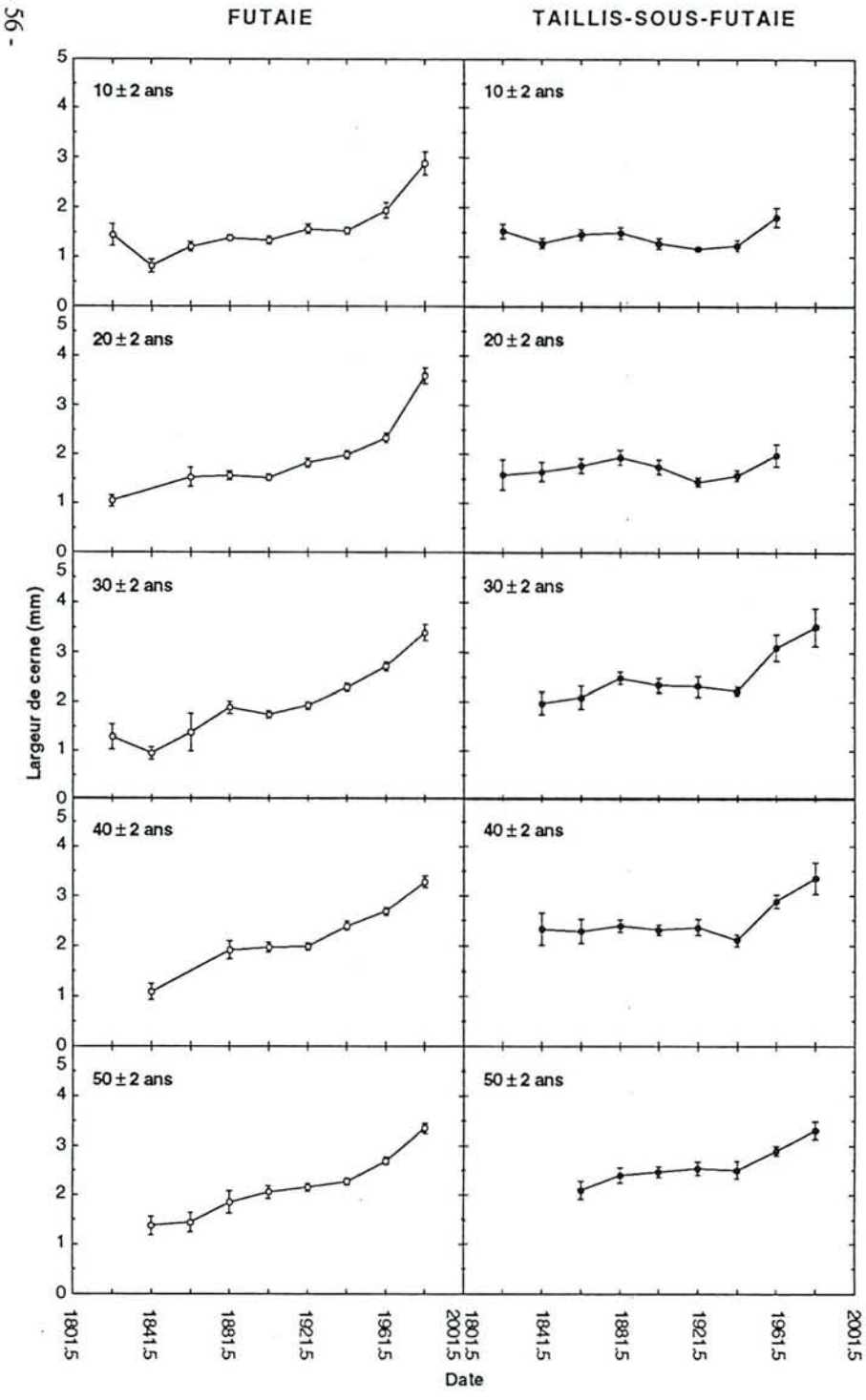




Planche 2 bis


FUTAIE
TAILLIS-SOUS-FUTAIE
10 ± 2 ans
20 ± 2 ans
30 ± 2 ans
40 ± 2 ans
50 ± 2 ans
Largeur de cerne (mm)
Date
1801.5
1841.5
1881.5
1921.5
1961.5
2001.5

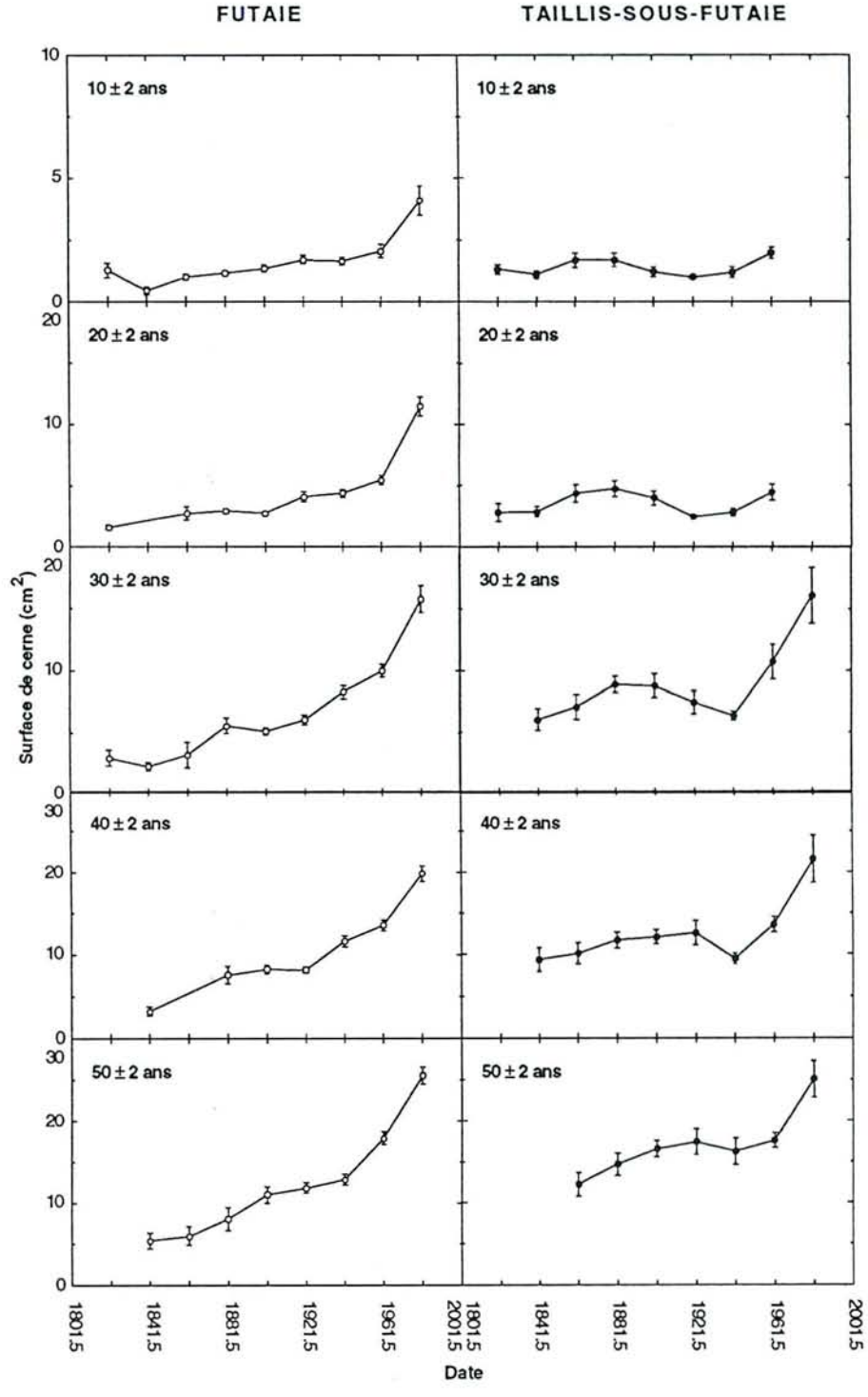
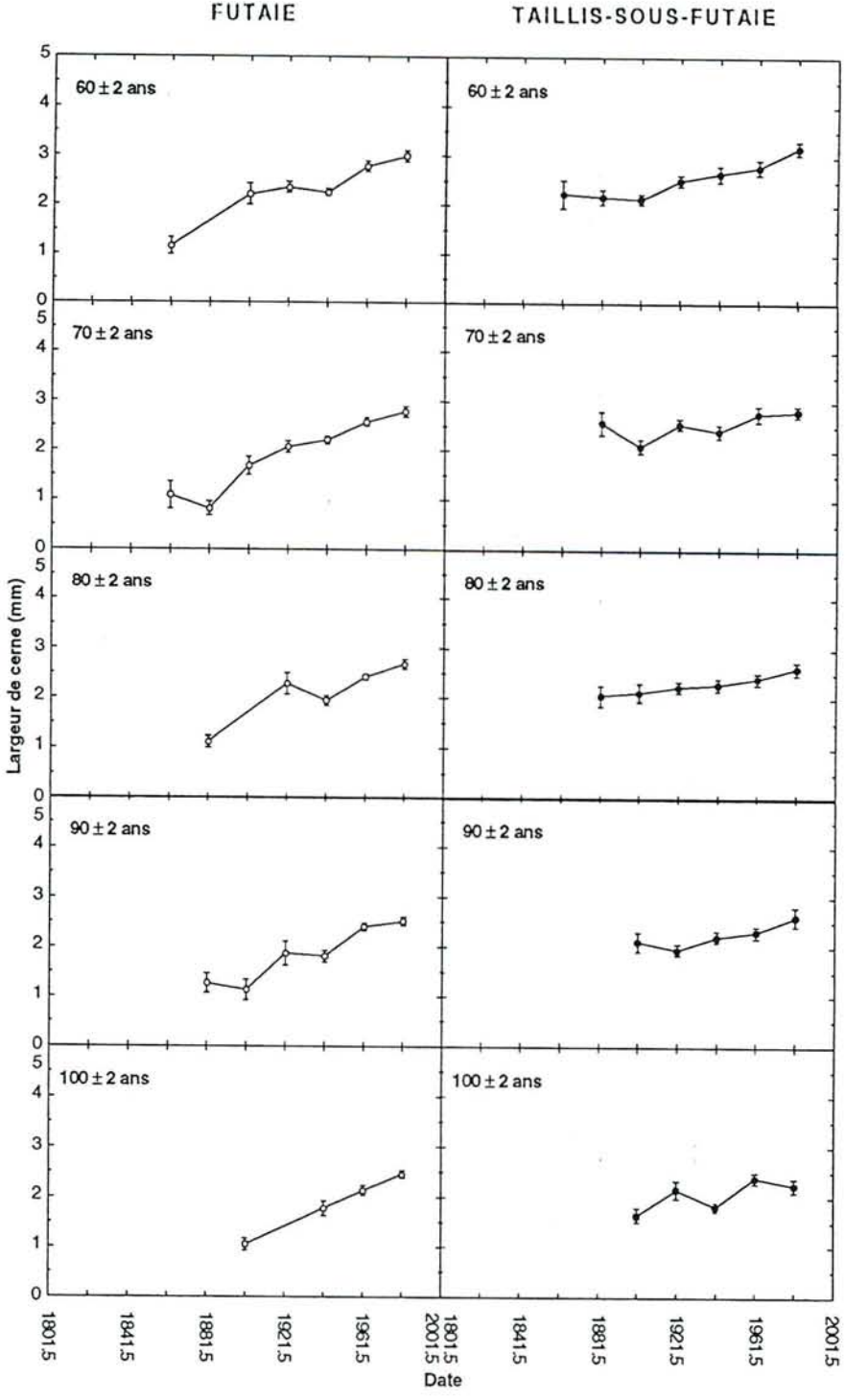

FUTAIE
TAILLIS-SOUS-FUTAIE
10 ± 2 ans
20 ± 2 ans
30 ± 2 ans
40 ± 2 ans
50 ± 2 ans
Surface de cerne (cm²)
Date
1801.5
1841.5
1881.5
1921.5
1961.5
2001.5

Planche 3



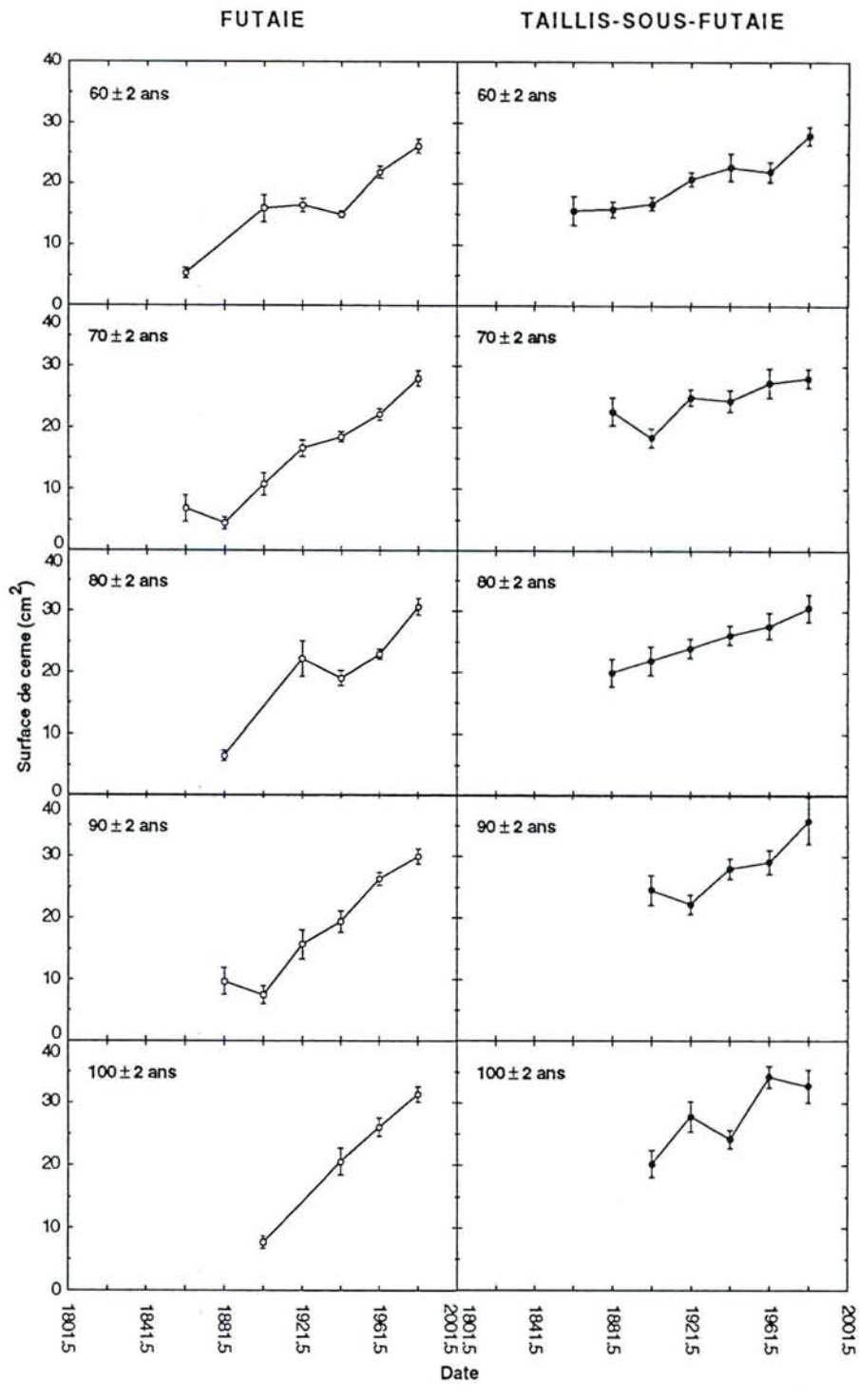




Planche 3 bis

Le niveau de croissance moyen, calculé sur des périodes de vingt ans, a augmenté significativement en fonction du temps pour toutes les classes d'âges cambiaux étudiées dans le cas des arbres de futaie, et à partir des cernes de trente ans dans le cas du taillis-sous-futaie.

Pour les cernes de futaie dont l'âge cambial est compris entre dix et cinquante ans, l'augmentation du niveau de croissance, perceptible depuis le milieu du XIXe siècle, s'accélère nettement à partir des années 1950 quand on considère les accroissements moyens calculés sur des périodes de dix ans. Le même phénomène s'observe chez les arbres de taillis-sous-futaie, mais dans ce cas, on doit exclure les cernes de moins de trente ans qui ne montrent pas de tendance de croissance particulière en fonction du temps.

### 3 - Conclusion sur la méthode à âge constant

L'étude de l'évolution de la croissance radiale en fonction du temps par la méthode à âge constant a comme principal avantage d'être extrêmement simple. Les biais de calcul sont très limités car les données de base brutes sont utilisées. Cette méthode est efficace dans un but prospectif, mais elle reste assez peu utilisée (Becker, 1987a ; Bert 1992 ; Briffa, 1992 ; Becker ,1994b ; Picard, 1995).

La méthode à âge constant devient cependant très lourde si on cherche à analyser finement les phénomènes. Un grand nombre de graphiques doit être construit : avec une fourchette de deux ans, vingt classes d'âges cambiaux peuvent être étudiées jusqu'à l'âge courant de 100 ans pour chacun des traitements sylvicoles. A cause des problèmes liés à l'échantillonnage, la pertinence des graphiques n'est pas la même pour toutes les classes d'âges : les graphiques sont très explicites pour les jeunes âges cambiaux pour lesquels nous disposons d'un grand nombre de dates d'élaboration des cernes, mais ils sont plus difficiles à interpréter quand l'âge augmente car le nombre de points diminue considérablement. Les périodes couvertes par les points moyens et les niveaux de croissance à un âge donné étant variables, la comparaison des résultats entre plusieurs âges cambiaux et plusieurs traitements sylvicoles n'est pas immédiate. Enfin, le calcul de moyennes statistiquement fiables nécessite l'élimination d'une part non négligeable des données. L'étude de l'évolution à long terme des accroissements radiaux sans standardisation a donc un intérêt limité.

La méthode à âge constant nous permet cependant d'obtenir plusieurs résultats. Il existe une dérive positive de la croissance radiale chez le hêtre à l'étage collinéen depuis le milieu du siècle dernier. Cette dérive semble avoir une ampleur différente entre la futaie et le taillis-sous-futaie. Pour la futaie comme pour le taillis-sous-futaie, les années 1950 semblent être le début d'une succession d'années particulières, principalement pour les jeunes cernes.

## II - RECHERCHE D'UNE TENDANCE À LONG TERME DANS LA CROISSANCE RADIALE EN UTILISANT DES INDICES DE CROISSANCE STANDARDISES A PARTIR D'UNE ESTIMATION REGIONALE DE L'EFFET AGE.

Afin de confirmer les résultats obtenus par la méthode à âge constant, il apparaît souhaitable de regrouper l'information contenue dans l'ensemble des cernes. Pour cela il est nécessaire de retirer l'effet âge de nos chronologies en standardisant les surfaces de cernes.

La standardisation des séries chronologiques ayant été surtout appliquée lors des études dendroclimatologiques, ce terme technique semble être corrélé uniquement à la suppression des variations à basse fréquence contenues dans les largeurs ou surfaces de cernes. La standardisation peut cependant être une solution pour produire des séries temporelles où ne sont retenues que les variations à basse fréquence de la croissance radiale : "*Standardisation is a spectrally specific noise reduction method*", (Briffa *et al.*, 1987).

Les premiers auteurs ayant travaillé sur ce type de standardisation ont montré que les largeurs de cernes d'un grand nombre d'arbres d'une espèce donnée, échantillonné sur un même site, peuvent être exprimées mathématiquement comme une fonction de l'âge (Erlandson,1936 ; Mitchell, 1967 ; Komin, 1987 ; *in* Fritts, 1976 ; Cook *et al.*, 1990). Chaque cerne d'un âge donné peut alors être standardisé en fonction de la largeur moyenne (ou largeur de référence) calculée pour cet âge.

Ce type de standardisation peut s'appliquer dans le cas de l'étude de sites non perturbés et de peuplements équiennes (Briffa *et al.*, 1987) ou à l'échelle régionale en utilisant des arbres issus de différentes classes d'âge (Ording, 1941). Becker (1987a) a montré que cette méthode de standardisation, étendue à tous les arbres d'une même région, est extrêmement efficace pour étudier les variations à basse fréquence de la croissance radiale si des arbres de toutes les classes d'âges sont échantillonnés. Depuis, ce processus a été employé avec succès dans des études concernant les tendances à long terme (Wigley *et al*, 1987 ; Briffa *et al.*, 1992 ; Bert, 1993 ; Becker, 1994b ; Picard, 1995).

### 1 - Recherche d'une loi régionale liant l'accroissement annuel à l'âge courant

#### 1.1 - Calcul et interprétation des "courbes âge"

Les différentes séries chronologiques disponibles sont alignées en fonction de l'âge cambial des différents cernes. Pour chaque âge, une moyenne des largeurs de cernes est calculée. La distribution des accroissements moyens en fonction de l'âge cambial exprime alors l'évolution des largeurs de cernes en fonction de l'augmentation de l'âge. Une fonction mathématique ajustée à ce nuage est ensuite utilisée pour standardiser ces largeurs de cernes.

Le calcul des accroissements moyens à chaque date serait sans biais si on disposait d'un effectif de cernes constant pour chaque couple âge cambial/année calendaire. Or, du fait de la répartition des classes d'âges actuels en forêt, ce n'est pas le cas : par exemple (Figure 21), le nombre de cernes de 80 ans disponibles en 1960 est supérieur au nombre de cernes disponibles en 1980, 1940 ou 1880. Dans le calcul de l'accroissement moyen à l'âge de 80 ans, les cernes élaborés dans les années 60 ont un poids trop important par rapport aux cernes élaborés dans les années 1900. En outre, la majorité des cernes d'un âge donné a montré une augmentation du niveau de croissance depuis le siècle dernier. L'existence de cette tendance exagère encore les problèmes d'effectif. La courbe moyenne retraçant l'évolution des accroissements en fonction de l'âge serait alors biaisée.

Afin de minimiser ces erreurs, il est préférable de calculer les accroissements moyens en pondérant chaque largeur de cerne de façon inversement proportionnelle à l'effectif à chaque date (Bert, 1992 ; Becker *et al.*, 1994b).

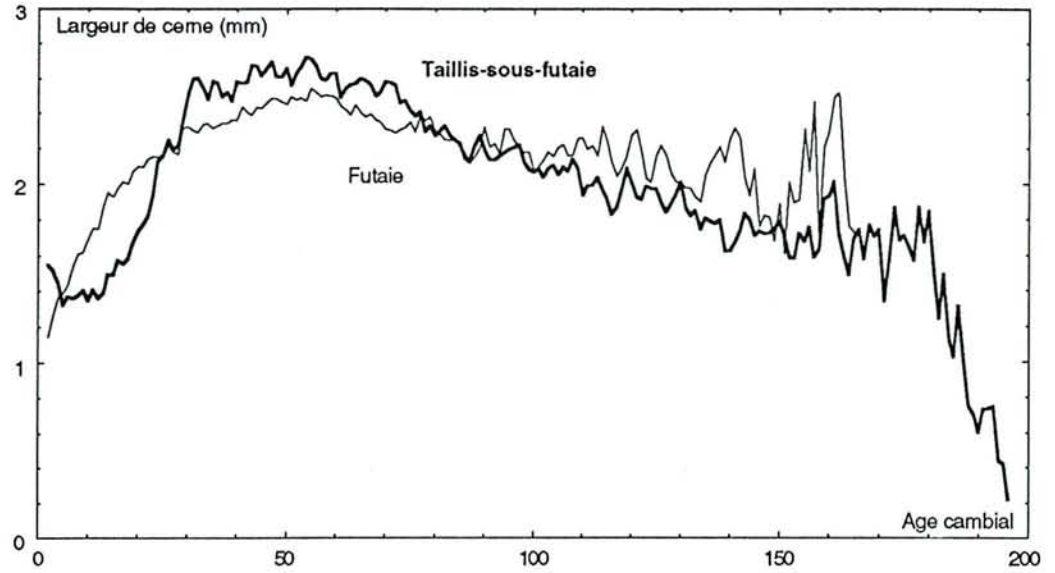



**Figure 22** : Accroissements moyens, exprimés en largeur de cerne, en fonction de l'âge.

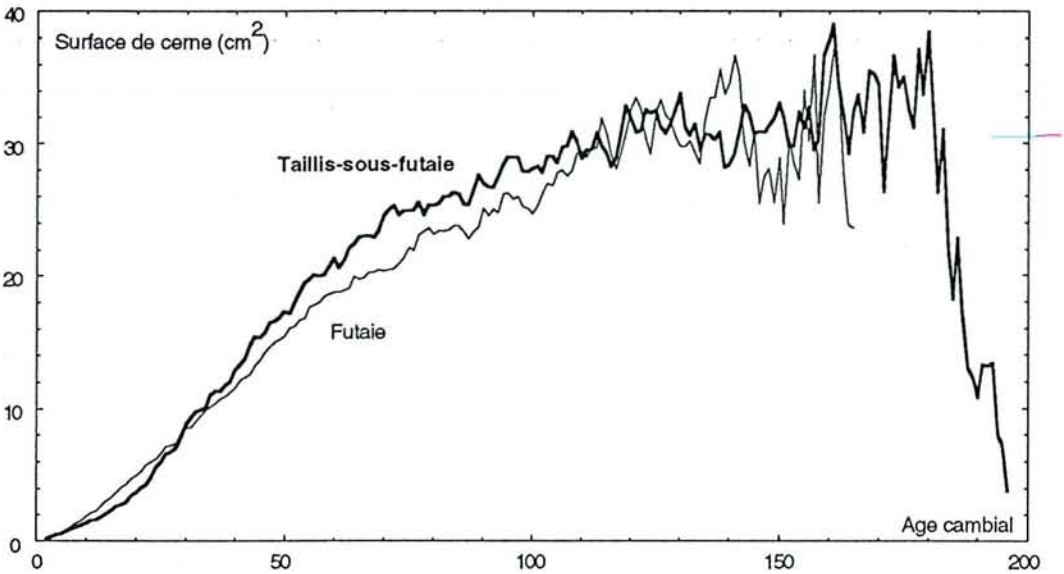



**Figure 23** : Accroissements moyens, exprimés en surface de cerne, en fonction de l'âge.

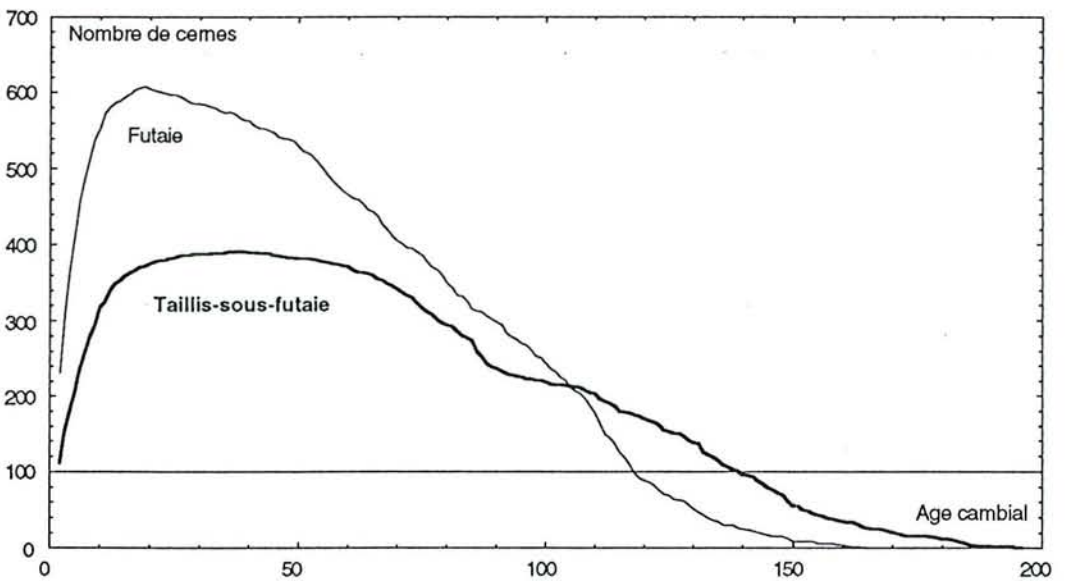



**Figure 24** : Effectif des cernes disponibles à chaque âge cambial.

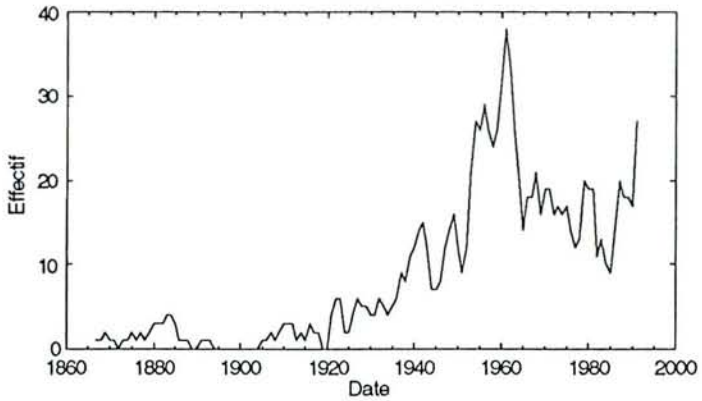



**Figure 21** : Effectif des cernes de futaie de 80 ± 1 ans en fonction de la date.

Cette opération peut se faire en appliquant à chaque cerne un coefficient de pondération ou, ce qui revient au même, en calculant les accroissements moyens à un âge donné en deux étapes :

1° - calcul des accroissements moyens partiels pour chaque couple âge cambial/année calendaire ;

2° - calcul de l'accroissement moyen final pour un âge donné en faisant la moyenne des accroissements moyens partiels disponibles pour chaque date représentée par cet âge.

En opérant ainsi, on donne le même poids à toutes les dates disponibles pour un âge cambial donné.

Les figures 22 et 23 présentent l'évolution moyenne de la croissance radiale de notre échantillon de hêtres, exprimée en largeurs et en surfaces de cernes, selon l'âge courant et le traitement sylvicole. Les courbes obtenues, communément appelées "courbes âge" sont assez régulières car à chaque âge correspond un grand nombre de cernes qui ont été élaborés à des dates variées. Les fluctuations de la croissance dues aux facteurs climatiques et environnementaux sont fortement atténuées, et la loi liant la croissance à l'augmentation de l'âge apparaît clairement. Le degré d'atténuation dépend cependant de la taille de l'échantillon à un âge donné (Figure 24). Pour les vieux âges cambiaux le nombre de cernes disponibles devient trop faible pour calculer une moyenne significative et présumer de l'évolution de la croissance radiale en fonction de l'âge.

Les courbes obtenues pour les deux traitements sylvicoles ne sont pas identiques. Si on considère les courbes âge exprimées en surfaces de cernes, trois phases peuvent être distinguées (Figure 23). Tout d'abord, avant l'âge de 30 ans, les arbres de taillis-sous-futaie produisent des cernes plus petits que les arbres de futaie. Jusqu'à 110-120 ans, on observe l'inverse. Enfin, après 120 ans, les surfaces de cernes sont équivalentes pour les deux gestions sylvicoles.

Trois phases peuvent également être décrites si on considère l'évolution moyenne des largeurs de cernes des arbres de futaie (Figure 22) : la largeur moyenne des cernes augmente régulièrement pendant les cinquante premières années ; elle atteint un plateau entre 50 et 60 ans où elle se stabilise autour de 2,49 mm ; enfin, la largeur moyenne des cernes diminue progressivement.

L'évolution des largeurs de cernes moyennes des arbres de taillis-sous-futaie est par contre plus complexe. Jusqu'à l'âge de 5-7 ans la largeur moyenne des cernes diminue puis se stabilise jusqu'à l'âge de 13-14 ans. Pendant ces premières années les largeurs de cernes passent de 1,53 mm à 1,32 mm (soit une diminution de plus de 13%) alors que dans le même temps les cernes des arbres de futaie sont passés de 1,10 mm à 1,81 mm (soit une augmentation de 64,5%). Jusqu'à l'âge de 32 ans les largeurs de cernes augmentent fortement. Elles atteignent le niveau de celles des arbres de futaie à l'âge de 25 ans, dépassent ce niveau et se stabilisent entre 40 et 60 ans autour de 2,63 mm. Les largeurs de cernes moyennes diminuent ensuite progressivement, mais plus rapidement que celles des cernes d'arbres de futaie.

L'évolution des accroissements moyens des cernes en fonction de l'âge cambial donne des indications sur les potentialités de croissance d'une espèce dans une région ou un site donné, mais elle n'est pas indépendante du type de sylviculture pratiqué. Une telle observation avait déjà été faite par Bert (1992) à propos du sapin dans le Jura : l'allure des courbes âge calculées à partir d'arbres traités en futaies jardinées ou en futaies régulières était différente, et les dissemblances pouvaient être expliquées par les différences de traitement sylvicole. Dans notre cas, nous pouvons également émettre une hypothèse sylvicole pour expliquer les différences que nous observons entre les deux courbes âge.

Les arbres de futaie sont soumis tout au long de leur vie à une pression de compétition forte et relativement constante. Les éclaircies pratiquées dans ces peuplements peuvent occasionner des sautes de croissance, mais elles ne sont pas systématiquement réalisées à un âge précis du peuplement. Les effets de ces éclaircies sont ainsi estompés sur la courbe âge. Pour les arbres de taillis-sous-futaie, ce schéma n'est pas applicable. Nous pouvons rappeler que dans le cas du hêtre, qui rejette très mal de souche, les arbres dominants du taillis-sous-futaie ne sont jamais recrutés parmi les brins de taillis, mais proviennent de semences. Dans le meilleur des cas, les graines germent juste après la coupe du taillis. Pendant les premières années, ces semis sont soumis à la concurrence des rejets. A cause de leur grande vigueur, les rejets du taillis dominent rapidement les jeunes arbres qui ne seront libérés de la concurrence que lorsque le taillis sera de nouveau coupé, soit 25 à 30 ans plus tard ce qui représente la durée d'une révolution. A ces contraintes individuelles, s'ajoutent les contraintes physiologiques liées à la mise en lumière des jeunes arbres. Aussenac & Ducrey (1977) et Ducrey (1981) ont montré qu'il existe de grandes différences entre les feuilles d'ombre et de lumière, au niveau de la masse, de l'épaisseur, de la densité stomatique, de la capacité photosynthétique, du potentiel hydrique. On sait actuellement que le fonctionnement hydraulique des branches d'ombre et de lumière ainsi que celui de jeunes plants élevés à l'ombre ou à la lumière, est très différent. Le tissu conducteur des arbres élevés à l'ombre est plus vulnérable à la cavitation que celui des arbres élevés en pleine lumière : il est moins apte à résister à une sécheresse. Après une mise en lumière brutale, et pour résister à l'augmentation de la transpiration, les jeunes hêtres d'ombre ferment leurs stomates. L'intensité de la photosynthèse est alors très diminuée tant qu'un nouveau système conducteur n'est pas construit (Cochard, *non publié*).

Ces constatations sylvicoles et écophysiologiques sont transposables aux observations réalisées sur la courbe âge. Comme nous ne connaissons l'âge des arbres qu'à la hauteur de 1,30 m (hauteur de carottage), il ne nous est pas possible de suivre l'évolution des largeurs de cernes depuis l'âge réel de un an : il nous manque la somme des années nécessaires aux arbres pour atteindre la hauteur de 1,30 m. Cette période peut être assez variable puisque la croissance en hauteur des jeunes plants est affectée par des facteurs d'ordre génétique, écologique (luminosité) ou sylvicole (densité), (Becker, 1981a ; Lanier, 1981a et b ; Teissier-du-Cros, 1981 ; Falcone *et al.*, 1986). Sur des plants de 15 ans, Dupré *et al.* (1986) notent que la hauteur est multipliée par trois entre des plants poussant à l'ombre et en pleine lumière. Dans une régénération équienne âgée de 18 ans, Thiébaut *et al.* (1992a) montrent qu'à l'ombre, les plants se développent dans une strate unique et atteignent 31,4 cm. En pleine ou demi-lumière, le développement est pluristrate et les individus dominants atteignent une hauteur de 181,4 ou 85,6 cm.

Sur la courbe âge concernant les arbres de taillis-sous-futaie, la période de diminution des largeurs de cernes jusqu'à l'âge moyen de 14 ans semble correspondre à la phase de domination des semis par le taillis. A partir de 15 ans, la largeur moyenne des cernes commence à augmenter : les jeunes hêtres semblent donc être soumis à une compétition moins forte et ils ont surmonté les contraintes écophysiologiques. Le taux de croissance moyen des arbres de taillis-sous-futaie étant très supérieur à celui des arbres de futaie, nous pouvons penser que les jeunes arbres poussent alors sans concurence ou sous une concurrence bien plus faible que celle qui peut exister en futaie : le taillis qui les dominait, ainsi que quelques unes des plus vieilles réserves ont dû être coupés. Pourtant, si les cernes de taillis-sous-futaie commencent à devenir de plus en plus larges, ils gardent une surface inférieure à celle des cernes de futaie jusqu'à l'âge de 25 ans. Leur surface ne devient équivalente à celle des cernes de futaie qu'à l'âge de 29 ans et, si on considère le diamètre des arbres, un arbre moyen de taillis-sous-futaie n'atteindra la même grosseur qu'un arbre moyen de futaie qu'à l'âge de 34 ans (Figure 25).

Ces hypothèses sont vérifiées par les résultats obtenus par la méthode à âge constant. Les cernes de taillis-sous-futaie d'un âge cambial inférieur à 30 ans, ne montraient pas de dérive positive de croissance. Pourtant, les cernes plus âgés ou les cernes de même âge issus des futaies ont évolué fortement, en largeur et en surface, depuis le siècle dernier. Si les cernes de taillis-sous-futaie de moins de 30 ans proviennent d'arbres dominés à la fois par leurs aînés et par le taillis, il est fort probable qu'ils soient de très mauvais intégrateurs des conditions environnementales. Les perturbations locales liées à la compétition inter-arbre, selon le modèle de Cook, dominent les perturbations régionales liées aux changements lents et continus des facteurs environnementaux.

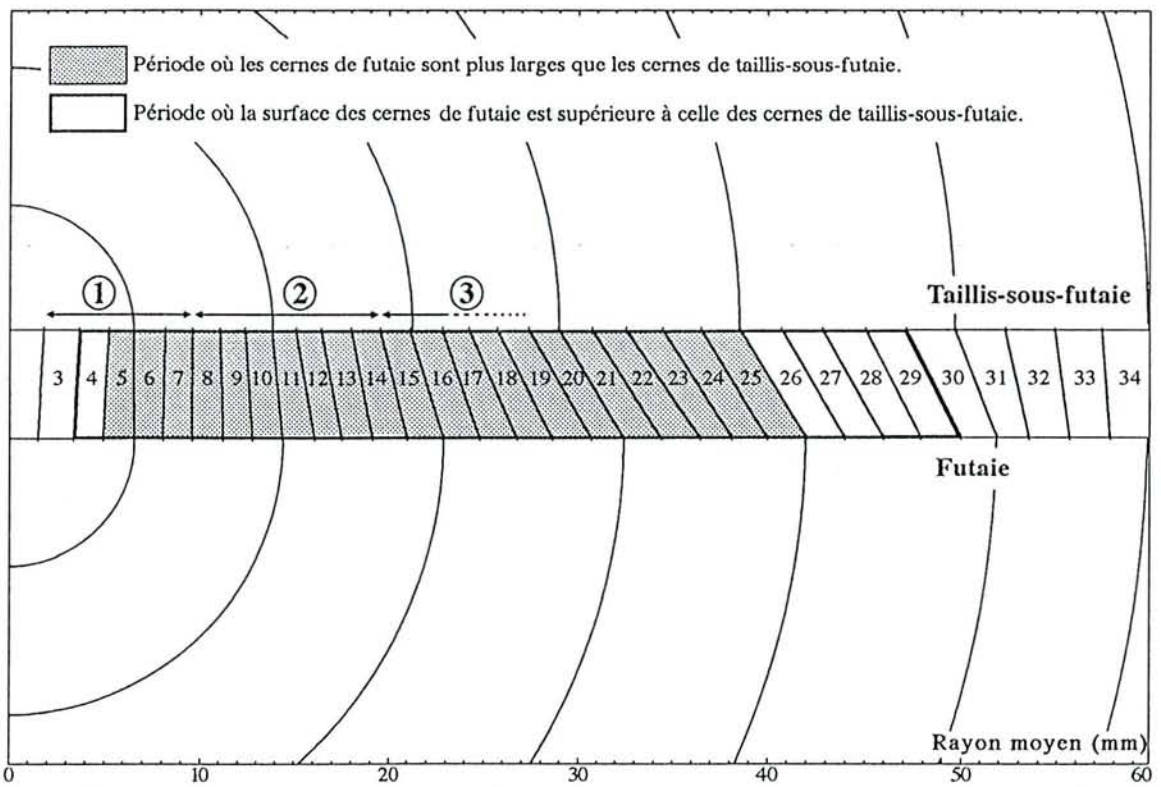



**Figure 25** : Evolution comparée des rayons cumulés moyens des arbres de futaie et de taillis-sous-futaie jusqu'à l'âge à 1,30 m de 34 ans. Phase 1, diminution des cernes de taillis-sous-futaie. Phase 2, stabilisation des largeurs. Phase 3, augmentation rapide des largeurs de cernes de taillis-sous-futaie.

### 1.2 - Ajustement mathématique des courbes âge

Avant de standardiser les largeurs ou les surfaces de cernes à partir des courbes âge, il est préférable d'ajuster mathématiquement ces courbes pour obtenir une valeur de référence à un âge donné. Ces ajustements permettent d'éliminer les variations stochastiques non biologiques ou dues à un trop faible effectif de cernes à un âge donné.

Pour ajuster les courbes âge il est intéressant d'utiliser des modèles mathématiques choisi *a priori*, c'est-à-dire de procéder de façon déterministe. Un modèle non linéaire de croissance peut être employé sur notre lot de données : modèle monomoléculaire, modèle logistique, modèle de Gompertz (Figure 26), (Calvo Haro *et al.*, 1994). Nous avons alors accès à des paramètres descriptifs comme une asymptote (taille maximale du cerne), un taux de croissance maximale, un point d'inflexion, etc. Ces paramètres, calculés pour divers types de peuplements, pour plusieurs espèces, etc., peuvent alors être comparés (Tableau 9).

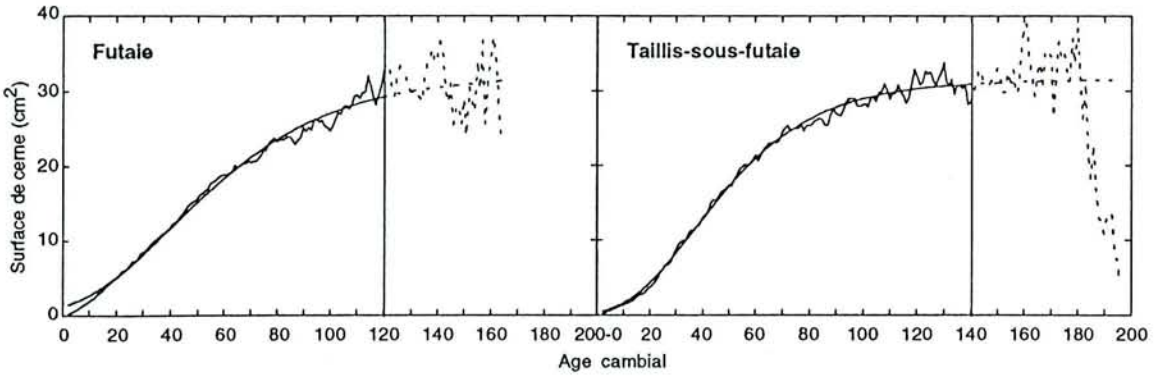



**Figure 26** : Ajustement des courbes âge par un modèle de Gompertz : $y = A \cdot \exp(-C \cdot \exp(-B \cdot x))$ ou $y = A \cdot \exp(-\exp(B \cdot (D - x))$, avec y=surface de cerne, x=âge cambial, A=asymptote, B=taux de croissance maximal, D=point d'inflexion et C=exp(BD).

| | Futaie | Taillis-sous-futaie |
|---|---|---|
| Asymptote | 32,106 ± 0,484 cm² | 31,433 ± 0,192 cm² |
| Taux de croissance maximal | 2,956 ± 0,0946 mm²/an | 3,975 ± 0,0851 mm²/an |
| Point d'inflexion | 41 ans | 37,5 ans |
| Retard à l'origine | 3,350 ± 0,093 | 4,440 ± 0,140 |

**Tableau 9** : Paramètres du modèle de Gompertz et intervalles de confiance à 95% calculés à partir des courbes âge des arbres de futaie et de taillis-sous-futaie. Les arbres de futaie atteignent leur optimum de croissance radiale à un âge plus avancé que les arbres de taillis-sous-futaie. Le taux de croissance est alors plus fort en taillis-sous-futaie qu'en futaie ; pourtant, à l'origine, les arbres de futaie sont plus vigoureux.

L'emploi d'un modèle choisi *a priori* pose cependant plusieurs problèmes. Tout d'abord, nous ne pouvons pas présumer de l'évolution des surfaces de cernes pour les vieux âges à cause d'un effectif de cernes trop faible. Même si, à partir d'un certain âge, les largeurs de cernes ne font que diminuer, cette diminution peut correspondre conjointement, soit à une augmentation des surfaces de cernes, soit à une diminution, soit à une stabilité. L'application d'un modèle limité par une asymptote n'est donc pas justifiée.

Ensuite, à cette étape de l'analyse, nous ne cherchons pas à ajuster un modèle prédictif mais à lisser des données irrégulières. Ce lissage correspond à la recherche d'une bonne estimation de la variable expliquée pour une valeur particulière de la variable explicative. L'ajustement de la courbe âge doit être particulièrement soigné tout au long de la courbe. Or, si les modèles de croissance sont globalement bien explicatifs, ils sont localement peu précis et les résidus multiplicatifs sont trop importants, surtout dans les jeunes âges (Figure 27).

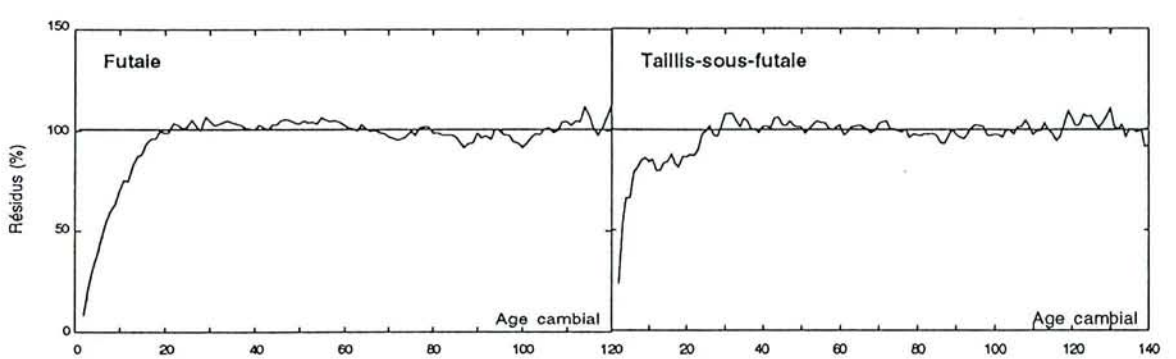



**Figure 27** : Distribution des résidus multiplicatifs en fonction de l'âge cambial après ajustement d'un modèle de croissance de Gompertz aux courbes âge de la futaie et du taillis-sous-futaie (résidu = 100.valeur observée/valeur ajustée).

Pour ajuster les courbes de croissance en fonction de l'âge, nous avons donc plutôt choisi d'utiliser des fonctions polynomiales. Les polynômes permettent d'ajuster très facilement et de façon satisfaisante un ensemble de points observés, et ils ne sont basés sur aucun *a priori*. Les paramètres des équations n'ont cependant aucune signification propre et on doit prendre garde à la forme de la terminaison de l'ajustement. Pour ces deux raisons les modèles ne sont pas employés à des fins prédictives en dehors des abscisses utilisées pour réaliser les ajustements.

Pour la futaie et le taillis-sous-futaie, les ajustements des accroissements moyens ont été réalisés respectivement jusqu'aux âges de 120 et 140 ans. Chaque point de la courbe moyenne est alors représenté par un nombre minimum de 100 cernes. Les accroissements exprimés en surface terrière annuelle sont ajustés à l'aide d'un polynôme unique : d'ordre 9 pour les arbres de taillis-sous-futaie et d'ordre 8 pour les arbres de futaie (Figures 28 et 30). La forme particulière de l'évolution en fonction de l'âge des accroissements annuels exprimés en largeurs de cernes ne peut pas être modélisée aussi simplement. Deux polynômes sont employés pour ajuster la courbe âge des arbres de futaie : un polynôme d'ordre 4 jusqu'à l'âge de 75 ans, puis un polynôme d'ordre 2 jusqu'à 120 ans (Figure 29). Trois polynômes sont employés pour ajuster la courbe âge des arbres de taillis-sous-futaie : un polynôme d'ordre 4 jusqu'à l'âge de 20 ans, un polynôme d'ordre 5 entre 20 et 80 ans, et enfin un polynôme d'ordre 2 jusqu'à 140 ans (Figure 31).

Pour les cernes de futaie et de taillis-sous-futaie dont on n'a pas tenu compte dans l'ajustement, c'est-à-dire dont les âges cambiaux sont respectivement supérieurs à 120 et 140 ans, on donne une valeur de référence correspondant à l'ordonnée de l'ajustement pour les abscisses respectives de 120 et 140 ans dans le cas des surfaces de cernes. Dans le cas des largeurs de cernes, le dernier polynôme utilisé est extrapolé au-delà de 120 ou 140 ans.

### 2 - Standardisation des largeurs et des surfaces de cernes

La standardisation des séries chronologiques à partir d'une courbe âge calculée sur une base régionale est identique à celle procédant arbre par arbre et exposée au paragraphe IV-1 du chapitre précédent. Pour chaque traitement sylvicole et pour chaque cerne d'âge a, on possède une valeur mesurée $VM_a$ et une valeur de référence $VR_a$ donnée par le modèle précédemment calculé. Chaque valeur mesurée peut être transformée en un indice de croissance $I_a$. Par commodité, cet indice est ensuite exprimé en pourcentage : $I_a = 100 \cdot (VM_a / VR_a)$. Les variations interannuelles des largeurs de cernes sont directement liées aux largeurs de cernes elles-mêmes et l'amplitude de ces variations décroît quand l'âge de l'arbre augmente. Pour obtenir des indices de croissance ayant une amplitude de variation constante, il est donc préférable d'utiliser les résidus multiplicatifs par rapport à l'ajustement de la courbe âge plutôt que les résidus additifs utilisés par exemple en densitométrie (Schweingruber, 1988).

Les moyennes des indices de croissance, calculées en fonction de l'âge, sont distribuées régulièrement autour du seuil de référence (100%), (Figures 32). Les indices calculés sont donc totalement dégagés de la composante biologique $A_t$. Le signal climatique n'est pas affecté et, contrairement à une standardisation "arbre par arbre", les perturbations endogènes et exogènes sont conservées (Figure 33). Il est alors possible d'étudier l'évolution de la croissance radiale en fonction du temps en utilisant l'ensemble des cernes disponibles.

Les cernes de plus de 120 ou 140 ans ne sont disponibles que pour les dates les plus actuelles. Leur poids est minime sur la courbe de référence car pour les dates récentes, un grand nombre d'âges cambiaux est disponible. L'utilisation de ces indices n'influence pas la forme de la courbe moyenne retraçant l'évolution de la croissance radiale en fonction du temps. Ainsi, pour plus de rigueur, ces cernes ne sont pas pris en compte lors des analyses suivantes.

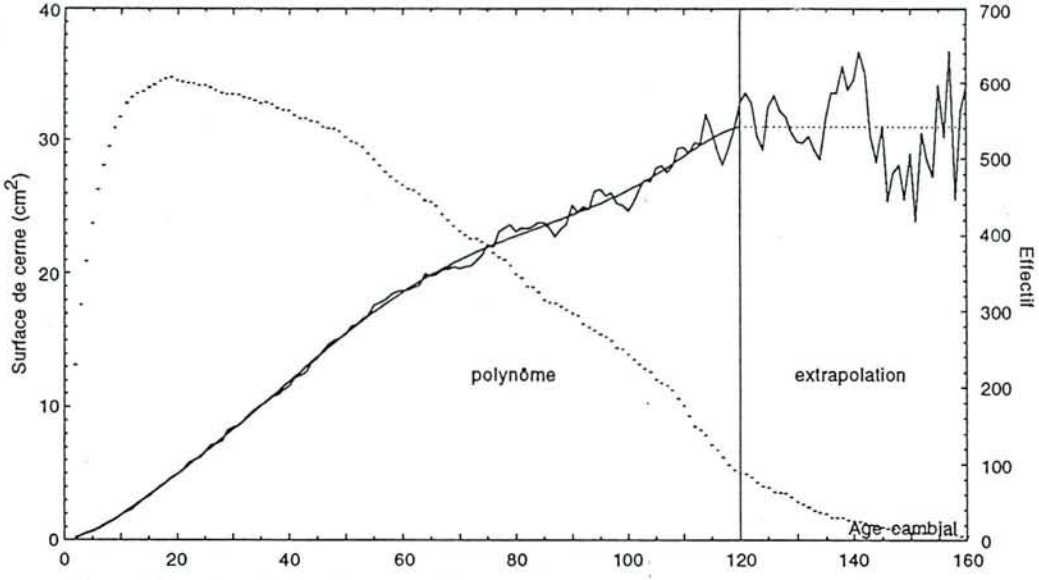



**Figure 28 : Arbres de futaie.** Accroissement moyen en fonction de l'âge exprimé en surface terrière annuelle et ajustement polynomial calculé entre 2 et 120 ans. Le nombre de cernes disponible à chaque âge cambial est représenté par la courbe pointillée.

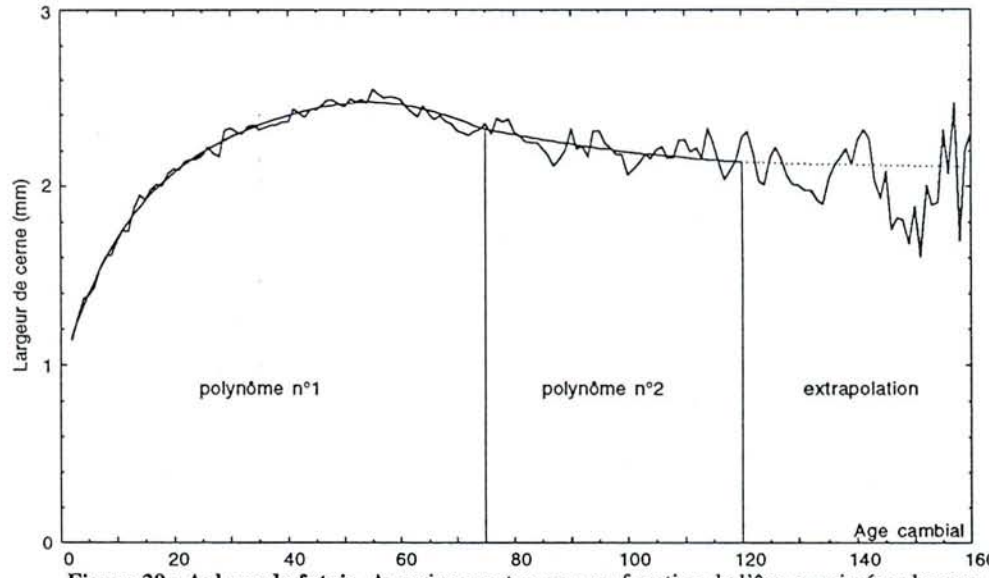



**Figure 29 : Arbres de futaie.** Accroissement moyen en fonction de l'âge exprimé en largeur de cerne annuelle et ajustements polynomiaux calculés entre 2 et 75 ans et entre 75 et 120 ans.

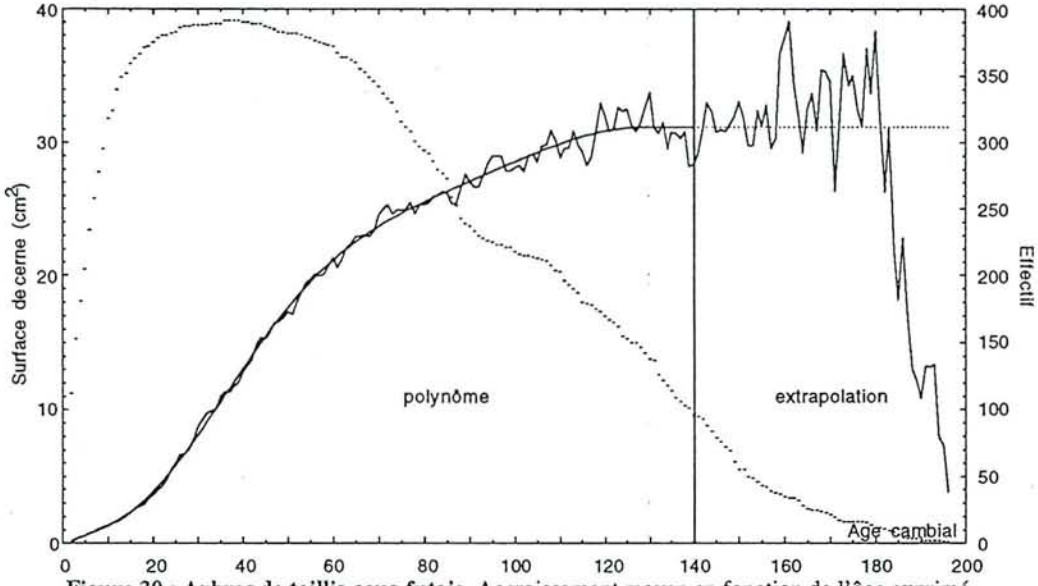



**Figure 30 : Arbres de taillis-sous-futaie.** Accroissement moyen en fonction de l'âge exprimé en surface terrière annuelle et ajustement polynomial calculé entre 2 et 140 ans. Le nombre de cernes disponible à chaque âge cambial est représenté par la courbe pointillée.

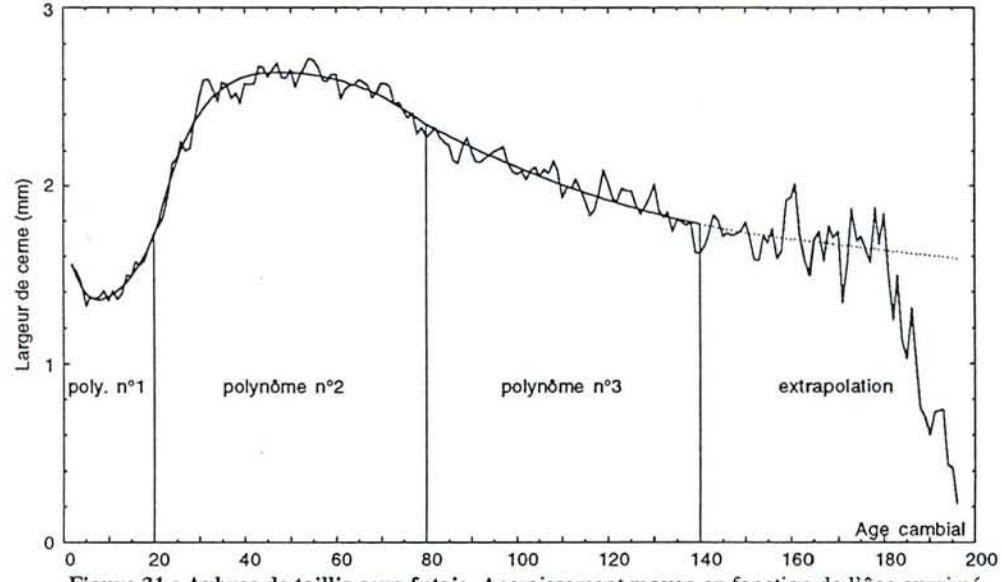



**Figure 31 : Arbres de taillis-sous-futaie.** Accroissement moyen en fonction de l'âge exprimé en largeur de cerne annuelle et ajustements polynomiaux calculés entre 2 et 20 ans, entre 20 et 80 ans et entre 80 et 140 ans.

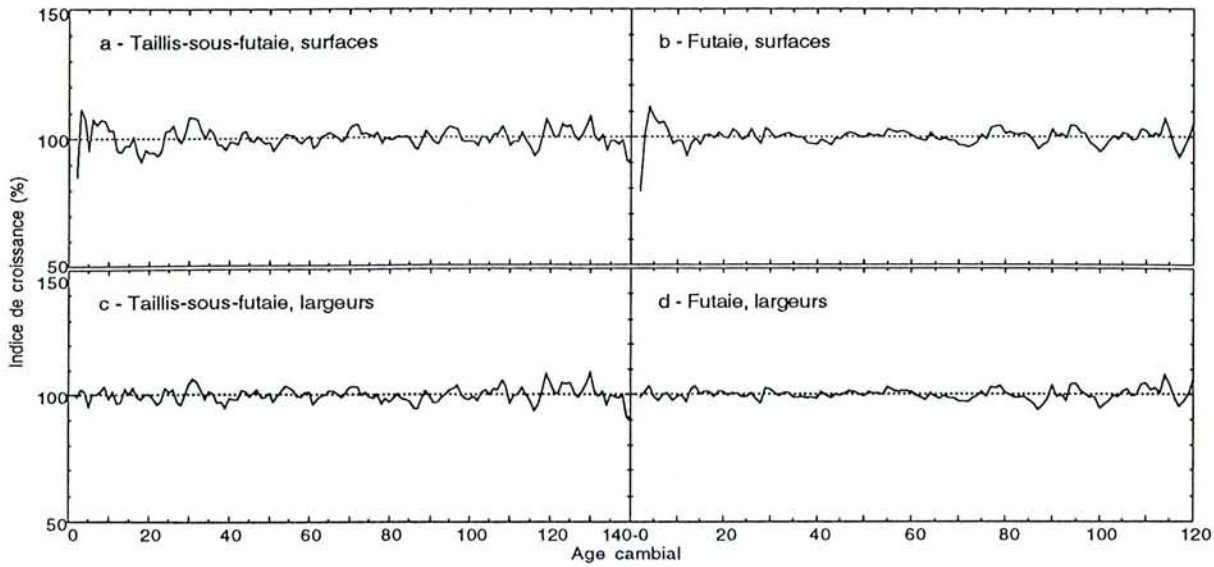



**Figure 32** : Evolution des indices de croissance en fonction de l'âge cambial pour les arbres de taillis-sous-futaie (fig. a et c) et pour les arbres de futaie (fig. b et d). Les indices de croissance ont été calculé, soit à partir des courbes âge exprimées en surfaces terrières (fig. a et b), soit à partir de courbes âge exprimées en largeurs de cernes (fig. c et d).

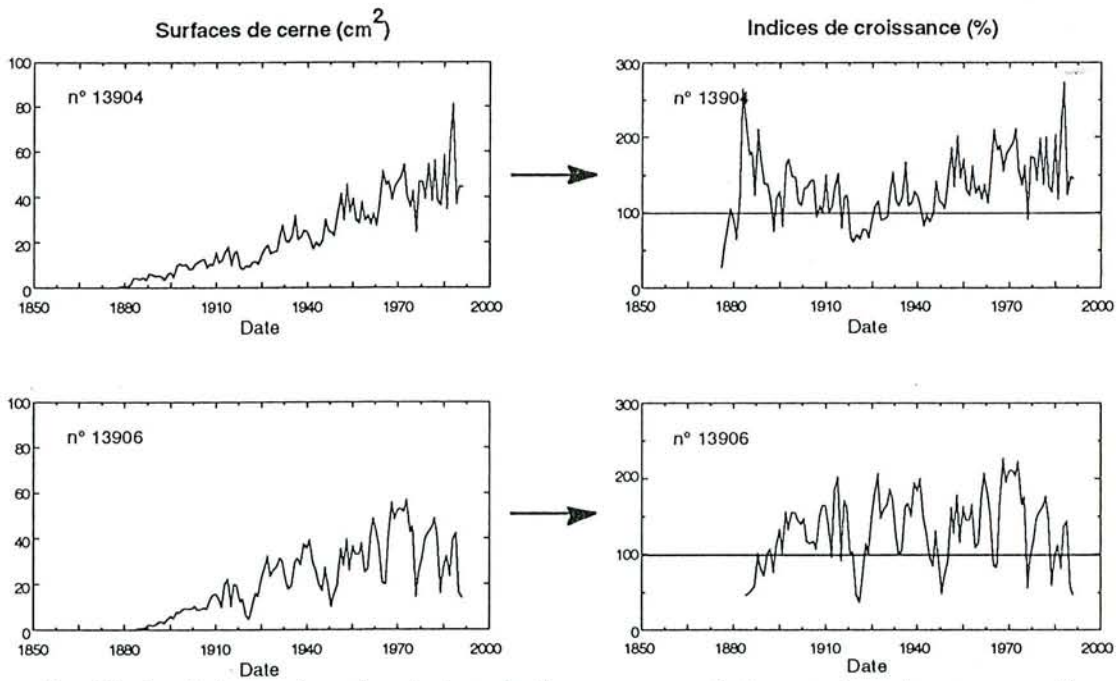



**Figure 33** : Résultat de la transformation de deux dendrogrammes exprimés en surfaces de cerne annuelles en dendrogrammes indicés à l'aide de la courbe âge régionale. La tendance à long terme due à l'augmentation de l'âge est supprimée. Les signaux à court et moyen terme sont conservés (crise de croissance des années 1920 ou 1947 par exemple), ainsi que les signaux à long terme non dus à l'effet âge.

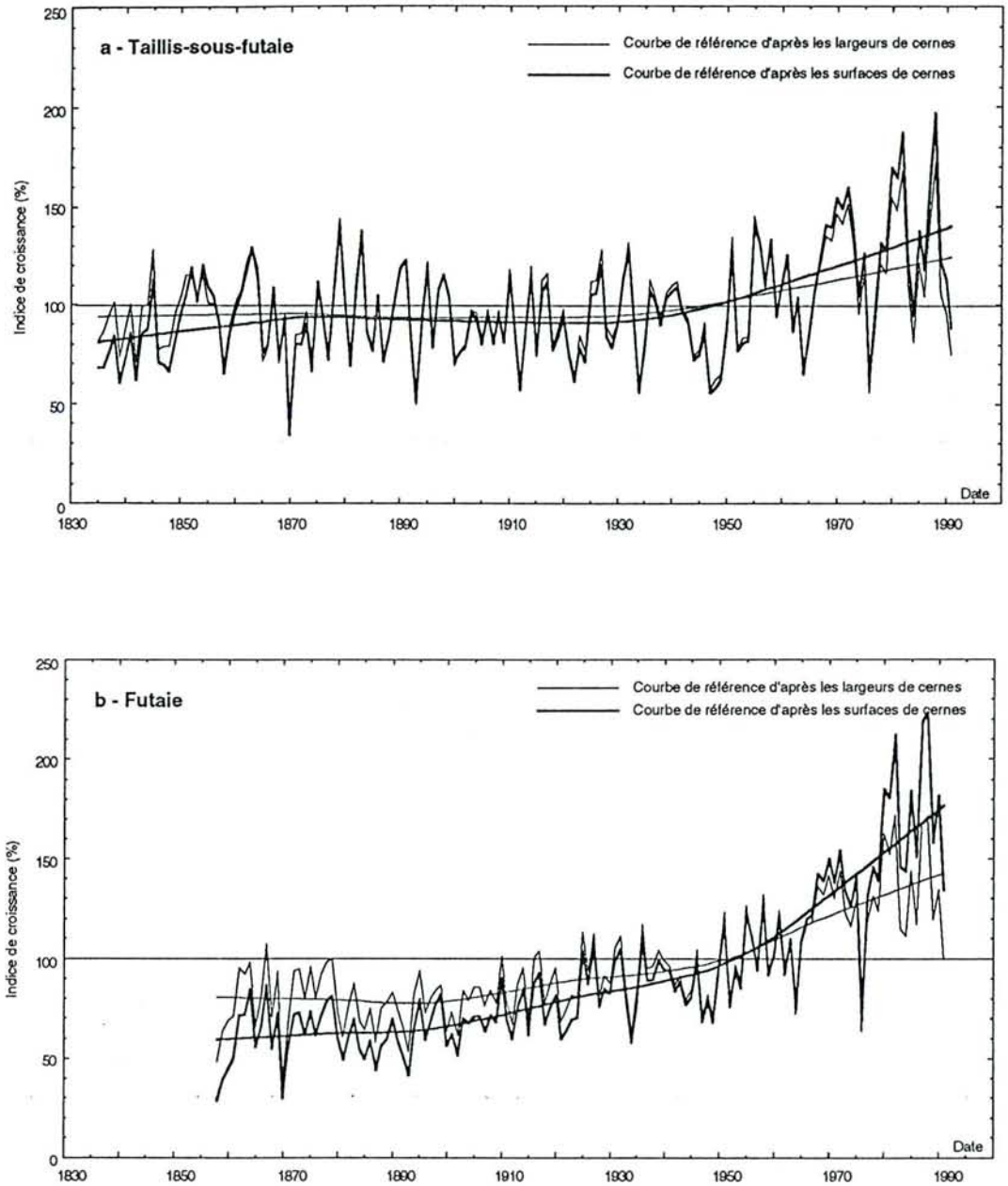



**Figure 34** : Evolution des indices de croissance moyens en fonction du temps pour les arbres de taillis-sous-futaie (**a**) et de futaie (**b**). Les indices de croissance sont calculés, soit à partir des courbes âge exprimées en largeurs de cernes (courbes fines), soit à partir des courbes âge exprimées en surfaces terrières annuelles (courbes en gras).

## 3 - Evolution à long terme de la croissance radiale de la hêtraie depuis le siècle dernier

### 3.1 - Méthode

Les différents dendrogrammes indicés, sont alignés en fonction de la date de formation des cernes. Pour chaque date, une moyenne des indices de croissance est calculée. La distribution de ces moyennes en fonction du temps exprime alors, pour chaque traitement sylvicole, l'évolution des accroissements radiaux de la hêtraie dégagés de l'effet âge.

Comme dans le cas de la construction des courbes âge, et pour les mêmes raisons de non-homogénéité des effectifs, (§ 1.1 page 59 à 61), la moyenne des indices à chaque date est calculée en deux temps :

1° - calcul des indices moyens partiels pour chaque couple âge cambial/année calendaire ;

2° - calcul de l'indice moyen final pour une date donnée en faisant la moyenne des indices moyens partiels disponibles pour chaque âge rencontré à cette date.

En opérant ainsi, on donne, à une date fixée, le même poids à tous les âges cambiaux disponibles. Cette méthode de double pondération est plus rigoureuse qu'un calcul classique de moyenne. Pourtant, comme les indices sont des valeurs relatives, fluctuant autour d'une moyenne sensiblement égale quel que soit l'âge cambial, les chronologies moyennes de référence calculées avec ou sans double pondération ne sont pas significativement différentes. Dans la suite de notre exposé, les courbes présentées sont calculées avec la double pondération.

### 3.2 - Premiers résultats

#### 3.2.1 - Choix des indices de croissance

La figure 34 présente l'évolution des indices de croissance moyens, calculés pour les arbres de futaie et les arbres de taillis-sous-futaie. Les indices sont le résultat de la standardisation, soit des largeurs, soit des surfaces de cernes, à partir des courbes âge correspondantes. Seuls les points moyens calculés à partir d'un échantillon d'au moins trente indices par date sont conservés.

Pour chacun des traitements sylvicoles, les indices moyens provenant des largeurs ou des surfaces de cernes sont distribués de façon équivalente en fonction du temps. Cependant, les phénomènes à long terme, dont nous reparlerons dans le paragraphe suivant, ont une intensité plus importante quand on emploie les surfaces de cernes indicées. Les différences entre les courbes s'expliquent mathématiquement : en utilisant le carré de la largeur pour calculer la surface des cernes, on augmente les écarts par rapport au niveau de référence de 100%.

Bert (1992) a montré que les valeurs indicées des surfaces et des largeurs de cernes étaient proportionnelles et que l'utilisation des surfaces terrières peut permettre la mise en évidence d'une part de la tendance à long terme impossible à détecter à partir des largeurs de cernes indicées.

Pour étudier l'évolution à long terme de la croissance radiale des hêtraies, nous avons donc choisi d'utiliser uniquement les indices calculés à partir des surfaces de cernes. Dans la suite de notre étude, nous n'exposerons que les résultats relatifs à ces indices.

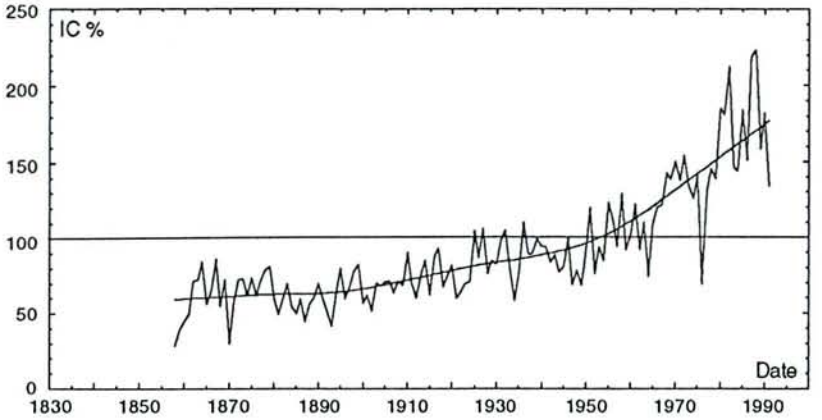



**Figure 35** : Evolution de la croissance radiale des hêtres de futaie depuis 1857 et lissage des données.

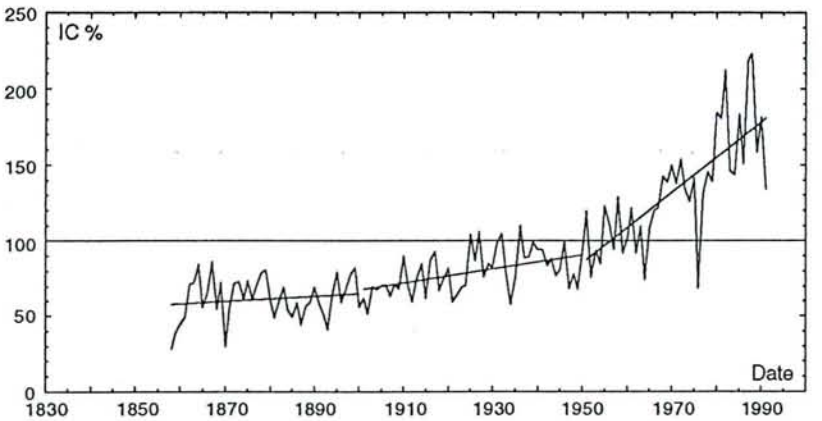



**Figure 36** : Evolution de la croissance radiale des hêtres de futaie depuis 1857 et droites de régression ajustées sur les périodes 1857-1900, 1900-1950 et 1950-1991.

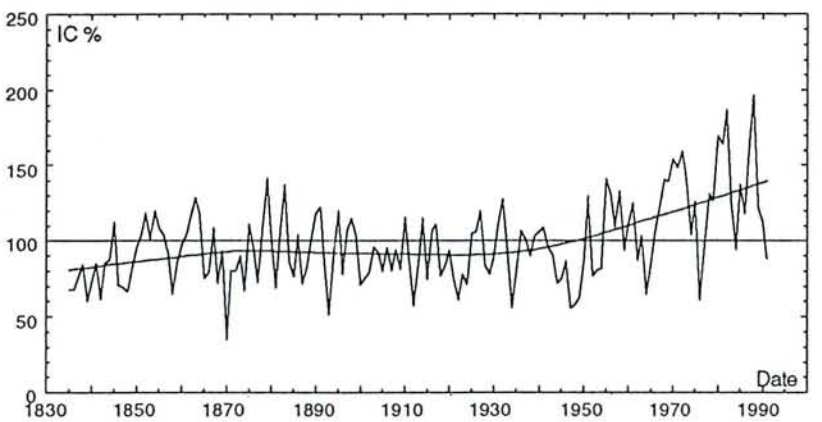



**Figure 37** : Evolution de la croissance radiale des hêtres de taillis-sous-futaie depuis 1835 et lissage des données.

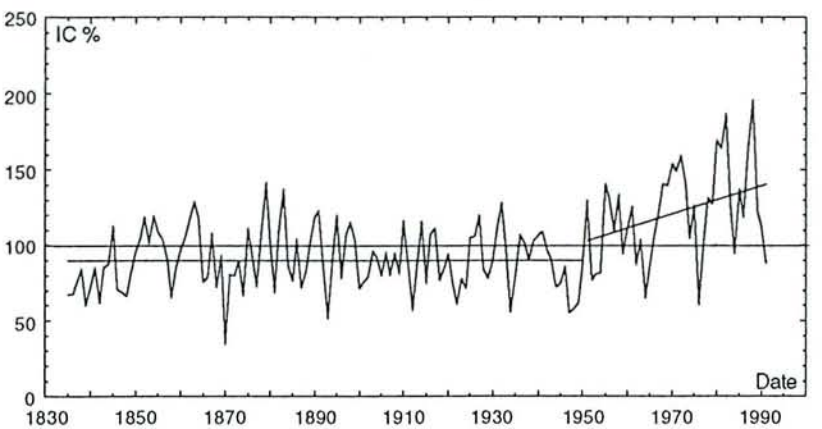



**Figure 38** : Evolution de la croissance radiale des hêtres de taillis-sous-futaie depuis 1835 et droites de régression calculées sur les périodes 1835-1950 et 1950-1991.

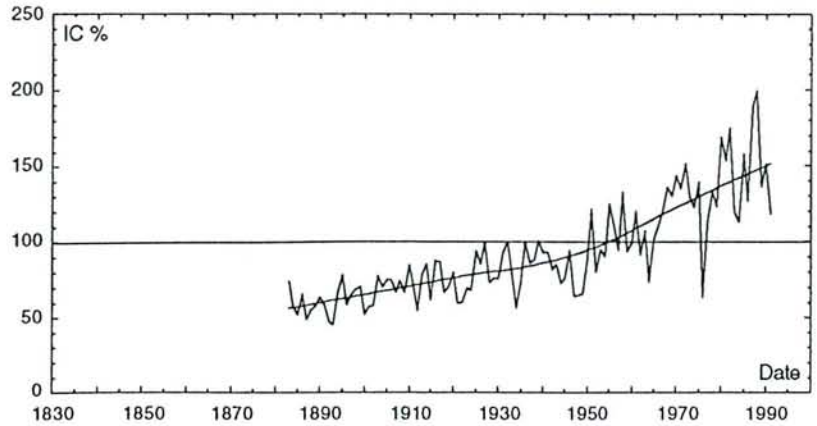



**Figure 39** : Evolution de la croissance radiale des hêtres de futaie depuis 1883 sans les cernes de moins de 30 ans et lissage des données.

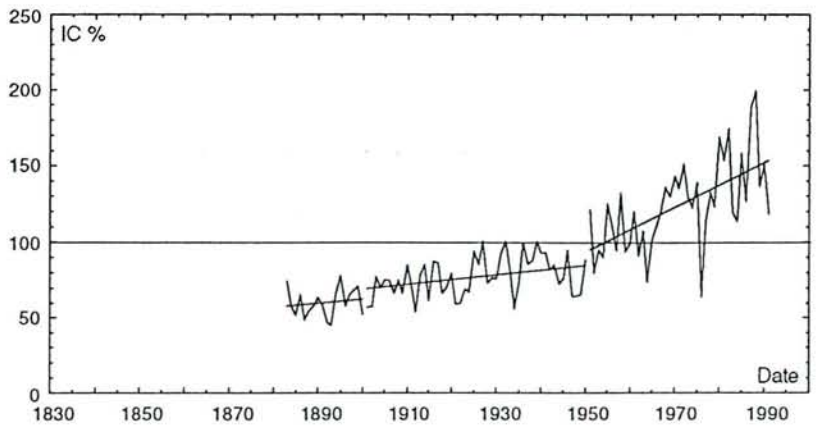



**Figure 40** : Evolution de la croissance radiale des hêtres de futaie depuis 1883 sans les cernes de moins de 30 ans et droites de régression ajustées sur les périodes 1883-1900, 1900-1950 et 1950-1991.

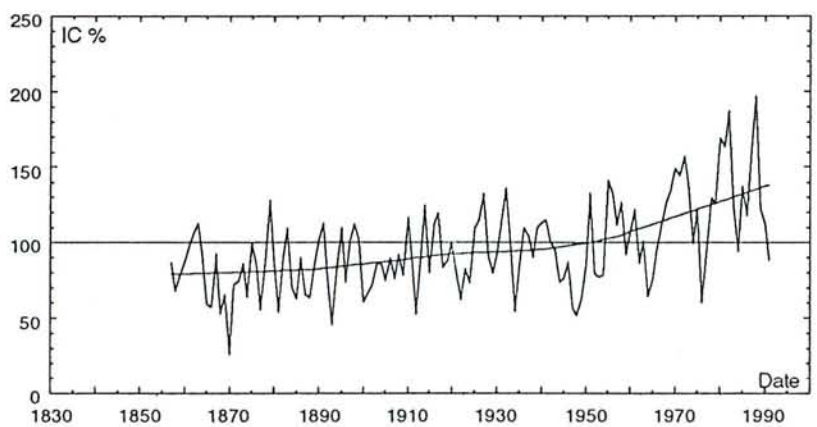



**Figure 41** : Evolution de la croissance radiale des hêtres de taillis-sous-futaie depuis 1857 sans les cernes de moins de 30 ans et lissage des données.

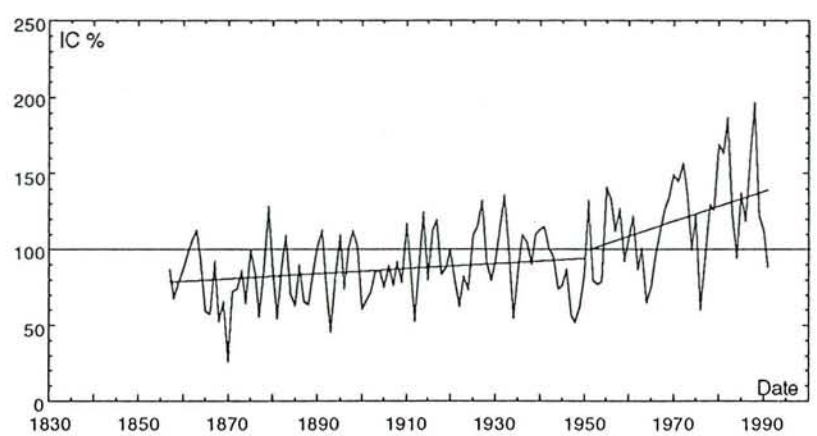



**Figure 42** : Evolution de la croissance radiale des hêtres de taillis-sous-futaie depuis 1857 sans les cernes de moins de 30 ans et droites de régression calculées sur les périodes 1857-1950 et 1950-1991.

### 3.2.2 - Evolution de la croissance radiale des futaies de hêtres (figures 35 et 36)

L'évolution moyenne des indices de croissance, calculée pour les arbres de futaie, est présentée sur la figure 35. On retrouve sur cette courbe de référence plusieurs signaux. Le signal à haute fréquence est caractérisé par les variations interannuelles du niveau de croissance. Le signal de fréquence moyenne est caractérisé par des crises de croissance à l'échelle de quelques années ou de la décennie (crises centrées sur les années 1870, 1893, 1900, 1921, 1934, 1948, 1952-1954, 1962-1964, 1976, 1984). Ces deux signaux, principalement contrôlés par les variables climatiques, seront traités dans le chapitre consacré à l'étude de la croissance en fonction des facteurs climatiques.

A basse fréquence, une tendance à long terme positive dans la croissance radiale se distingue clairement. Cette tendance semble exister depuis le milieu du siècle dernier. Pourtant, quand on effectue un lissage des données, trois périodes apparaissent :

- une phase de stabilité de 1858 à 1900 ;
- une première phase d'augmentation du niveau de croissance entre 1900 et 1950 ;
- une seconde phase d'augmentation du niveau de croissance entre 1950 et 1991, plus forte que la première.

Sur ces différentes périodes des droites de régression sont ajustées (Figure 36). De 1857 à 1900, la pente de la droite n'est pas significative : le niveau de croissance est resté stable. Entre 1900 et 1950, la pente de la droite de régression est hautement significative : le niveau de croissance moyen a augmenté de 0,46% par an. Enfin entre 1950 et 1991, le niveau de croissance a augmenté de 2,32% par an. Cette pente est encore hautement significative et différente de celle calculée sur la période 1900-1950. Sur l'ensemble de la période considérée l'augmentation relative de croissance est de +200%.

### 3.2.3 - Evolution de la croissance radiale des taillis-sous-futaies de hêtres (figures 37 et 38)

L'évolution moyenne des indices de croissance calculée pour les arbres de taillis-sous-futaie est présentée sur la figure 37. Sur cette courbe de référence, les variations à haute et moyenne fréquence sont identiques à celles présentées pour les arbres de futaie. Les variations interannuelles et les périodes de crise sont synchrones entre les deux traitements sylvicoles. Ces signaux sont donc bien dus à un facteur agissant à grande échelle sur tous les arbres d'une même région et probablement d'origine climatique. On peut également remarquer que les arbres de taillis-sous-futaie sont plus sensibles que les arbres de futaie : la variance interannuelle des indices de croissance est plus forte que celle des arbres de futaie. Entre 1858 et 1991, l'évolution relative moyenne des indices de croissance entre deux années consécutives est de 24,31% pour le taillis-sous-futaie et de 20,21% pour la futaie.

L'évolution à long terme de la croissance radiale est différente de celle de la futaie. Le lissage des données fait apparaître deux phases :

- depuis 1835 jusqu'à 1950, aucune évolution du niveau de croissance moyen n'est perceptible. La charnière des années 1900 observée pour les arbres de futaie, n'existe pas dans le cas des arbres de taillis-sous-futaie ;
- de 1950 à 1991, le niveau de croissance moyen a nettement augmenté.

Si on réalise des ajustements linéaires sur ces deux périodes (figure 38), on constate que le niveau de croissance n'a pas évolué de façon significative entre 1835 et 1950. Par contre la période 1950-1991 montre une augmentation significative de 0,93% par an (soit une augmentation relative de +36% en 41 ans).

Sur l'ensemble de la période étudiée l'augmentation relative de croissance est de +73%.

### 4 - Evolution à long terme de la croissance radiale des hêtraies sans les cernes de moins de 30 ans

Avec la méthode à âge constant, nous avons constaté que dans le cas des arbres de taillis-sous-futaie, les surfaces des cernes de moins de 30 ans n'avaient pas évolué en fonction du temps, contrairement à celles des cernes plus âgés. On peut alors se demander quel est le poids de ces cernes sur la forme générale de la courbe des indices moyens.

Cette courbe de référence est donc recalculée en prenant en compte uniquement les cernes de 30 ans et plus. La même opération est réalisée pour les arbres de futaie afin de pouvoir comparer les deux traitements sylvicoles (Figures 39 et 41). Sur ces deux courbes, des ajustements sont également réalisés (Figure 40 et 42). Comme précédemment, seuls les points moyens calculés à partir d'un échantillon d'au moins 30 indices par date sont conservés. Puisque les dates anciennes sont essentiellement représentées par des cernes jeunes et qu'une partie de ces cernes a été retirée, la période couverte par les courbes de référence est un peu moins longue que précédemment. Les courbes débutent respectivement en 1883 pour la futaie et en 1857 pour le taillis-sous-futaie, au lieu de 1858 et 1835.

#### 4.1 - Cas des futaies (figures 39 et 40)

La forme de la courbe reste la même. Afin de pouvoir comparer les évolutions de croissance en fonction du temps, les trois périodes définies auparavant sont conservées :

- de 1883 à1900, la croissance radiale n'évolue pas de façon significative. Son évolution ne peut cependant être évaluée que sur 17 ans contre 43 ans auparavant ;

- de 1900 à 1950, on retrouve une première phase d'augmentation du niveau de croissance. La pente est alors de 0,32% par an au lieu de 0,46% auparavant;

- de 1950 à 1991, la seconde phase d'augmentation du niveau de croissance est conservée. La pente diminue également par rapport à la première courbe présentée, passant de 2,32% par an à 1,47% par an.

Sur l'ensemble de la période considérée l'augmentation relative de croissance est de +171%.

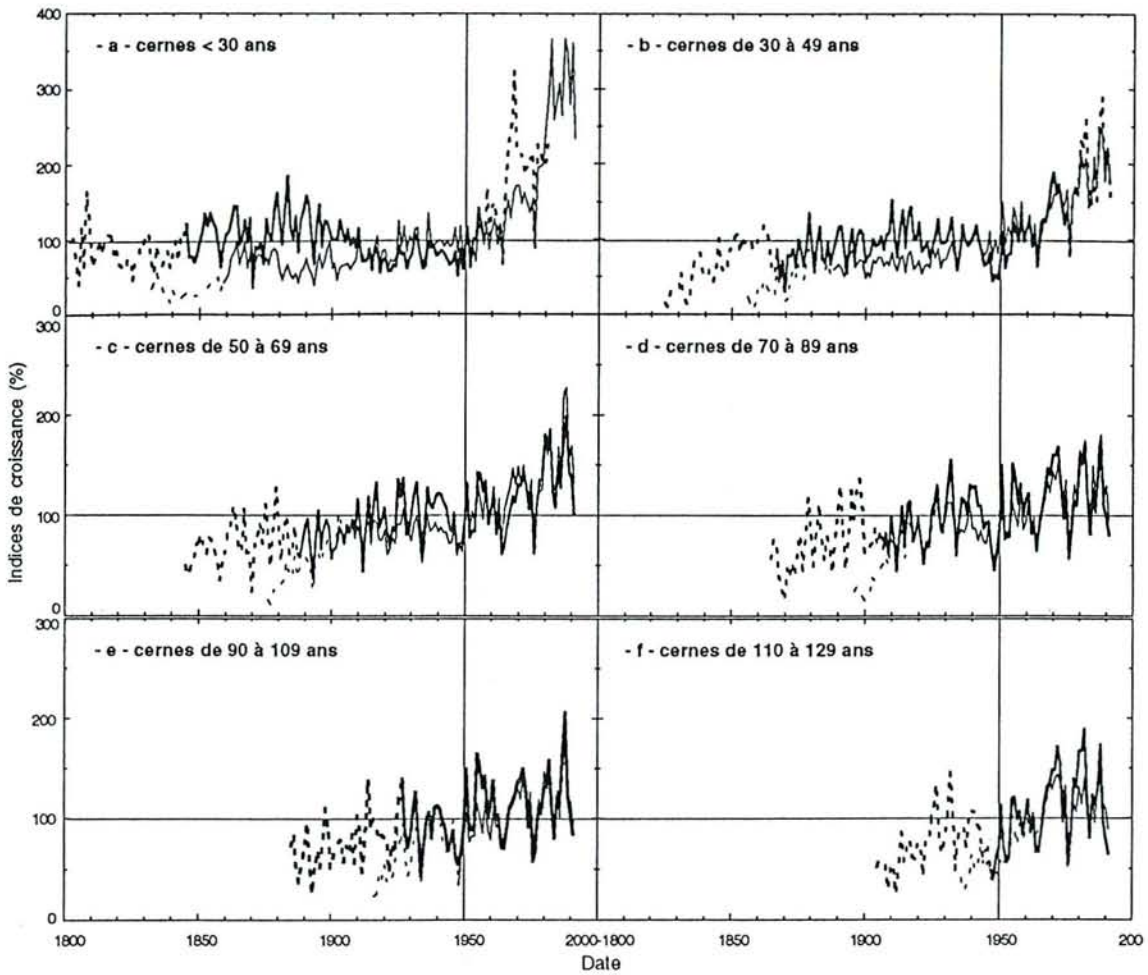
#### 4.2 - Cas des taillis-sous-futaies (figures 41 et 42)

La courbe retraçant l'évolution des indices de croissance en fonction du temps peut une fois encore être divisée en deux périodes :

- après 1950, la tendance positive de la croissance radiale est conservée : le niveau de croissance a augmenté de 0,98%. Cette pente n'est pas différente de la pente observée sur la même période, mais où comptent tous les cernes (figure 38) ;

- avant 1950, une tendance à l'augmentation du niveau de croissance se dessine. La pente de cette portion de la courbe est de 0,164% par an ce qui représente une augmentation significative de 18% en 94 ans par rapport à l'indice moyen de 1857.

Sur l'ensemble de la période considérée l'augmentation relative de croissance est de +75%.




**Figures 43** : Evolution moyenne des indices de croissance en fonction de la date et de six classes d'âges cambiaux pour les arbres de futaie (courbes fines) et de taillis-sous-futaie (courbes en gras). Les courbes pointillées correspondent aux années où moins de trente cernes sont disponibles.

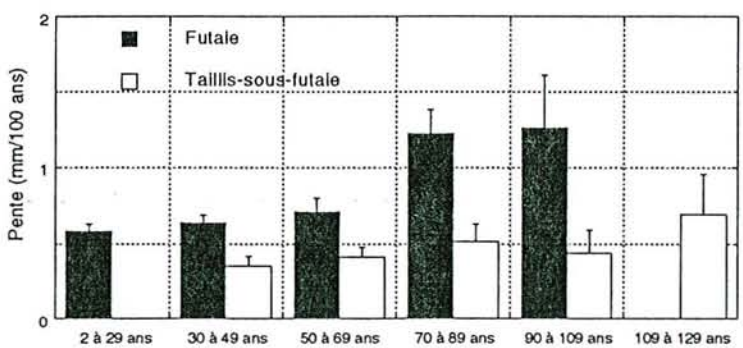



**Figure 44** : Pentes des droites de régression ajustées sur les courbes de références par classes d'âges cambiaux avant 1950. Seules les pentes significativement différentes de zéro sont représentées ainsi que leur écart-type.

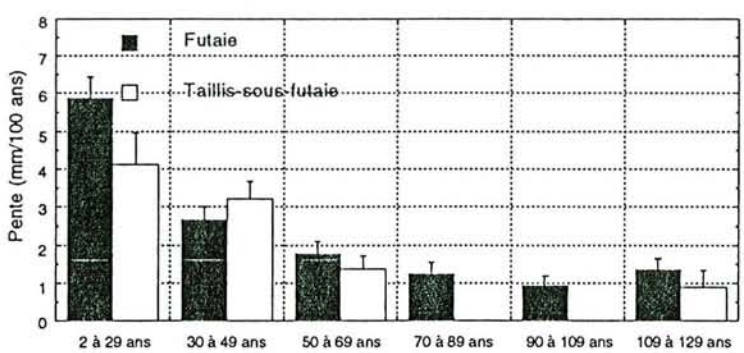



**Figure 45** : Pentes des droites de régression ajustées sur les courbes de références par classes d'âges cambiaux après 1950. Seules les pentes significativement différentes de zéro sont représentées ainsi que leur écart-type.

### 4.3 - Conclusion

Quel que soit le traitement sylvicole, les jeunes cernes ont une influence sur la forme de la courbe de référence moyenne. Dans le cas de la futaie, les tendances observées sont conservées d'un point de vue qualitatif tout au long de la courbe, mais l'amplitude du phénomène décroît si on retire les cernes âgés de moins de 30 ans. Dans le cas du taillis-sous-futaie, le retrait des jeunes âges cambiaux est sans effet sur la courbe de référence entre les années1950 et 1991 tant d'un point de vue qualitatif que quantitatif (ceci peut tout d'abord être expliqué par le faible nombre de ces cernes sur cette période : l'arbre le plus jeune échantillonné en taillis-sous-futaie est âgé de 39 ans). Par contre, le retrait de ces cernes induit l'apparition d'une tendance positive entre les années1855 et 1950.

Les tendances à long terme mises en évidence peuvent être globalement quantifiées sur l'ensemble des périodes étudiées. Un taux de croissance relatif est calculé pour chaque cas à partir des données extrêmes des courbes lissées. Les résultats sont synthétisés dans le tableau 10. Les taux calculés montrent bien que sur une période comparable, la tendance est plus forte en futaie qu'en taillis-sous-futaie et que cette tendance diminue en futaie et augmente en taillis-sous-futaie si les indices de croissance des cernes âgés de moins de 30 ans ne sont pas pris en compte.

| | Taillis-sous-futaie | | Futaie | |
|---|---|---|---|---|
| Période | Avec les cernes de moins de 30 ans | Sans les cernes de moins de 30 ans | Avec les cernes de moins de 30 ans | Sans les cernes de moins de 30 ans |
| 1835 - 1991 | 73% | | | |
| 1858 - 1991 | 57% | 75% | 200% | |
| **1883 - 1991** | **51%** | **70%** | **181%** | **171%** |

**Tableau 10** : Taux de croissance des indices standardisés calculés à partir des courbes lissées. Le taux de croissance est la valeur exprimée en pourcentage de : la valeur finale de l'ajustement moins la valeur initiale, le tout divisé par la valeur initiale.

## 5 - Evolution de la croissance radiale des futaies et taillis-sous-futaies de hêtres en fonction des classes d'âges cambiaux

Afin de mieux comprendre l'interaction existant entre les âges cambiaux et les tendances à long terme, les courbes de références sont recalculées à partir de gammes d'âges particulières.

Pour chaque traitement sylvicole, six classes d'âge sont réalisées : cernes d'âges inférieurs à 30 ans ; âges compris entre 30 et 50 ans ; entre 50 et 70 ans ; entre 70 et 90 ans ; entre 90 et 110 ans et enfin âges supérieurs à 110. Avec ces six classes, les points moyens des courbes de références sont calculés à partir d'un nombre significatif d'indices. Pourtant, tous les âges cambiaux n'étant pas disponibles à chaque date, les courbes couvrent des périodes de temps différentes. L'évolution moyenne des indices de croissance en fonction de la date et en fonction des classes d'âge cambial est présentée sur les figures 43a à 43f.

Sur chaque courbe, la tendance est testée comme sur les courbes de référence globale : deux périodes sont conservées pour chaque traitement sylvicole ; avant 1950 et après 1950. Sur ces périodes des droites de régression sont ajustées. Les pentes, ainsi que leur intervalle de confiance calculé pour un risque de 5%, sont reportées sur les figures 44 et 45.

### 5.1 - Cas des arbres de futaie

Pour chacune des classes d'âges, une tendance positive est mise en évidence avant et après 1950. Les pentes des droites ajustées sur la période 1950-1991 sont plus fortes que celles calculées avant 1950, au

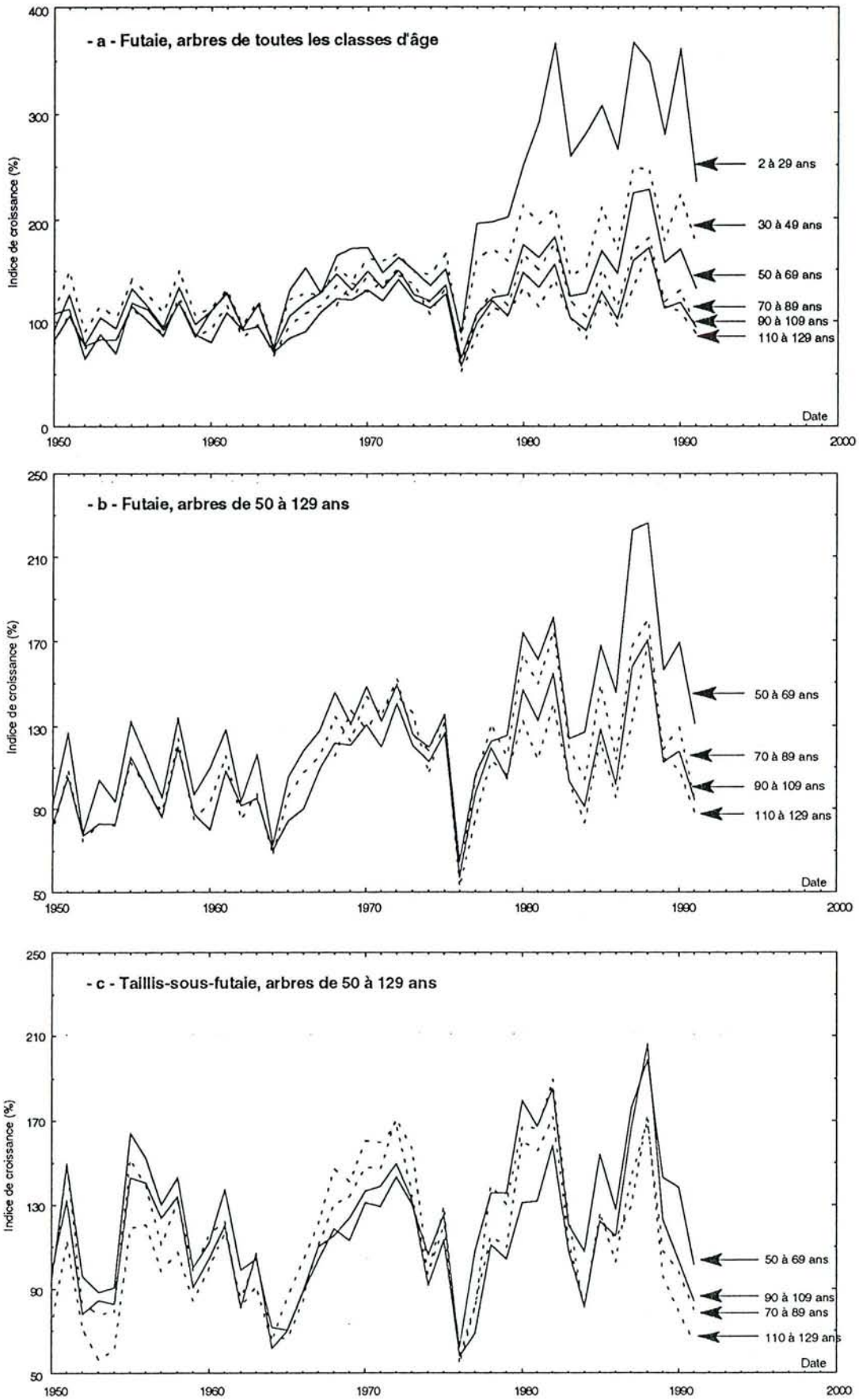



**Figure 46** : Comparaison du niveau de croissance entre toutes les classes d'âges disponibles pour les arbres de futaie (**a**). Comparaison du niveau de croissance pour quatre classes d'âges communes aux arbres de futaie (**b**) et de taillis-sous-futaie (**c**).

moins jusqu'à la classe d'âge 50-69 ans. A partir de 1950 la pente, très forte pour les cernes de moins de 30 ans, diminue progressivement avec l'augmentation de l'âge. Avant 1950, la pente augmente au contraire avec l'âge cambial, mais contrairement au cas précédent le nombre d'années pris en compte n'est pas constant : quand l'âge cambial augmente, le nombre de dates disponibles diminue. Il est alors difficile de comparer les pentes entre elles.

### 5.2 - Cas des arbres de taillis-sous-futaie

Les résultats sont très comparables à ceux obtenus pour les arbres de futaie. Avant 1950, une tendance positive peut être mise en évidence pour chacune des classes d'âges sauf pour les cernes âgés de moins de 30 ans. Ces cernes montrent une évolution particulière en fonction du temps :

- de 1845 à 1910, aucune tendance ne peut être mise en évidence. Le niveau de croissance moyen durant cette période est cependant très supérieur à celui des autres classes d'âges ;

- de 1910 à 1920, le taux de croissance chute brusquement, passant d'une moyenne de 112% sur la période 1845-1910 à un peu moins de 58% en 1921. Cette chute de croissance, bien que correspondant à une crise climatique (1911-1913), n'est pas reproduite sur la courbe des arbres de futaie ;

- de 1920 à 1950, le niveau de croissance reste bas, mais une légère tendance positive devient perceptible (pente de 0,404% avec une probabilité inférieure à 10%).

Après 1950, malgré quelques problèmes d'effectif pour les classes d'âges jeunes, une tendance positive peut être mise en évidence pour plusieurs classes d'âges. Contrairement à la futaie, les classes 70-90 ans et 90-110 ne montrent pas de tendances positives. Les tendances sont plus fortes après 1950 qu'avant 1950 et elles diminuent avec l'augmentation de l'âge, comme en futaie. De manière générale, les pentes observées pour le taillis-sous-futaie sont plus faibles que celles observées pour la futaie, à classe d'âge équivalente.

### 5.3 - Superposition des courbes pour chaque traitement sylvicole

Les courbes de référence partielles peuvent être superposées sur un même graphique. L'effet âge étant supprimé, le niveau de croissance moyen peut être comparé entre chaque classe d'âges (Figures 46). Sur ces graphiques, on retrouve les tendances globales à l'augmentation de la croissance radiale au cours du temps et une nouvelle information peut être mise en évidence.

Avant les crises climatiques (sécheresses) des années 1962-1964 et 1976, les différentes courbes de référence concernant les arbres de futaie s'organisent en un faisceau homogène. Après ces crises, les courbes s'individualisent nettement en fonction de l'âge. Le taux de croissance atteint en 1991 est directement lié à la classe d'âge prise en compte.

Ce phénomène n'est pas perceptible pour les arbres de taillis-sous futaie. Il n'y a pas de séparation évidente des courbes à une date donnée : les cernes ont réagi de façon semblable quel que soit leur âge.

En futaie, tout se passe comme si ces deux crises climatiques avaient induit une sélection des individus les plus vigoureux parmi les arbres de futaie. Cette sélection a pu être directe (mortalité de certains individus suite aux conditions climatiques), ou indirecte (développement de certaines pathologies après l'affaiblissement de certains arbres causé par les perturbations climatiques). Dans les deux cas, les arbres survivants se seraient trouvés moins concurrencés et de ce fait plus vigoureux. Cette sélection aurait été moins forte pour les arbres plus âgés car on peut penser que la "sélection naturelle" des individus s'est produite depuis plus longtemps. Les vieux arbres actuellement sur pied ont été soumis pendant très

longtemps à des pressions de sélection : ils constituent actuellement des peuplements plus stables que les jeunes peuplements où il doit exister une forte variabilité génétique. Ces remarques devraient être applicables au taillis-sous-futaie, pourtant elles ne s'expriment pas sur le faisceau de courbes. Les jeunes cernes ne semblent pas avoir bénéficié d'un affaiblissement de la concurrence. Au contraire, après les années 1960, la densité des peuplements gérés en taillis-sous-futaie a augmenté. On constate de façon générale sur tous les plans d'aménagement disponibles concernant les parcelles de taillis-sous-futaie que les révolutions, jusque là très régulières, ont été abandonnées suite à l'effondrement des besoins en bois de feu. Contrairement au peuplement de futaie, les jeunes arbres de taillis-sous-futaie se sont trouvés, à partir des années 1960 dans des conditions de compétition de plus en plus forte. Pourtant, cette augmentation du niveau de compétition ne se traduit pas par une chute du niveau de croissance, au contraire.

La nette amélioration du niveau de croissance des jeunes arbres de futaie pourrait être alors due à une évolution des pratiques sylvicoles depuis 20 à 30 ans. Cette hypothèse est confirmée par les sylviculteurs : les progrès notables dans la gestion des hêtraies n'ont pu avoir lieu qu'après la seconde guerre mondiale et l'amélioration de la sylviculture a probablement fortement évolué après que les premiers résultats concernant les placettes d'expérience en forêt de Haye ont été publiés (les premiers dispositifs ont été installés en 1976 par la station de Sylviculture et Production de l'INRA), (Bouchon, *com. pers.*). La différenciation des courbes de croissance des arbres de futaie serait donc le résultat d'une sylviculture plus dynamique du hêtre en futaie, avec choix de plus en plus précoce des arbres d'avenir dans les jeunes régénérations et intensité d'éclaircie plus forte que par le passé, surtout dans les peuplements susceptibles de réagir très favorablement (soit dans des peuplements âgés de moins de 50 ans et qui correspondent actuellement aux peuplements de 70 à 80 ans). Les peuplements qui ont le plus bénéficié de ces changements de pratique sont les jeunes régénérations (soit les peuplements qui ont aujourd'hui entre 10 et 30 ans). Cette hypothèse sylvicole est également confirmée par l'absence de réaction dans les peuplements de taillis-sous-futaie où les méthodes de sylviculture sont restées traditionnelles.

### 6 - Essai de prise en compte de la concurrence passée

Le régime de futaie entretient entre les arbres des pressions de compétition extrêmement fortes. Il existe, entre les individus une lutte permanente pour accéder aux ressources vitales, comme l'eau, les éléments minéraux ou la lumière. Comme tout organisme soumis à la concurrence de ses voisins, l'arbre réagit selon ses capacités : les arbres les plus aptes deviennent dominants et à l'opposé les plus faibles disparaissent. En régulant l'intensité de la concurrence entre les arbres, le sylviculteur agit sur la croissance, mais perturbe la structure sociale préétablie. Lors des éclaircies successives, les arbres d'avenir sont en théorie choisis parmi les brins dominants et codominants, mais les arbres ne peuvent-ils pas changer de statut social au cours de leur vie ?

Cette remarque est fondamentale dans l'étude des tendances à long terme de la croissance radiale. Si la hiérarchie sociale d'un peuplement est acquise dès le plus jeune âge, les arbres dominants que nous avons échantillonnés ont probablement toujours été dominants et ils ont exprimé pleinement, pendant toute leur vie, leur potentialité de croissance en fonction des ressources du milieu. Par contre, si un arbre a eu la possibilité de passer d'un niveau dominé à un statut de codominant ou de dominant, la croissance radiale n'est plus directement corrélée aux conditions environnementales. Un niveau de croissance faible ne correspond plus forcément à un manque de ressources direct (fertilité stationnelle, conditions climatiques ...), mais à un manque de ressources dû à la compétition entre les individus. Deux remarques s'imposent. Tout d'abord, plus un arbre est âgé, plus grande est, en théorie, la probabilité qu'il ait changé de statut social. Deuxièmement, un arbre dominé dans le passé et actuellement dominant a obligatoirement une croissance qui évolue positivement tout au long de sa vie. Dans le cas particulier de l'étude à long terme de la croissance radiale, si de nombreux arbres répondent à cette hypothèse, ils ont un poids considérable dans le déterminisme de la tendance à long terme observée jusqu'à présent.

En étudiant le fonctionnement d'une régénération équienne de hêtre jusqu'à l'âge de 18 ans, Thiébaut *et al.* (1992b) ont observé des reclassements sociaux jusqu'à 15-18 ans, mais l'apparition de disparités

morphologiques s'observe déjà entre 6 et 15 ans. Bouchon *et al.* (1989a, 1989b), en étudiant la réaction individuelle de hêtres d'âges divers à diverses intensités d'éclaircie, observent des pertes de dominance sur certains arbres, dans les placettes les plus jeunes (37 ± 9 ans et 53 ± 15 ans), quelle que soit l'intensité des éclaircies.

Plusieurs études tendent pourtant à montrer que la hiérarchie sociale des arbres n'est guère bouleversée tout au long de leur vie, sauf s'il y a eu des perturbations environnementales majeures (très localisées comme des chablis ou, à plus grande échelle, des attaques d'insectes ou des problèmes phytosanitaires), ou si le forestier est intervenu dans la structure du peuplement de façon inhabituelle. De façon classique, le forestier ne fait que confirmer, par intérêt, la structure sociale préétablie en favorisant les arbres les plus productifs, c'est-à-dire les arbres dominants. Delvaux (1966, 1971, *in* Dreyfus, 1988) attribue un rôle conservateur à la compétition. Selon lui, les arbres en concurrence forte ne peuvent exprimer leurs aptitudes génotypiques de vigueur, et la hiérarchie sociale entre les individus se fige. La seule évolution possible pour un individu est alors la régression, ou au mieux, la stabilité. Les potentialités de croissance ne pourraient s'exprimer à nouveau que si on revenait à une concurrence faible (par fortes éclaircies). Or dans la pratique courante, la taille de l'arbre et le phénotype représentent les principaux critères de sélection ; lors d'une éclaircie le forestier tend généralement à prendre acte de la hiérarchie sociale établie.

Pour Falcone *et al.* (1986), qui ont travaillé dans trente trois plantations de hêtres en Haute-Normandie, il semble utile de distinguer des "populations principales" composées de tiges dominantes et codominantes, et des "populations dominées" comportant des tiges intermédiaires et dominées. En effet, selon ces auteurs, "*Les arbres de la population dominée ne participent pas au couvert et n'ont pratiquement aucune chance de devenir, quoi que l'on fasse, codominants ou dominants*".

Pardé & Venet (1981), notent que l'action améliorante du sylviculteur doit se faire très tôt, dès les premiers dégagements, pour permettre à certaines tiges dominées de gagner l'étage dominant. Dans les gaulis (à 8/15 ans), "*il est encore temps de favoriser les meilleurs parmi les dominants et, parmi les dominés, de donner aux plus méritants l'impulsion pouvant les faire passer dans l'étage dominant*". Faute d'interventions rapides, les possibilités de sélection par le sylviculteur décroissent très vite car la victoire des dominants est définitive, et le caractère dominé devient irréversible. Après 30 - 40 ans il est déjà trop tard pour désigner des tiges d'avenir. Pardé & Venet notent par ailleurs une immobilisation des positions sociales dès l'âge de 50 ans, quelles que soient les interventions sylvicoles, dans des placettes d'expérience de la forêt de Haye. Ces deux auteurs citent enfin Badoux (1939) et Delvaux (1964) qui, parlant de places d'expérience de hêtre en Suisse et en Belgique, concluent : "*Les plus gros sujets imposent leur présence de bonne heure* [...] *et les desserrements ultérieurs ne modifient guère l'allure de leur développement.*", et "*L'éclaircie* [...] *se montre inefficace à stimuler une dynamique progressive chez les arbres non dominants*".

La croissance de l'érable à sucre et du hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehr.) provenant d'une futaie d'une quarantaine d'années dans la région du Témiscouata (Canada), a été reconstituée à partir de l'analyse de cinquante et une tiges par Zarnovican & Trentia (1987). D'après les résultats obtenus, la différentiation sociale des arbres dans le peuplement était déja terminée à l'âge de trente ans, et la hiérarchie qui en a résulté était pratiquement fixée.

Dhôte (1990) confirme par ses résultats ceux de Delvaux concernant la stabilité des positions sociales acquises très tôt. Des éclaircies ont été pratiquées dans des peuplements de hêtres âgés de 37 à 70 ans, suite à la désignation d'arbres d'avenir parmi les brins dominants et codominants. Quatre résultats principaux peuvent alors être dégagés : 1) la réaction à l'éclaircie est très nette quel que soit l'âge ; 2) la réaction de l'accroissement à 1,30 m est immédiate, dès la première année consécutive à l'éclaircie ; 3) tous les arbres réagissent positivement, quelle que soit leur dimension initiale ; 4) enfin, pour une intensité d'éclaircie donnée, il y a une très forte conservation des positions sociales relatives des arbres (les courbes de croissance ne se croisent pas). Dans le cas extrême, des individus initialement codominants et fortement mis en lumière se retrouvent, au terme de dix ans, avec des dimensions équivalentes à celles des dominants non favorisés par une éclaircie. Par analyse du développement des houppiers, Dhôte montre que les arbres dominants ont un potentiel d'expansion non négligeable, même en l'absence d'éclaircie. Grâce à ce potentiel, ils accentuent leur dominance et améliorent leur croissance. *In fine*, dans une étape de modélisation, Dhôte rend son modèle strictement conservatif vis-à-vis des positions sociales.

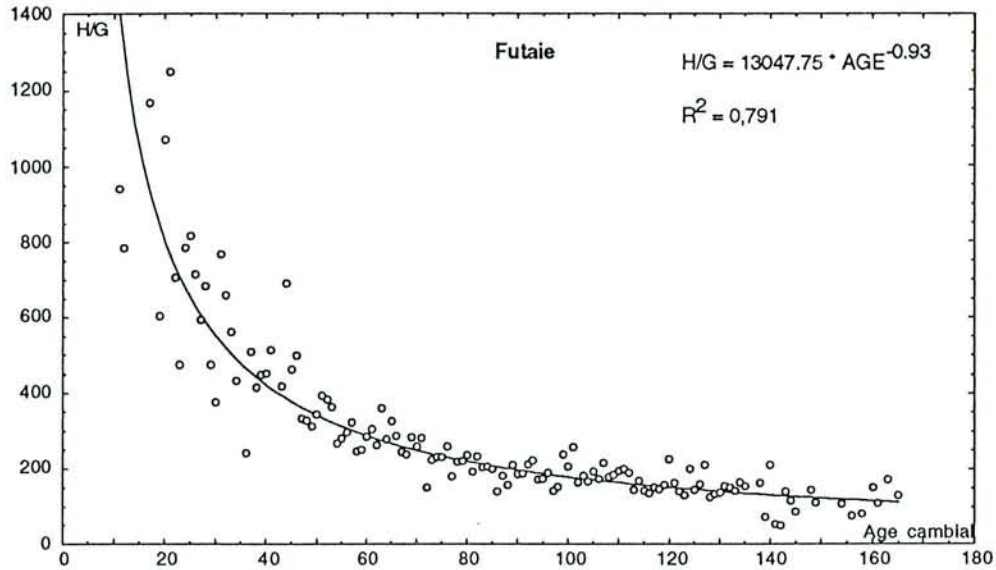



**Figure 48** : Relation entre le rapport h/g et l'âge à 1,30 m pour les arbres de futaie.

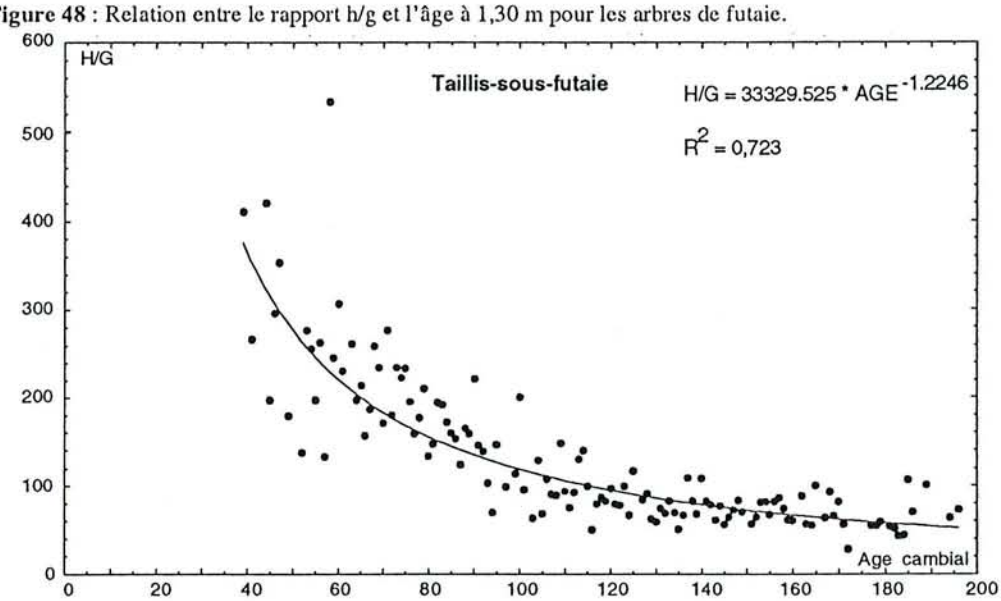



**Figure 49** : Relation entre le rapport h/g et l'âge à 1,30 m pour les arbres de taillis-sous-futaie.

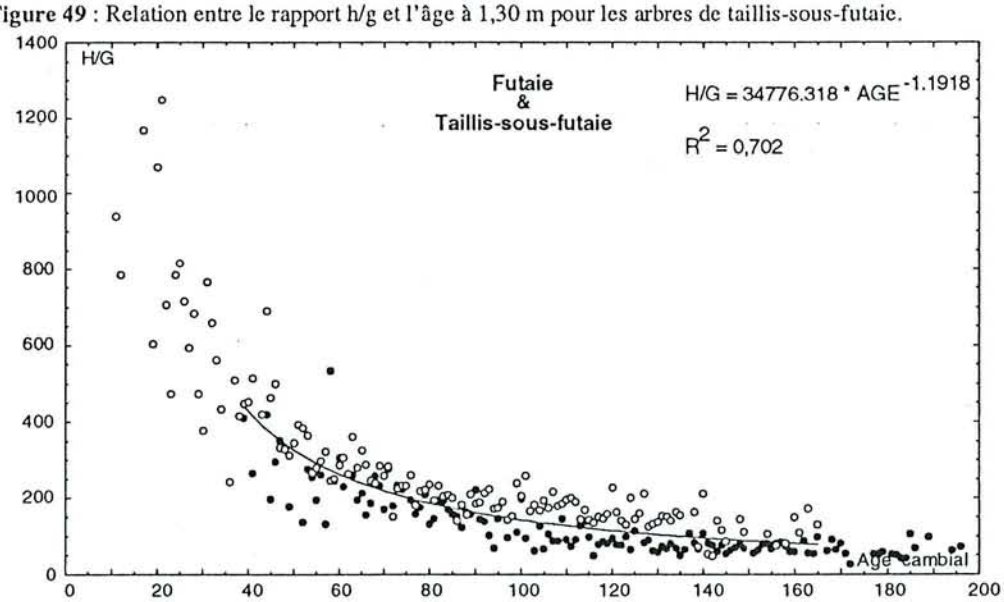



**Figure 50** : Relation entre le rapport h/g et l'âge à 1,30 m pour les arbres de futaie et de taillis-sous-futaie ayant un âge compris entre 39 et 165 ans

En conclusion, bien qu'il soit encore difficile de l'affirmer avec une entière certitude, le statut social d'un arbre semble être pour une large part un caractère acquis très tôt et peu susceptible d'évoluer. Un arbre dominant le serait de plus en plus tout au long de sa vie. Un biais à ce niveau dans la mise en évidence des tendances à long terme semble donc peu probable, surtout dans le cas des réserves de taillis-sous-futaie où les reclassements semblent impossibles. Après leur installation, les réserves formant la strate dominante se concurrencent bien moins que dans le cas des futaies.

Si on admet la stabilité à long terme des structures sociales, il peut exister à un moment donné, c'est-à-dire pour une classe d'âges actuels, une certaine hétérogénéité des conditions de compétition par rapport à une moyenne théorique. Les pressions de compétition subies par un arbre ne pouvant pas être reconstituées *a posteriori,* il peut sembler difficile de vérifier cette hypothèse. Pourtant, Becker (1992) a obtenu des résultats intéressants à propos de l'évolution à long terme de la croissance radiale des chênes sessiles et pédonculés du Plateau Lorrain, échantillonnés en futaie et en taillis-sous-futaie en cours de conversion. Les indices de croissance radiale de ces chênes, précédemment étudiés par Nieminen (1988), ne montraient aucune tendance à long terme. Puis, en appliquant une méthode de prise en compte de l'effet de la compétition "passée et inconnue", Becker a mis en évidence une très nette dérive positive de la croissance radiale de ces mêmes arbres depuis 1830.

Cette méthode de correction, également utilisée par Bert (1992) sur les sapins jurassiens traités en futaies régulières et jardinées, nous a semblé intéressante à mettre en pratique sur notre lot de données. Dans le paragraphe suivant nous développerons uniquement les étapes de calcul de cette méthode de correction, la méthodologie complète ainsi que sa justification étant exposée par Becker (1992).

### 6.1 - Méthode

La méthode de prise en compte du "*passé sylvicole varié et inconnu*" repose sur le calcul du coefficient d'élancement. A l'échelle du peuplement ce coefficient est appelé "facteur de stabilité". Son expression est le rapport de la hauteur totale de l'arbre de surface terrière moyenne du peuplement (H) par le diamètre de ce même arbre (D). Au niveau de l'arbre le rapport h/d permet de décrire la forme de la tige. Cependant, il ne s'agit pas seulement d'un coefficient de forme ; il renseigne également sur la position sociale des arbres (Zarnovian & Trencia, 1987 ; Ung, 1989). Les arbres dominants et codominants ont "normalement" un rapport inférieur à 100 (Pardé & Bouchon, 1988). La figure 47 montre que la majorité des arbres a un coefficient d'élancement inférieur à 100 et même inférieur à 80, valeur recommandée pour le choix des arbres d'avenir. Les quelques arbres qui ont un rapport h/d supérieur à 100 sont tous de jeunes arbres. Les arbres que nous avons échantillonnés font donc bien partie de la strate dominante.

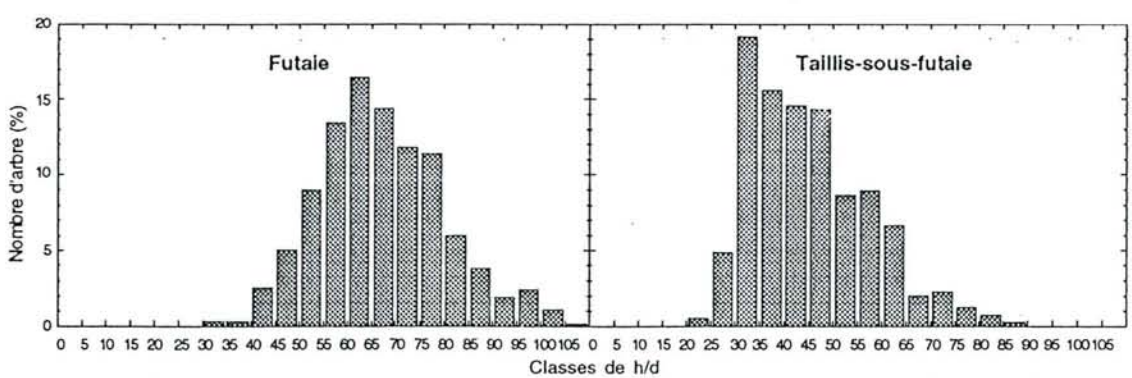



**Figure 47** : Effectif des arbres, exprimé en pourcentage, en fonction de la valeur du coefficient d'élancement h/d (pour la futaie n = 634, pour le taillis-sous-futaie n = 391).

A partir du coefficient d'élancement, Becker fonde sa méthode sur deux remarques : "*Le facteur d'élancement d'un arbre résulte de la compétition moyenne subie depuis sa naissance, mais est indépendant du type de station* ", (puisque la hauteur et le diamètre évoluent dans le même sens en fonction de la fertilité). Le rapport h/d peut être calculé pour l'ensemble de nos arbres puisque nous disposons des hauteurs totales et

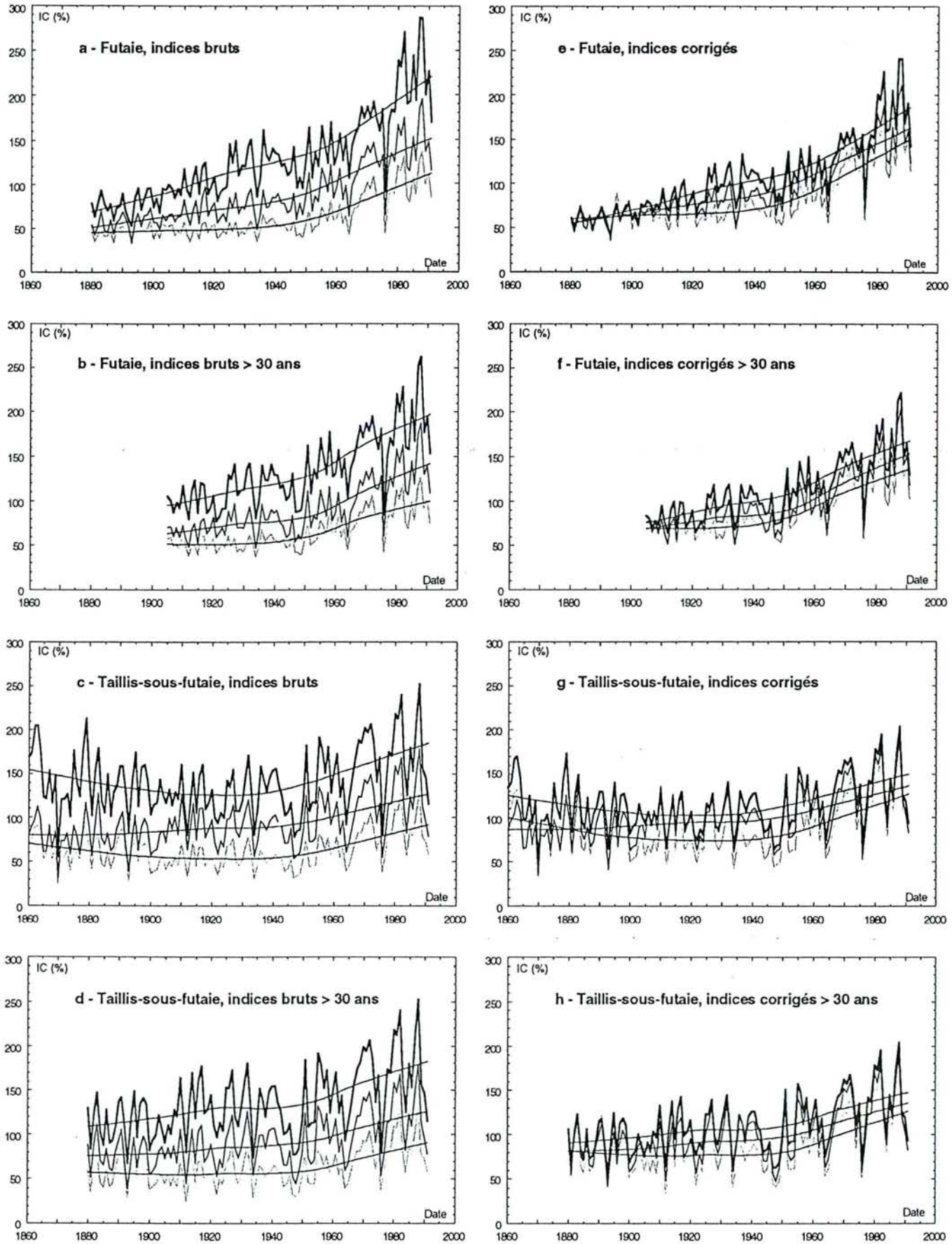



**Figure 51** : Stratification des indices de croissance radiale en fonction de l'indice de compétition $\alpha$ : $\alpha < 0,9$, courbe fine grisée ; $0,9 \leq \alpha \leq 1,1$, courbe fine noire ; $\alpha > 1,1$, courbe épaisse noire. Les graphiques a, b, c et d représentent les indices moyens bruts. Les graphiques e, f, g et h représentent les indices moyens corrigés de l'effet de la compétition par le coefficient Cg. Pour les deux traitements sylvicoles, les indices moyens prennent en compte (fig. a, c, e, g) ou non (fig. b, d, f, h) les cernes d'âge cambial inférieur à 30 ans. Chaque indice moyen est calculé à partir d'au moins trente indices initiaux.

des circonférences à 1,30 m. Comme nous utilisons préférentiellement des données de croissance radiale exprimées en surface terrière, nous n'utiliserons pas le rapport h/d initialement proposé par Becker, mais le rapport h/g ; g étant le symbole généralement employé par les sylviculteurs pour exprimer la surface terrière d'un arbre à la hauteur de 1,30 m (soit $g = circonférence^2 / 4\pi$ ).

Le rapport h/g n'est pas indépendant de l'âge et la première étape de la méthode consiste à analyser cette relation. Afin de pouvoir ajuster sans ambiguïté h/g en fonction de l'âge, on calcule préalablement une moyenne des h/g pour chaque âge. Ce calcul de moyenne permet d'une part, de rendre le nuage de points homoscédatique puisque la variance diminue (parallèlement à la moyenne) quand l'âge augmente, et permet d'autre part de minimiser le poids des valeurs de h/g les plus extrêmes. Les nuages de points obtenus peuvent être ajustés directement par une fonction de puissance (Figures 48, 49 et 50).

L'ajustement de h/g donne, pour chaque âge actuel, le coefficient d'élancement d'un arbre théorique de référence, reflétant les conditions moyennes de compétition à cet âge. Le coefficient d'élancement de chaque arbre (h/g) peut alors être comparé au coefficient de l'arbre de référence (hr/gr) :

$$\alpha = \frac{h/g}{(h/g)_r}$$

Le coefficient alpha représente alors un facteur d'élancement standardisé en fonction de l'âge et rapporté à un traitement moyen dans les conditions moyennes de densité de l'ensemble de l'échantillon. Si alpha est supérieur à 1 cela signifie que les arbres sont plus hauts (ou plus étroits) que l'arbre de référence : ils ont donc subi une compétition supérieure à la moyenne de l'échantillon. A l'opposé, si alpha est inférieur à 1, il caractérise des arbres poussant plus librement que la moyenne. On remarque ainsi que les coefficients d'élancement des arbres de taillis-sous-futaie sont très nettement inférieurs à ceux de futaie régulière. Les réserves de taillis-sous-futaie, qui poussent dans des conditions plus libres que les arbres de futaie, sont caractérisées par une morphologie plus "trapue", indépendament des conditions stationnelles.

Le facteur alpha intègre les variations de hauteur et de diamètre qui sont toutes deux modulées par la concurrence. Alpha peut être décomposé en deux coefficients correcteurs, l'un agissant sur le diamètre (ou la surface), et l'autre agissant sur la hauteur :

$$C_d \cdot d = d_{référence} \text{ (ou } C_g \cdot g = g_{référence})$$

et

$$C_h \cdot h = h_{référence}$$

Puisque $\alpha = \frac{h/g}{(h/g)_r}$ on obtient la relation $\alpha = \frac{C_d}{C_h}$ (ou $\alpha = \frac{C_g}{C_h}$)

La part relative de Cs et Ch doit alors être déterminée. Cette phase est la principale difficulté de la méthode. Le modèle suivant a été proposé par Becker :

$$C_g = \alpha^{1-k} \text{ et } C_h = \alpha^{-k}$$

Le facteur k traduit la façon dont les effets de la compétition se répartissent entre la croissance radiale et la croissance en hauteur. Empiriquement, la valeur de k a été déterminée par Becker, à partir des données dendrométriques des chênes du Plateau Lorrain. La valeur la plus pertinente est 0,3. Cette valeur a été confirmée par Bert (1992). Comme ces deux auteurs, nous avons pu vérifier que des valeurs choisies entre 0,2 et 0,4 n'apportent pas de différence significative dans les résultats.

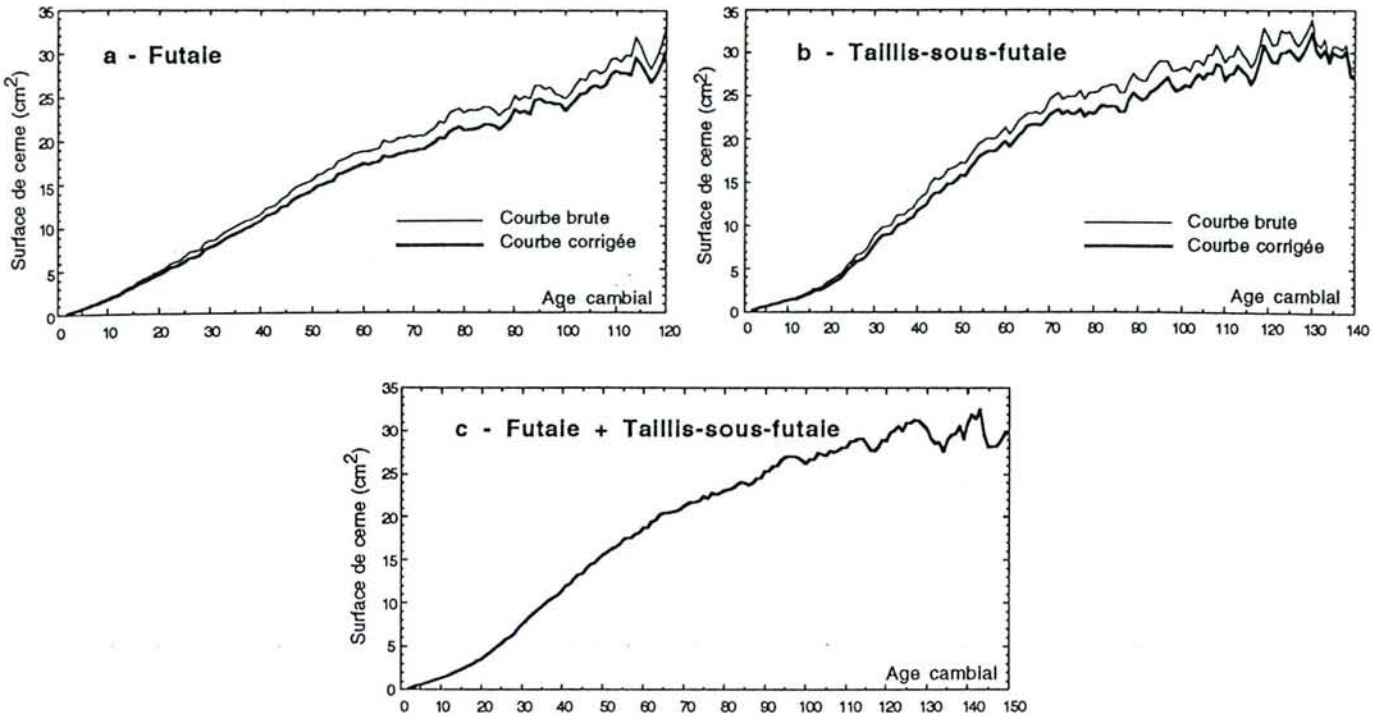



**Figure 52 : Prise en compte de l'effet de la compétition dans le calcul des courbes âge.** Fig. **a** et **b**, effet de la correction sur la forme des courbes âge de futaie et de taillis-sous-futaie. Fig. **c**, courbe âge calculée à partir de l'ensemble des surfaces de cernes corrigées par un coefficient Cg calculé à partir d'un ajustement commun aux arbres de futaie et de taillis-sous-futaie ayant un âge compris entre 39 et 165 ans.

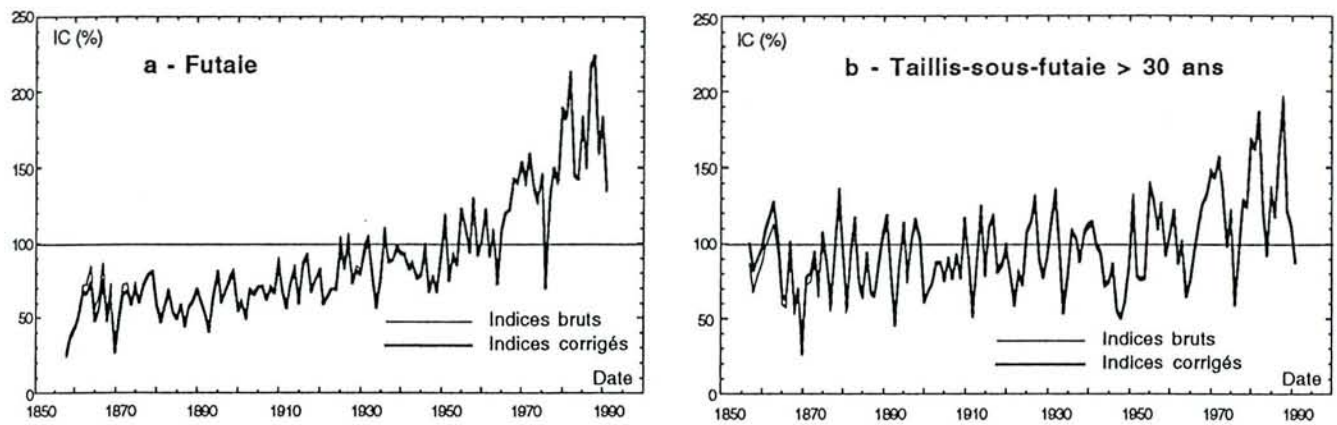



**Figure 53** : Effet de la prise en compte de la compétition sur les indices de croissance moyens des arbres de futaie (**a**) et de taillis-sous-futaie (**b**).

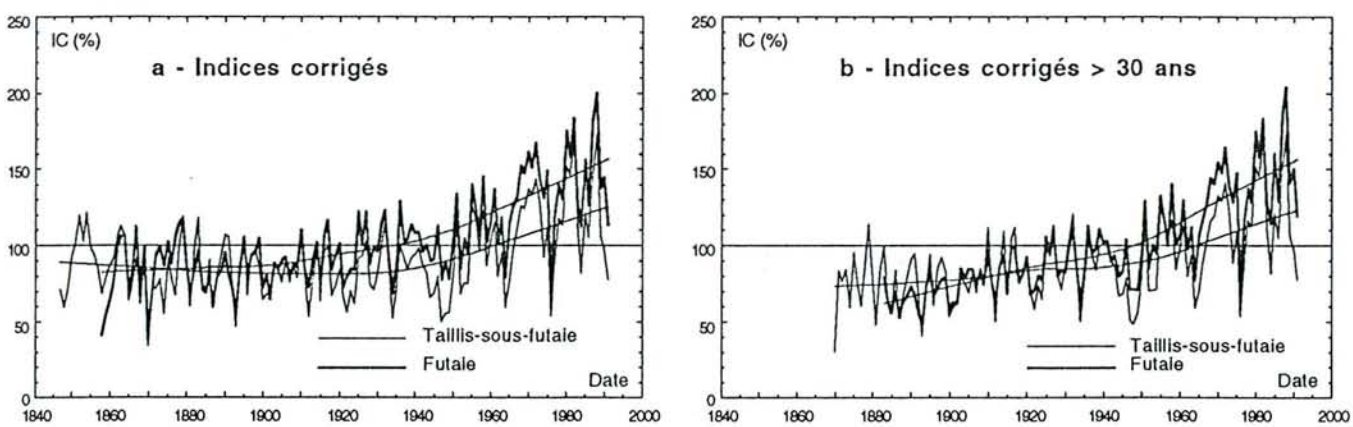



**Figure 54** : Indices de croissance moyens, pour la futaie et le taillis-sous-futaie, corrigés par Cg et calculés à partir d'une courbe âge commune aux deux traitements sylvicoles. Les indices moyens représentés sont calculés à partir d'un minimum de trente indices initiaux. Ils intègrent tous les âges cambiaux (Fig. **a**) ou les âges cambiaux supérieurs à 30 ans (Fig. **b**).

Pour le calcul des coefficients correcteurs de la compétition nous avons donc retenu :

$$C_g = \alpha^{0,7} \quad \text{et} \quad C_h = \alpha^{-0,3}$$

Pour chaque arbre, nous avons calculé les coefficients Cg et Ch. Dans cette partie de notre étude, nous ne développerons que l'utilisation du coefficient Cg relatif aux accroissements radiaux. L'utilisation du coefficient correctif sur la hauteur sera exposée dans le chapitre VI (§ méthodes).

### 6.2 - Stratification des indices de croissance radiale en fonction du coefficient α

Pour les arbres de futaie, les valeurs de alpha sont distribuées entre 0,37 et 2,89 (moyenne 1,03) ; pour les arbres de taillis-sous-futaie entre 0,37 et 2,84 (moyenne 1,04). Puisqu'elles ont été obtenues à partir de courbes de référence différentes, ces grandeurs ne sont pas directement comparables, mais on s'aperçoit que l'amplitude de distribution est la même.

Les arbres de futaie et de taillis-sous-futaie sont divisés en trois classes, selon le niveau de concurrence :

- valeurs de alpha inférieures à 0,9 soit 242 arbres de futaie et 161 arbres de taillis-sous-futaie ;
- valeurs de alpha comprises entre 0,9 et 1,10 soit 177 arbres de futaie et 89 arbres de taillis-sous-futaie ;
- valeurs de alpha supérieures à 1,10 soit 201 arbres de futaie et 141 arbres de taillis-sous-futaie ;

Les courbes moyennes des indices de croissance, calculées pour chaque traitement sylvicole, chaque niveau de compétition et en incluant ou non les cernes d'âge cambial inférieur à 30, sont reportées sur les figures 51a à 51d. Dans chaque cas, les courbes sont nettement séparées sur toute la période étudiée.

En futaie, les arbres peu concurrencés montrent une tendance à long terme très importante (Figure 51a). La puissance de la tendance diminue quand le niveau de compétition augmente, mais les arbres les plus concurrencés, s'ils ont gardé un niveau de croissance stable jusque dans les années 1950, montrent tout de même à partir de cette date une augmentation très significative de croissance. L'élimination des jeunes cernes ne modifie pas l'allure des courbes (Figure 51b).

En taillis-sous-futaie, les remarques sont identiques. Comme nous l'avons montré précédemment, les tendances à long terme sont plus évidentes si les cernes de moins de 30 ans ne sont pas pris en compte (Figure 51d). A tel point que, pour les arbres les moins concurrencés, on observe une nette tendance décroissante entre les années 1860 et 1920 lorsque ces jeunes cernes sont pris en compte (Figure 51c).

Pour chaque traitement sylvicole, on constate enfin que les amplitudes du niveau de croissance sont d'autant plus fortes que le niveau de compétition est bas. Les arbres les moins concurrencés intègrent sans doute beaucoup mieux les fluctuations climatiques interannuelles que les arbres plus concurrencés.

### 6.3 - Prise en compte de la compétition dans le calcul des indices de croissance pour chaque traitement sylvicole

Puisque le coefficient d'élancement intègre, par définition, les conditions moyennes de compétition subies par un arbre au cours de sa vie, on peut utiliser le facteur Cg pour corriger les surfaces de cernes des effets de la compétition. Le coefficient Cg étant d'autant plus fort que le niveau de compétition est élevé, il augmentera les faibles surfaces de cernes dues à un fort niveau de concurrence et il diminuera les surfaces de cernes des arbres poussant librement.

Une nouvelle courbe âge peut être calculée à partir des surfaces de cernes corrigées (Figures 52a et 52b) ainsi que de nouveaux indices de croissance (Figures 53a et 53b). Ces derniers peuvent également être

séparés en classes en fonction du coefficient alpha (Figures 51e à 51h). La comparaison des figures 51e à 51h avec les figures 51a à 51d montre immédiatement l'intérêt de l'utilisation du coefficient Cg. Dans les quatre cas présentés, les écarts des niveaux de croissance ainsi que les différences d'évolution à long terme de cette croissance, ont été fortement réduits par Cg qui corrige les effets de la compétition. Par contre la moyenne générale des indices corrigés est identique à celle des indices non corrigés par Cg (Figures 53a et 53b). A chaque date disponible, les effets de la correction sur chaque cerne se sont compensés. La prise en compte de la compétition ne modifie ni la forme, ni l'intensité de la tendance à long terme de la croissance radiale.

### 6.4 - Prise en compte de la compétition dans le calcul des indices de croissance en ne séparant pas les traitements sylvicoles

La comparaison directe des indices de croissance moyens calculés pour la futaie et le taillis-sous-futaie est impossible car les courbes âge qui ont servi à la standardisation sont différentes : le niveau de référence de 100% ne correspond pas à la même croissance radiale dans les deux traitements sylvicoles. Pour pouvoir comparer les indices, il faudrait construire une courbe âge commune aux deux types de gestion. Le niveau de compétition étant très différent dans les deux cas, nous avons utilisé un indice de correction commun.

L'évolution du rapport h/g en fonction de l'âge est modélisé en mélangeant les points de futaie et de taillis-sous-futaie. Pour que cet ajustement soit le plus correct possible, les arbres de même âge ont été conservés dans les deux traitements sylvicoles. Nous avons ainsi éliminé les arbres de moins de 39 ans (présents en futaie mais absents en taillis-sous-futaie) et les arbres ayant plus de 165 ans (fréquents en taillis-sous-futaie mais absents en futaie). Le résultat de cet ajustement est présenté sur la figure 50. Comme précédemment, le coefficient correcteur Cg a été calculé pour chaque âge disponible et appliqué aux surfaces de cernes des arbres de futaie et de taillis-sous-futaie. La courbe âge commune à tous les arbres est présentée sur la figure 52c. A partir de cette courbe âge et des surfaces de cernes corrigées, les indices de croissance radiale ont été calculés, puis moyennés en fonction des années calendaires, soit en utilisant tous les cernes (Figure 54a), soit en excluant les cernes de moins de 30 ans (Figure 54b).

Au milieu du siècle dernier, le niveau de croissance des arbres de futaie et de taillis-sous-futaie est le même. Jusque dans les années 1950, ce niveau de croissance reste stable pour les arbres de taillis-sous-futaie (pente non significative au seuil de 5%), mais augmente significativement pour les arbres de futaie. Après les années 1950, futaie et taillis-sous-futaies montrent une tendance positive. Sans les cernes de moins de 30 ans, on retrouve une tendance positive et significative dans les indices de futaie sur toute la période étudiée, et dans le cas du taillis-sous-futaie la tendance positive devient significative avant 1950. La tendance à long terme observable en futaie correspond à un taux de croissance relatif de +89% si on inclut les cernes de moins de 30 ans et à un taux de +152% sans ces cernes. Pour le taillis-sous futaie, les taux de croissance respectifs, avec ou sans les cernes de moins de 30 ans, sont de +40% et +68%.

### 6.5 - Conclusion sur les indices de correction de la compétition

Le rapport de la hauteur totale de l'arbre divisée par sa surface terrière à 1,30 m est un bon estimateur de la concurrence subie par les arbres, pour chaque type de sylviculture. Le niveau de la croissance ainsi que la tendance à long terme de la croissance radiale sont dépendants de la compétition et ces différences peuvent être corrigées efficacement par un coefficient intégrant cette compétition.

Pourtant, les corrections réalisées sur les arbres séparés en trois classes de concurrence s'annulent quand on considère l'ensemble des arbres pour une sylviculture donnée : la moyenne générale des indices corrigés par le facteur Cg est identique à la moyenne des indices non corrigés car les effets de la correction sur chacun des cernes disponibles se sont compensés.

Le calcul d'un coefficient unique de correction de la concurrence entre les arbres de futaie et de taillis-sous-futaie a permis de comparer les valeurs absolues des indices de croissance entre les deux traitements sylvicoles. Mais contrairement aux résultats obtenus par Becker (1992), l'emploi de cet indice commun n'a

pas abouti à la mise en évidence d'une tendance à long terme de la croissance radiale plus marquée pour l'un ou l'autre de nos sous-échantillons.

Ces résultats pourraient paraître négatifs, mais ils peuvent être expliqués simplement. Tout d'abord, les moyennes du rapport h/g utilisées pour calculer α correspondent, pour chaque âge cambial, à la valeur de la médiane. Les différentes valeurs de h/g sont donc réparties de façon homogène autour de leurs moyennes quel que soit l'âge : il n'existe pas, pour une sylviculture donnée, d'arbre ayant une valeur de h/d très excentrée par rapport à la moyenne de toutes les valeurs de h/d à un âge donné. Nous avons d'ailleurs pu vérifier que l'ajustement des moyennes de h/g en fonction de l'âge était strictement identique à l'ajustement de l'ensemble des valeurs disponibles à chaque âge. D'autre part, nous avons vu précédemment que tous nos arbres font partie de la strate dominante, si on se réfère aux valeurs du coefficient d'élancement. La prise en compte de la compétition passée n'est donc pas intéressante si la grande majorité des arbres échantillonnés a toujours été incluse dans la strate dominante et surtout si, à aucun des âges ou classes d'âge actuelles il n'y a de déséquilibre dans la répartition des valeurs des rapports h/d. Dans l'étude du Pin laricio dans les Pays de la Loire, Lebourgeois (1995) montre qu'il n'existe pas de déséquilibre à un âge donné dans la répartition des valeurs de h/d : comme dans le cas du hêtre sur les plateaux calcaires de Lorraine, la correction de la compétition ne modifie pas la forme de la courbe d'évolution des indices moyens.

La tendance à long terme mise en évidence pour les chênes de plaine par Becker à partir des données de Nieminen (1988) est apparue grâce à l'utilisation d'un coefficient correcteur de la compétition. Comme dans notre étude, ces auteurs ont échantillonné des arbres de futaie et de taillis-sous-futaie, mais la répartition des classes d'âge actuel entre les deux types de gestion sylvicole n'est pas la même. Dans les forêts de Champenoux et d'Amance, les plus vieux chênes de futaie étaient âgés de 130 ans. Pour compléter l'échantillonnage, de plus vieux arbres étaient nécessaires. Ils ont été choisis parmi les plus vieilles réserves des taillis-sous-futaie en cours de conversion. Dans ce cas, les classes d'âge actuel se superposent peu entre les deux types de gestion sylvicole et, faute d'effectif, il n'est pas possible de construire une courbe âge valide pour chacun des sous-échantillons. Les arbres de futaie et de taillis-sous-futaie doivent être mélangés, mais ce mélange d'arbres au passé sylvicole très différent n'est possible que s'ils sont ramenés à un niveau moyen de compétition. L'utilisation d'un coefficient correcteur de cette compétition passée est alors pleinement justifiée et les résultats indiscutables. A l'opposé, dans notre étude, nous disposons pour les arbres de futaie et de taillis-sous-futaie, de toutes les classes d'âge. Une courbe âge peut être construite pour chacun d'eux et il n'est alors pas nécessaire de mélanger les deux traitements sylvicoles : notre échantillon est suffisant pour étudier l'évolution à long terme de la croissance radiale pour chaque type de peuplement. Cette remarque est corroborée par l'étude de Bert (1992) qui montre que la prise en compte de la compétition ne modifie que très peu la forme générale des tendances à long terme observées en futaie régulière et en futaie jardinée de sapins : dans les deux cas, la répartition de l'âge des arbres était homogène entre les deux traitements sylvicoles.

## 7 - Séparation du bois initial et du bois final pour l'étude des tendances à long terme

### 7.1 - Proportions respectives de bois initial et de bois final dans le cerne annuel

Lors de la saisie des largeurs de cernes, nous avons séparé une zone de bois initial formée au début de la période végétative et une zone de bois final formée en fin de saison (cf. page 21). Bien que la séparation de ces deux zones soit difficile, on constate que la proportion des deux types de formations n'est pas constante à l'intérieur du cerne en fonction de l'âge cambial (Figures 55 et 56).

La proportion de bois initial et de bois final n'est pas identique entre les arbres de futaie et les arbres de taillis-sous-futaie. Avant 40 ans, le cambium des arbres de futaie produit plus de bois initial que celui des arbres de taillis-sous-futaie. Après 60 ans, on observe l'inverse. Pour les deux traitements sylvicoles, l'évolution des proportions est comparable. Dans les plus jeunes âges, le bois initial représente à peu près 65% de la largeur ou de la surface du cerne. Ce pourcentage augmente fortement jusqu'à l'âge de 50 ans environ pour atteindre la valeur de 75%. Après 60 ans, les proportions n'évoluent presque plus : à l'âge de 120 ans, le bois initial représente en moyenne 77,5% de la largeur ou de la surface totale du cerne.

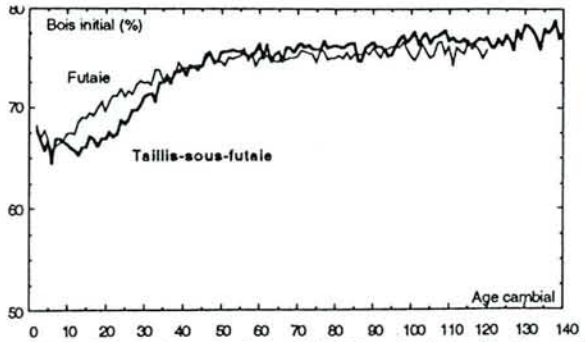



**Figure 55** : Proportion du bois initial (et du bois final) sur la largeur du cerne en fonction de l'âge cambial.

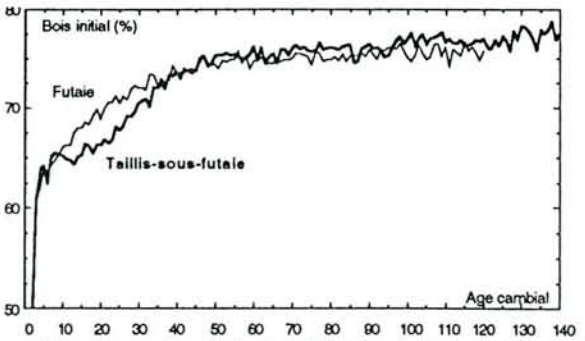



**Figure 56** : Proportion du bois initial (et du bois final) sur la surface du cerne en fonction de l'âge cambial.

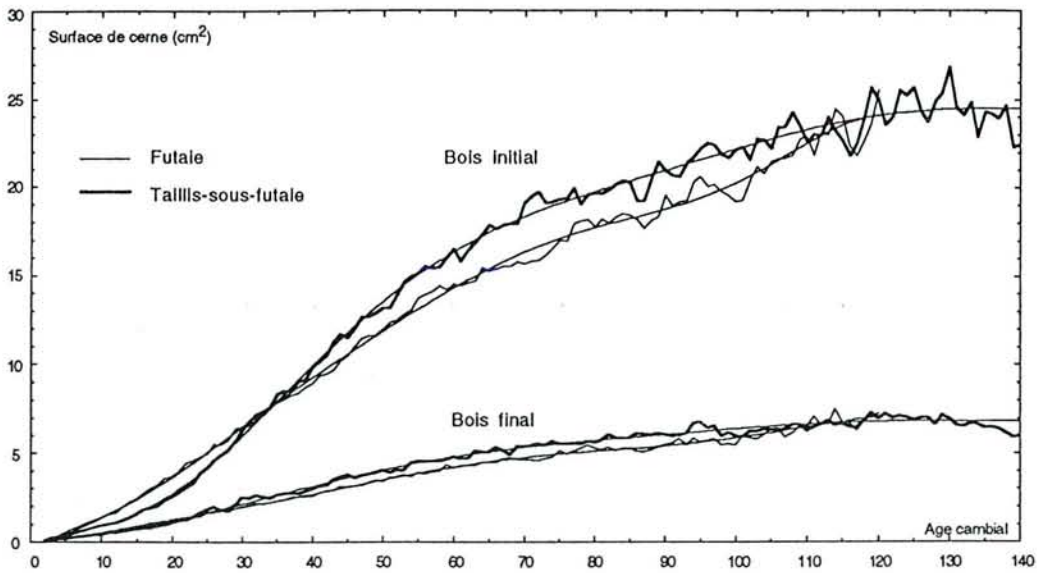



**Figure 57** : Accroissements moyens du bois initial et du bois final exprimés en surfaces terrières annuelles en fonction de l'âge cambial pour les arbres de futaie et de taillis-sous-futaie.

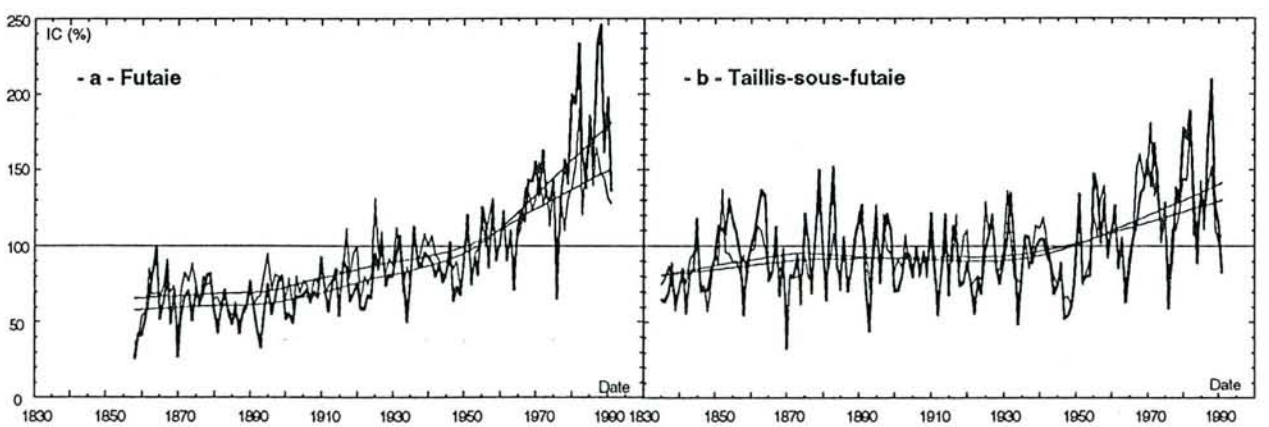



**Figure 58** : Evolution des indices de croissance du bois initial (courbes en gras) et du bois final (courbes fines) en fonction de la date pour les arbres de futaie (**a**) et de taillis-sous-futaie (**b**).

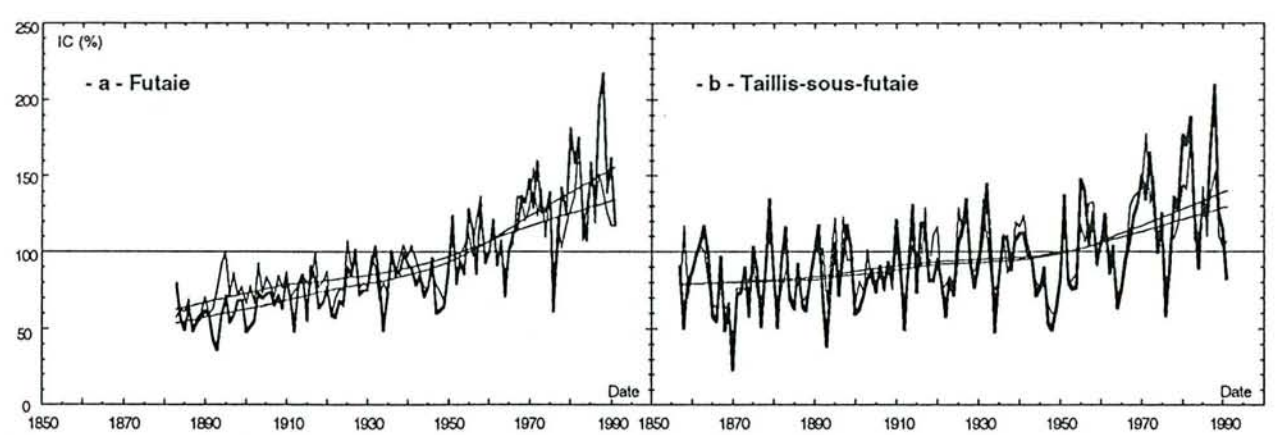



**Figure 59** : Evolution des indices de croissance du bois initial (courbes en gras) et du bois final (courbes fines) en fonction de la date pour les arbres de futaie (**a**) et de taillis-sous-futaie (**b**), sans les cernes âgés de moins de 30 ans.

### 7.2 - Etude de l'évolution à long terme des surfaces de bois initial et de bois final

#### 7.2.1 - Méthodes

Suite aux résultats obtenus sur les surfaces de cernes totales, il est intéressant d'analyser séparément les dérives à long terme de la croissance radiale pour le bois initial et le bois final. Les méthodes d'analyse restent les mêmes que celles utilisées jusqu'à présent :

1° - recherche d'une loi liant l'accroissement annuel à l'âge courant sur une base régionale et modélisation mathématique des courbes moyennes (Figures 57) ;

2° - standardisation des surfaces partielles ;

3° - évolution à long terme des surfaces de bois initial et de bois final en utilisant tous les âges cambiaux (Figures 58a et 58b) ;

4° - évolution à long terme des surfaces de bois initial et de bois final en utilisant les âges cambiaux supérieurs à 30 ans (Figures 59a et 59b) ;

Pour la modélisation des courbes âges, deux méthodes ont été testées. La première consiste simplement à ajuster séparément les courbes concernant le bois initial et le bois final. La seconde méthode utilise, pour une gestion sylvicole donnée, l'ajustement de la courbe âge réalisé à partir des cernes complets. Cet ajustement est alors divisé en deux parties en fonction de la proportion de bois initial et de bois final à un âge donné. Il convient alors de modéliser la proportion de bois initial (ou de bois final) dans un cerne en fonction de l'âge. On obtient ainsi, pour le bois initial et pour le bois final, des indices de croissance standardisés à partir d'une même courbe. Ces indices sont alors directement comparables et on minimise les erreurs toujours possibles lors des ajustements. Rappelons à ce propos que de faibles écarts entre l'ajustement et la moyenne des surfaces terrières annuelles des jeunes cernes peut entraîner un biais important sur la forme de l'évolution des indices de croissance pour les dates anciennes. Malgré les précautions prises pour modéliser les courbes âges, les deux méthodes aboutissent à des résultats comparables, que nous ne détaillerons donc pas.

#### 7.2.2 - Résultats

Pour chaque traitement sylvicole, on retrouve les résultats obtenus à partir des cernes complets : 1) la tendance est plus forte et plus régulière pour les arbres de futaie ; 2) la tendance s'accentue après les années 1950 ; 3) les cernes de moins de 30 ans ont un poids non négligeable dans le phénomène de tendance à long terme, surtout dans le cas du taillis-sous-futaie.

Dans le cas des futaies, les courbes de référence produites à partir des surfaces de bois initial et de bois final ne sont cependant pas strictement identiques. Sur l'ensemble de la période considérée, on s'aperçoit que la tendance est plus marquée pour le bois initial que pour le bois final. Par contre, en taillis-sous-futaie, les surfaces indicées moyennes évoluent conjointement. Ce n'est que très récemment que les deux courbes se séparent.

Pour les arbres de futaie, entre 1883 et 1991, on note une augmentation relative de la croissance radiale de +190% pour le bois initial et de +115% pour le bois final (Figure 59a). Pour les arbres de taillis-sous-futaie, entre 1857 et 1991, l'augmentation relative de la croissance radiale est de +78% pour le bois initial et de +65% pour le bois final (Figure 59b).

### 7.3 - Conclusions sur l'étude du bois initial et du bois final

L'évolution positive des surfaces de cernes au cours du temps n'est pas due à une évolution particulière d'une des différentes zones constituant le cerne. Les quantités de bois initial et de bois final ont augmenté conjointement au cours du temps, tant en futaie qu'en taillis-sous-futaie. Pourtant, dans le cas particulier des arbres de futaie, il semble que la zone de bois initial ait plus profité d'une amélioration supposée des conditions environnementales que la zone de bois final.

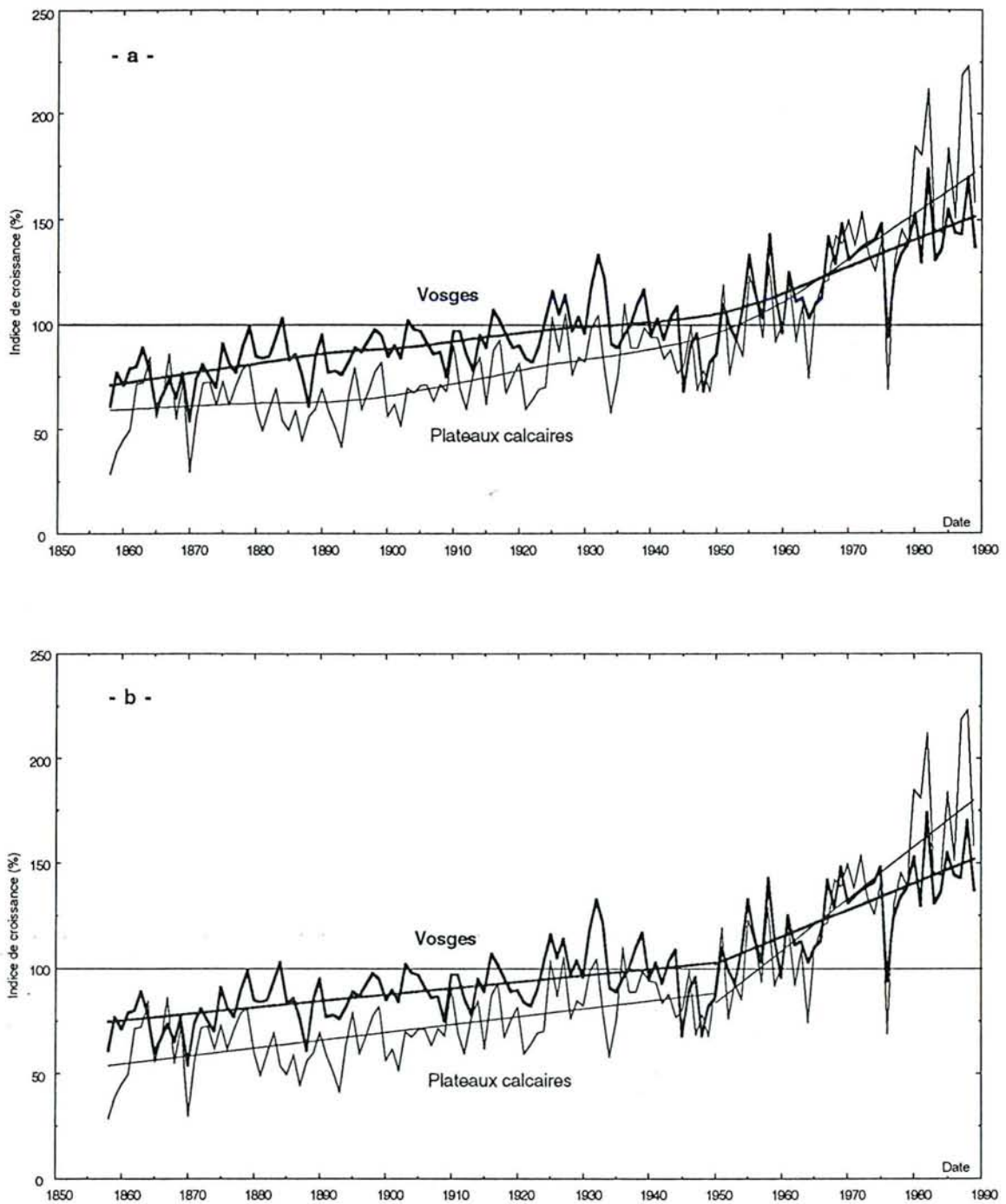



**Figure 60** : Evolution comparée de la croissance des futaies de hêtres des plateaux calcaires de Lorraine et du massif Vosgien : -a- lissage des données, -b- droites de régression ajustées sur les périodes 1858 - 1950 et 1950 - 1991.

L'étude à long terme de la croissance radiale n'a jusqu'à présent jamais été réalisée en séparant le bois initial et le bois final. Les seuls résultats comparables ont été obtenus sur le Pin laricio dans les Pays de la Loire (Lebourgeois, 1995). Sur des arbres âgés en moyenne de 40 ans, une dérive positive de la croissance radiale a pu être mise en évidence et le bois initial s'est révélé plus réactif que le bois final. La proportion de ces deux zones dans le cerne est pourtant très différente de celle observée pour les hêtres. Le bois initial représente 80% de la surface du cerne dans les jeunes âges et seulement 50% à partir de 40 ans.

### 8 - Comparaison de l'évolution à long terme de la croissance radiale entre les futaies vosgiennes et les futaies des plateaux calcaires

La hêtraie vosgienne a été étudiée sur le versant lorrain (Picard, 1995) et sur le versant alsacien (en cours). A partir de 100 placettes provenant du versant lorrain et 70 placettes du versant alsacien (Becker *et al.*, 1994a), une courbe de référence a été calculée à partir des surfaces terrières de cernes annuelles. Cette courbe couvre la période 1801 - 1989. L'évolution de la croissance radiale des hêtres vosgiens peut être comparée à celle des hêtres des plateaux calcaires sur la période 1858 - 1989 (Figure 60).

Entre les deux régions forestières, nous pouvons constater que la grande majorité des crises et pics de croissance sont synchrones. Ceci souligne l'existence d'un déterminisme macro-climatique de la croissance radiale. Cependant, la présence de certains décalages suggère des différences climatiques non négligeables entre les deux massifs.

La comparaison des valeurs absolues des indices de croissance des deux courbes n'est pas possible : les courbes âge utilisées pour standardiser les surfaces de cernes ne sont pas les mêmes, les arbres ne font pas partie des mêmes classes d'âges (les hêtres vosgiens atteignent facilement 200 ans), le nombre d'âges cambiaux disponibles à chaque date n'est pas identique, le niveau trophique des placettes n'est pas le même et la sylviculture est différente. Par contre, il est intéressant de comparer l'évolution à long terme de la croissance radiale.

Après lissage des courbes (Figure 60a) on constate que la tendance à long terme est plus régulière dans les Vosges que sur les Plateaux Calcaires ; pourtant, à partir des années 1950, cette tendance semble s'accélérer comme dans le cas de nos hêtraies. Les pentes des régressions linéaires calculées avant et après 1950 sont différentes : 0,305 % par an avant 1950 et 1,274% après 1950 (Figure 60b). Dans le cas des plateaux calcaires, les pentes avant et après 1950 sont de 0,373% et 2,465%. Avant 1950, les pentes ne sont pas significativement différentes.

Entre 1858 et 1989, l'accroissement relatif moyen pour les hêtres vosgiens est de +114% (+192% pour les plateaux calcaires).

### 9 - Conclusion sur l'étude à long terme de la croissance radiale des hêtraies des plateaux calcaires en utilisant des indices de croissance standardisés à partir d'une courbe âge régionnale.

L'utilisation des séries chrononologiques standardisées sur une base régionale nous a permis de vérifier et de compléter les résultats obtenus grâce aux méthodes à âge constant.

Pour les deux traitements sylvicoles, nous pouvons confirmer l'existence d'une dérive positive de la croissance radiale depuis le siècle dernier. Dans les deux cas, et comme nous l'avions déjà montré avec les méthodes à âge constant, cette tendance positive peut nettement être séparée en deux phases de part et d'autre des années 1950. Dans les peuplements de futaie, comme en taillis-sous-futaie, la tendance est plus marquée après les années 1950.

Quelle que soit la période considérée, les arbres de futaie montrent une tendance à long terme plus marquée que ceux de taillis-sous-futaie. Ceci peut être expliqué par la réactivité différente des cernes en

fonction des classes d'âges. Pour les arbres de futaie, les cernes réagissent de façon homogène et toutes les classes d'âges sont impliquées dans les phénomènes de tendance à long terme Ce n'est pas le cas dans les taillis-sous-futaie. Les cernes les plus anciens sont tout d'abord moins réactifs que les cernes plus jeunes. Ensuite, les cernes de moins de 30 ans évoluent de façon particulière jusque dans les années 1950. Ces cernes, provenant d'arbres probablement dominés dans le jeune âge, sont restés à un niveau de croissance très élevé et constant jusque dans les années 1910. La forte chute du niveau de croissance de ces cernes dans les années 1910-1920 s'expliquerait par une très forte augmentation de la densité des jeunes arbres pendant cette période. Ceci est une hypothèse hautement spéculative, mais elle ne peut être infirmée par une hypothèse climatique : il n'existe pas chez les arbres de futaie une chute de croissance comparable pendant la même période. Globalement, avant 1950, les cernes de moins de 30 ans, en taillis-sous-futaie, ont donc évolué dans le sens inverse des autres cernes. Cette tendance négative, ajoutée à l'absence de tendance chez les cernes très âgés, rend la tendance globale observée pour les arbres de taillis-sous-futaie moins forte que pour les arbres de futaie avant 1950.

Après 1950, tous les cernes de futaie montrent une tendance positive, d'autant plus forte que les cernes sont jeunes. Dans le cas du taillis-sous-futaie, même si les jeunes cernes semblent avoir le même comportement que ceux de futaie, ils sont trop peu nombreux pour avoir un poids décisif sur la forme de la courbe (la pente de la courbe de référence entre 1950 et 1991 reste identique dans le cas du taillis-sous-futaie, avec ou sans prise en compte des cernes de moins de 30 ans ; ce n'est pas le cas pour la futaie).

Après les crises climatiques des années 1962 et 1976, les arbres de futaie et de taillis-sous-futaie n'ont pas réagi de façon équivalente. En taillis-sous-futaie, les cernes ont réagi globalement de façon synchrone quel que soit leur âge. Par contre, en futaie, les jeunes cernes ont montré des évolutions de croissance supérieures à celles des cernes plus âgés : les courbes de croissance s'empilent régulièrement en fonction des classes d'âges. Tout se passe comme si ces deux crises climatiques avaient induit une sélection des individus les plus vigoureux parmi les arbres de futaie. Cette sélection a pu être directe (mortalité de certains individus suite aux conditions climatiques) ou indirecte (développement de certaines pathologies après l'affaiblissement de certains arbres causé par les perturbations climatiques). Dans les deux cas, les arbres survivants se seraient trouvés moins concurrencés et de ce fait plus vigoureux. Cette sélection aurait été moins forte pour les arbres plus âgés car on peut penser que la "sélection naturelle" des individus s'est produite depuis plus longtemps. Les vieux arbres actuellement sur pied ont été soumis pendant très longtemps à des pressions de sélection : ils constituent actuellement des peuplements plus stables que les jeunes peuplements où il doit exister une forte variabilité génétique. Ces remarques devraient être applicables dans le cas du taillis-sous-futaie, pourtant elles ne s'expriment pas sur le faisceau de courbes. Les jeunes cernes ne semblent pas avoir bénéficié d'un affaiblissement de la concurrence. Au contraire, après les années 1960 la densité des peuplements gérés en taillis-sous-futaie a augmenté. On constate de façon générale sur tous les plans d'aménagement disponibles concernant les parcelles de taillis-sous-futaie que les révolutions, jusque là très régulières, ont été abandonnées suite à l'effondrement des besoins en bois de feu. Contrairement aux peuplements de futaie, les jeunes arbres de taillis-sous-futaie se sont trouvés, à partir des années 1960, dans des conditions de compétition de plus en plus forte. Pourtant, cette augmentation du niveau de compétition ne se traduit pas par une chute du niveau de croissance ; au contraire. La nette amélioration du niveau de croissance des jeunes arbres de futaie pourrait être alors due à une évolution des pratiques sylvicoles depuis 20 à 30 ans avec un choix de plus en plus précoce des arbres d'avenir dans les jeunes régénérations.

D'un point de vue méthodologique, les avantages de la standardisation, en utilisant une courbe âge qui exprime une loi biologique de la croissance à un niveau régional, sont évidents. Si les arbres échantillonnés font partie de très nombreuses classes d'âge et si les conditions environnementales sont comparables entre les sites, les indices de croissance radiale estimés à partir d'une courbe âge sont très efficaces pour étudier les variations à long terme de la productivité des écosystèmes forestiers. Pourtant, le calcul de ces indices implique que la forme de la courbe âge employée ne varie pas avec le temps. Cet inconvénient essentiel a été souligné par Cook *et al.* (1990). Si la forme de la courbe âge est stable en fonction du temps, ceci indique que les perturbations exogènes, ou perturbations à long terme, de la croissance radiale sont peu importantes.

Au contraire, si des évolutions lentes et continues des conditions environnementales affectent la croissance radiale au cours du temps, la forme de la courbe âge évolue conjointement.

Pour illustrer ce problème, on peut tracer les courbes liant les surfaces de cernes aux âges cambiaux, soit en fonction de différentes périodes de temps, soit en fonction de l'âge actuel des arbres. Nous avons divisé l'ensemble de notre échantillon en classes d'âge actuel de 10 ans (âge actuel ± 5 ans) et calculé une courbe âge pour chacune d'elles. Seuls les âges cambiaux pour lesquels on dispose d'au moins trente cernes sont conservés. Les résultats sont présentés sur les figures 61 et 62.

Pour les deux gestions sylvicoles, les courbes obtenues s'empilent régulièrement en fonction de la classe d'âge actuel, c'est-à-dire en fonction de la date à laquelle sont nés les arbres de la classe. A un âge cambial donné, les niveaux de croissance sont maximum pour les arbres les plus jeunes et minimum pour les plus anciens. Cet empilement indique que le niveau de croissance des arbres a évolué régulièrement au cours du temps. Cet effet date sur les courbes âge est plus accentué pour les arbres de futaie que pour les arbres de taillis-sous-futaie, conformément aux résultats obtenus précédemment. Le calcul d'une courbe âge unique pour chaque traitement sylvicole intègre donc une partie de l'effet date. Lorsque l'on utilise cette courbe moyenne pour standardiser les chronologies, on retire des surfaces de cernes à la fois l'effet âge et une part non quantifiable de l'effet date. La méthode de pondération des effectifs, lors du calcul des courbes âge, tend à minimiser ce biais, mais ce n'est pas suffisant : l'âge cambial et la date de formation du cerne ne sont jamais indépendants. Il serait donc préférable d'analyser simultanément ces deux facteurs ; c'est ce que nous tentons de faire à présent en utilisant les méthodes d'analyse de variance.

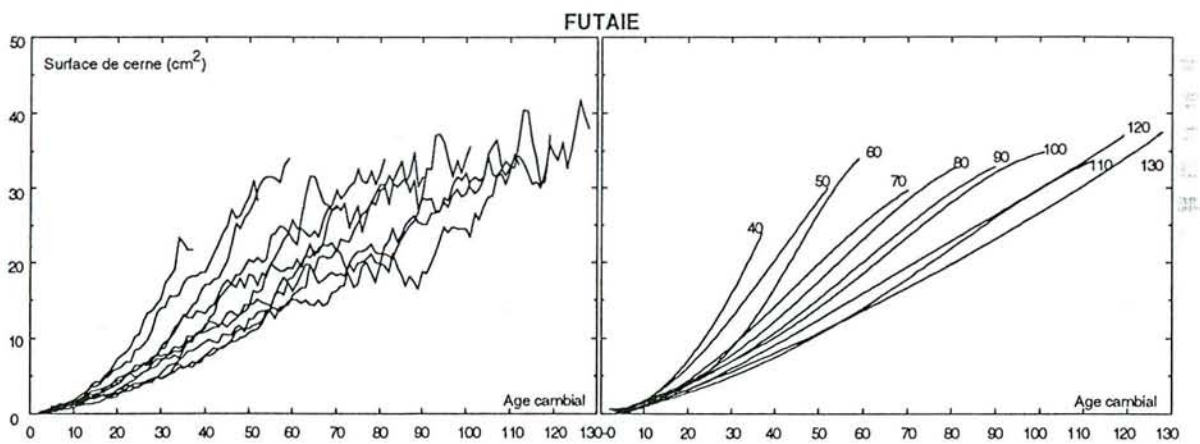



**Figure 61** : Courbes âges calculées à partir d'arbres de futaie provenant de dix classes d'âge actuel (à gauche) et courbes lissées (à droite).

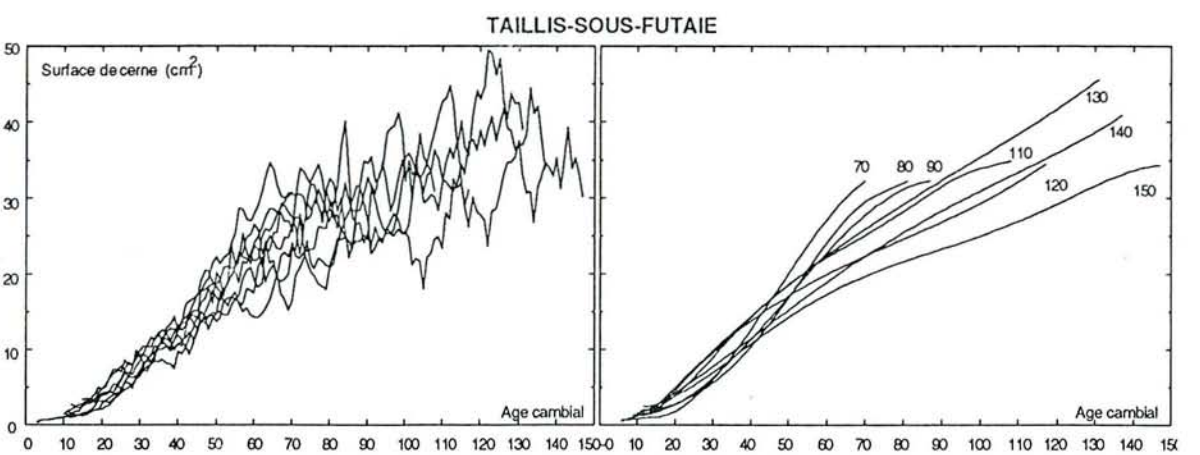



**Figure 62** : Courbes âges calculées à partir d'arbres de taillis-sous-futaie provenant de dix classes d'âge actuel (à gauche) et courbes lissées (à droite).

## III - RECHERCHE D'UNE TENDANCE A LONG TERME DANS LA CROISSANCE RADIALE PAR ANALYSE DE VARIANCE

L'ensemble des surfaces de cernes disponibles, pour chaque traitement sylvicole, forme un tableau à deux entrées où les âges cambiaux sont disposés en colonnes et les années calendaires en lignes. Une telle matrice peut être traitée par une analyse de variance classique de façon à extraire un effet de l'âge, un effet de la date et l'interaction pouvant exister entre l'âge et la date. L'analyse de variance peut donc être présentée comme une nouvelle méthode de standardisation pour examiner les variations à basse fréquence contenues dans les séries chronologiques.

### 1 - Principe et premières analyses

Cette méthode a été développée par Dupouey *et al.* (1992) pour étudier les largeurs de 150 000 cernes provenant de la sapinière vosgienne. Le modèle utilisé alors était le suivant :

$$R_{ijk} = M + C_i + A_j + u.B_i.D_j + F_{ij} + E_{ijk}$$

où :
$R_{ijk}$ est la surface de cerne observée à l'âge cambial j, à la date i et pour l'arbre k ;
M est une constante ;
$C_i$ représente l'effet date ;
$A_j$ représente l'effet âge
$u.B_i.D_j$ est l'interaction multiplicative entre l'âge et la date ;
$F_{ij}$ est l'interaction non multiplicative ;
$E_{ijk}$ représente l'erreur.

Ces auteurs ont observé que la plus grosse partie de la variance était incluse dans l'effet âge et l'effet date, et que l'interaction multiplicative entre l'âge et la date était également significative, bien que la part de variance associée à ce terme soit très inférieure à celle associée aux deux termes précédents.

Ce modèle a été simplifié et appliqué à nos données brutes. Les surfaces de cernes sont considérées comme résultant de la somme de deux effets fixes ; un effet âge et un effet date. Les paramètres sont calculés par la procédure GLM (General Linear Model) de S.A.S. (1988) qui permet de maîtriser partiellement les problèmes liés au manque de données pour certaines combinaisons d'âges et de dates. Les résultats sont assez proches de ceux obtenus par l'application d'une standardisation calculée sur une base régionale : les courbes âges et l'évolution à long terme de la croissance radiale sont semblables. Cette analyse n'est cependant pas satisfaisante, pour plusieurs raisons.

Il est tout d'abord impossible d'ajouter dans le modèle un terme interactif car les combinaisons entre âges cambiaux et années calendaires sont trop nombreuses et toutes les interactions ne peuvent être calculées. Cette contrainte informatique aurait pu être résolue, mais d'autres sources d'erreurs rendent ce modèle caduc. Les matrices de données brutes ne sont pas des matrices rectangulaires, mais triangulaires : les cernes âgés, élaborés à des dates anciennes, ne sont pas disponibles (*cf.* fig. 19). Pour la futaie, nous disposons de données pour les âges cambiaux de 2 à 165 ans et pour les dates, de 1832 à 1991. Ceci représente une matrice de 26 240 cellules, or seulement 11 247 d'entre elles sont effectivement représentées par des données (soit à peu près 43%). Pour le taillis-sous-futaie, les âges sont représentés de 2 à 196 ans et les années de 1803 à 1991, soit une matrice de 36 855 combinaisons âge/date dont 14 598 contiennent de l'information (39%). Le plan d'échantillonnage est donc incomplet et déséquilibré.

L'analyse de variance n'est possible que si un nombre de cernes suffisant est disponible pour chaque combinaison âge/date. Il est alors préférable d'éliminer les combinaisons où les cernes sont trop peu nombreux (1,2 ou 3 cernes). Bien que nous disposions de 50 509 cernes de futaie et de 40 876 cernes de taillis-sous-futaie, l'effectif moyen des cernes pour chaque combinaison âge/date est de 4,5 dans le cas de la futaie et 2,8 dans le cas du taillis-sous-futaie. Dans notre échantillon de futaie, les combinaisons âge/date

représentées par 1, 2 ou 3 cernes correspondent respectivement à 19,3%, 14,5% et 7,97% du nombre total des combinaisons possibles. En taillis-sous-futaie ces proportions sont de 32,46%, 22,82% et 17,57%. La suppression des combinaisons où le nombre de cernes est insuffisant correspond donc à une grosse perte d'information, surtout dans le cas du taillis-sous-futaie.

Les programmes d'analyse de variance peuvent compenser en partie les problèmes occasionnés par la non uniformité des effectifs dans un tableau (c'est le cas de la procédure GLM de S.A.S (1988)). Cependant, cette possibilité reste limitée et de telles procédures ne sont pas appropriées à notre échantillon car les données manquantes sont trop nombreuses. Pour utiliser efficacement l'analyse de variance, il était alors préférable d'adopter une autre stratégie d'analyse : le regroupement des valeurs en classes avant les calculs.

## 2 - Analyse de variance en utilisant des classes d'âges et de dates

### 2.1 - Méthode

#### 2.1.1 - Divisions en classes

Puisque l'analyse de variance requiert idéalement un tableau de données où, pour chaque combinaison âge/date, un grand nombre d'observations doit être disponible et sensiblement constant d'une case à l'autre, nous avons tenté d'obtenir des tableaux homogènes en effectuant des divisions en classes.

Les premières divisions ont été réalisées en utilisant des pas de temps constants, par exemple tous les 10 ans, 20 ans, etc. Cette méthode de division n'est pas satisfaisante car les effectifs sont très fortement déséquilibrés entre les différentes classes.

Les divisions sont alors effectuées de façon automatique afin d'obtenir des classes à effectifs constants mais à pas de temps variable. Le nombre de classes choisi *a priori* ne doit pas être trop élevé : une division régulière serait alors impossible ; certaines classes seraient très sous-représentées. La division la plus adéquate a consisté à créer quatre classes d'âges et quatre classes de dates pour chacun de nos sous-échantillons. Cette division permet d'étudier toutes les dates et tous les âges cambiaux disponibles, avec, dans chaque classe, un effectif à peu près constant de cernes.

Malgré ces précautions, les classes extrêmes (jeunes âges cambiaux pour les dates récentes et vieux âges cambiaux pour les dates anciennes), sont déséquilibrées par rapport aux autres classes. Pour tester la variabilité des résultats, d'autres divisions sont réalisées en n'utilisant qu'une partie de notre échantillon de façon à travailler sur une matrice initiale carrée. Dans ce cas particulier, la division retenue est une division en deux fois cinq classes d'une matrice contenant les cernes âgés de 2 à 90 ans et élaborés entre 1900 et 1991.

Dans les deux cas, les cernes de moins de 30 ans sont conservés ou non. Quatre analyses de variance sont donc présentées ici, pour chaque traitement sylvicole. Par commodité, nous utiliserons dans la suite de l'exposé la nomenclature suivante :

- ANOVA n°1 : toutes les dates et tous les âges cambiaux sont conservés ;
- ANOVA n°2 : toutes les dates sont conservées et les cernes de moins de 30 ans sont supprimés ;
- ANOVA n°3 : la période 1900 - 1991 seulement est analysée avec les âges inférieurs à 90 ans ;
- ANOVA n°4 : la période 1900 - 1991 est analysée avec les cernes compris entre 30 et 90 ans.

Les résultats des divisions en classe sont synthétisés dans le tableau 11.

## FUTAIE

### ANOVA 1

| Date | [2,25] | [26,47] | [48,74] | [75,165] | |
|---|---|---|---|---|---|
| [1832,1922] | 6529<br>12,93% | 4469<br>8,85% | 1479<br>2,93% | 184<br>0,36% | **12661**<br>**25,07%** |
| [1923,1944] | 3430<br>6,79% | 3426<br>6,78% | 4434<br>8,78% | 1479<br>2,93% | **12769**<br>**25,28%** |
| [1950,1971] | 1950<br>3,86% | 2859<br>5,66% | 3426<br>6,78% | 4483<br>8,88% | **12718**<br>**25,18%** |
| [1972,1991] | 911<br>1,80% | 1764<br>3,49% | 3167<br>6,27% | 6519<br>12,91% | **12361**<br>**24,47%** |
| | **12820**<br>**25,38%** | **12518**<br>**24,78%** | **12506**<br>**24,76%** | **12665**<br>**25,07%** | **50509**<br>**100%** |

Age

### ANOVA 2

| Date | [31,45] | [46,63] | [64,85] | [86,165] | |
|---|---|---|---|---|---|
| [1857,1936] | 4202<br>12,09% | 3145<br>9,05% | 1204<br>3,47% | 251<br>0,72% | **8802**<br>**25,33%** |
| [1937,1958] | 1870<br>5,38% | 2410<br>6,94% | 2950<br>8,49% | 1204<br>3,47% | **8434**<br>**24,27%** |
| [1959,1976] | 1561<br>4,49% | 1896<br>5,46% | 2410<br>6,94% | 3145<br>9,05% | **9012**<br>**25,94%** |
| [1977,1991] | 861<br>2,48% | 1561<br>4,49% | 1870<br>5,38% | 4207<br>12,11% | **8499**<br>**24,46%** |
| | **8494**<br>**24,45%** | **9012**<br>**25,94%** | **8434**<br>**24,27%** | **8807**<br>**25,35%** | **34747**<br>**100%** |

Age

### ANOVA 4

| Date | [2,22] | [23,37] | [38,52] | [53,69] | [70,90] | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| [1900,1923] | 2315<br>6,12% | 2516<br>6,65% | 1721<br>4,55% | 784<br>2,07% | 310<br>0,82% | **7646**<br>**20,20%** |
| [1924,1940] | 1878<br>4,96% | 1374<br>3,63% | 1773<br>4,68% | 1688<br>4,46% | 735<br>1,94% | **7448**<br>**19,68%** |
| [1941,1955] | 1560<br>4,12% | 1318<br>3,48% | 1206<br>3,19% | 1773<br>4,68% | 1601<br>4,23% | **7458**<br>**19,71%** |
| [1956,1971] | 1033<br>2,73% | 1379<br>3,64% | 1400<br>3,70% | 1471<br>3,89% | 2424<br>6,41% | **7707**<br>**20,36%** |
| [1972,1991] | 757<br>2,00% | 925<br>2,44% | 1606<br>4,24% | 1996<br>5,27% | 2302<br>6,08% | **7586**<br>**20,04%** |
| | **7543**<br>**19,93%** | **7512**<br>**19,85%** | **7706**<br>**20,36%** | **7712**<br>**20,38%** | **7372**<br>**19,48%** | **37845**<br>**100%** |

Age

| Date | [31,43] | [44,56] | [57,71] | [72,90] | |
|---|---|---|---|---|---|
| [1900,1933] | 2797<br>10,61% | 2167<br>8,22% | 1163<br>4,41% | 541<br>2,05% | **6668**<br>**25,29%** |
| [1934,1953] | 1438<br>5,45% | 1510<br>5,73% | 2202<br>8,35% | 1440<br>5,46% | **6590**<br>**24,99%** |
| [1954,1970] | 1296<br>4,92% | 1298<br>4,92% | 1365<br>5,18% | 2381<br>9,03% | **6340**<br>**24,05%** |
| [1971,1991] | 1152<br>4,37% | 1575<br>5,97% | 1834<br>6,96% | 2208<br>8,37% | **6769**<br>**25,67%** |
| | **6683**<br>**25,35%** | **6550**<br>**24,84%** | **6564**<br>**24,89%** | **6570**<br>**24,92%** | **26367**<br>**100%** |

Age

## TAILLIS-SOUS-FUTAIE

### ANOVA 1

| Date | [2,32] | [33,59] | [60,91] | [92,196] | |
|---|---|---|---|---|---|
| [1803,1907] | 5250<br>12,84% | 3627<br>8,87% | 1286<br>3,15% | 144<br>0,35% | **10307**<br>**25,22%** |
| [1908,1938] | 3266<br>7,99% | 2346<br>5,74% | 3167<br>7,75% | 1202<br>2,94% | **9981**<br>**24,42%** |
| [1939,1965] | 1556<br>3,81% | 2887<br>7,06% | 2440<br>5,97% | 3539<br>8,66% | **10422**<br>**25,50%** |
| [1966,1991] | 148<br>0,36% | 1525<br>3,73% | 3064<br>7,50% | 5429<br>13,28% | **10166**<br>**24,87%** |
| | **10220**<br>**25,00%** | **10385**<br>**25,41%** | **9957**<br>**24,36%** | **10314**<br>**25,23%** | **40876**<br>**100%** |

Age

### ANOVA 2

| Date | [31,50] | [51,72] | [73,102] | [103,196] | |
|---|---|---|---|---|---|
| [1826,1919] | 3821<br>12,16% | 2689<br>8,55% | 1186<br>3,77% | 160<br>0,51% | **7856**<br>**24,99%** |
| [1920,1949] | 1750<br>5,57% | 1973<br>6,28% | 2890<br>9,19% | 1186<br>3,77% | **7799**<br>**24,81%** |
| [1950,1971] | 1752<br>5,57% | 1591<br>5,06% | 1973<br>6,28% | 2689<br>8,55% | **8005**<br>**25,47%** |
| [1972,1991] | 437<br>1,39% | 1752<br>5,57% | 1750<br>5,57% | 3833<br>12,19% | **7772**<br>**24,73%** |
| | **7760**<br>**24,69%** | **8005**<br>**25,47%** | **7799**<br>**24,81%** | **7868**<br>**25,03%** | **31432**<br>**100%** |

Age

### ANOVA 4

| Date | [2,27] | [28,45] | [46,59] | [60,73] | [74,90] | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| [1900,1917] | 1038<br>4,74% | 1015<br>4,64% | 957<br>4,37% | 801<br>3,66% | 449<br>2,05% | **4260**<br>**19,46%** |
| [1918,1932] | 1564<br>7,14% | 534<br>2,44% | 645<br>2,95% | 801<br>3,66% | 839<br>3,83% | **4383**<br>**20,02%** |
| [1933,1948] | 1205<br>5,50% | 1234<br>5,64% | 426<br>1,95% | 670<br>3,06% | 1024<br>4,68% | **4559**<br>**20,82%** |
| [1949,1966] | 441<br>2,01% | 1257<br>5,74% | 1131<br>5,17% | 508<br>2,32% | 886<br>4,05% | **4223**<br>**19,29%** |
| [1967,1991] | 66<br>0,30% | 455<br>2,08% | 1034<br>4,72% | 1621<br>7,40% | 1294<br>5,91% | **4470**<br>**20,42%** |
| | **4314**<br>**19,70%** | **4495**<br>**20,53%** | **4193**<br>**19,15%** | **4401**<br>**20,10%** | **4492**<br>**20,52%** | **21895**<br>**100%** |

Age

### ANOVA 4

| Date | [31,46] | [47,60] | [61,74] | [75,90] | |
|---|---|---|---|---|---|
| [1900,1923] | 4202<br>12,09% | 3145<br>9,05% | 1204<br>3,47% | 251<br>0,72% | **8802**<br>**25,33%** |
| [1924,1946] | 1870<br>5,38% | 2410<br>6,94% | 2950<br>8,49% | 1204<br>3,47% | **8434**<br>**24,27%** |
| [1947,1967] | 1561<br>4,49% | 1896<br>5,46% | 2410<br>6,94% | 3145<br>9,05% | **9012**<br>**25,94%** |
| [1968,1991] | 861<br>2,48% | 1561<br>4,49% | 1870<br>5,38% | 4207<br>12,11% | **8499**<br>**24,46%** |
| | **8494**<br>**24,45%** | **9012**<br>**25,94%** | **8434**<br>**24,27%** | **8807**<br>**25,35%** | **34747**<br>**100%** |

Age

**Tableau 11** : Structure des données utilisées pour l'analyse de variance des surfaces de cernes annuels. Pour les deux types de traitements sylvicoles, le tableau indique le nombre et le pourcentage de cernes analysés. Les classes correspondantes d'âge cambial et d'années calendaires sont indiquées, respectivement, pour chaque colonne et chaque ligne.

### 2.1.2 - Analyses

Le modèle linéaire suivant est utilisé pour analyser les surfaces de cernes :

$$Surface_{tad} = A_a + D_d + A_a*D_d + E_{tad}$$

où :
$Surface_{tad}$ est la surface de cerne observée (de l'arbre t) appartenant à la classe d'âge a et à la classe de date d ;
$A_a$ est l'effet de la classe d'âge a ;
$D_d$ est l'effet de la classe de date d ;
$A_a*D_d$ est l'interaction entre la classe d'âge a et la classe de date d ;
$E_{tad}$ exprime la variance résiduelle non explicable par le modèle.

Pour chaque classe de date d et chaque classe d'âge cambial a, la surface des cernes est considérée comme la somme d'un effet de la classe d'âge a, d'un effet de la classe de date d, d'une interaction entre les effets de la classe d'âge a et de la classe de date d et d'une erreur. Les effets âge et date sont considérés comme fixes. Les paramètres sont estimés par la procédure GLM de SAS (1988).

Pour chaque effet, et leurs interactions, des moyennes corrigées sont calculées pour chaque classe à l'aide des paramètres du modèle (moyennes des moindres carrés). Un test t corrigé (test de Bonferroni) est utilisé pour tester les différences entre les moyennes calculées pour chaque classe.

## 2.2 - Résultats

### 2.2.1 - Tableaux d'analyse de variance

Le modèle choisi s'est révélé hautement significatif pour chacune des gestions sylvicoles, dans toutes les analyses, et quelles que soient les gammes d'âge et de date étudiées (tableau 13). Les différences entre les résultats provenant de l'analyse d'une matrice initiale triangulaire (ANOVA n°1 et n°2) et les résultats provenant de l'analyse d'une matrice initiale carrée (ANOVA n°3 et n°4) sont faibles. D'un autre point de vue, la part de variance totale expliquée par notre modèle est un peu plus forte pour les analyses n°1 et n°2 que pour les analyses n°3 et n°4. De plus, la part de variance expliquée est toujours plus forte en futaie qu'en taillis-sous-futaie.

La préparation d'une matrice de données brutes plus équilibrée nous a donc fait perdre de l'information, d'une part en nous privant d'un grand nombre de cernes et d'autre part en rendant notre modèle moins explicatif. Cette division nous permet cependant de voir que la division de nos échantillons initiaux en seize classes n'apporte pas de résultats aberrants.

Les effets âge et date intègrent la plus grosse partie de la variance. Dans le cas du taillis-sous-futaie, l'effet âge est toujours le plus fort, quelles que soient les gammes d'âge et de date étudiées. Dans le cas de la futaie, l'effet âge explique la plus grosse partie de la variance si les cernes de moins de 30 ans font partie de l'analyse. Si ces cernes ne sont pas pris en compte, l'effet date est le plus fort. Dans toutes les analyses, et pour les deux gestions sylvicoles, la part de variance expliquée par le terme interaction est minime, mais encore assez forte pour être significative et donc interprétée : l'effet date n'est pas identique sur toutes les classes d'âges.

ANOVA 1

**Futaie**

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Modèle | 15 | 350577,930 | 3189,30 | 0.0001 |
| Erreur | 50493 | 109,923 | | |
| | | | R carré = 48,65% | |

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Effet âge | 3 | 393532,928 | 3580,07 | 0.0001 |
| Effet date | 3 | 185838,731 | 1686,98 | 0.0001 |
| Interaction | 9 | 6925,602 | 63,00 | 0.0001 |

**Taillis-sous-futaie**

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Modèle | 15 | 334059,257 | 1773,01 | 0.0001 |
| Erreur | 40860 | 188,414 | | |
| | | | R carré = 39,43% | |

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Effet âge | 3 | 253051,939 | 1343,06 | 0.0001 |
| Effet date | 3 | 54960,996 | 291,70 | 0.0001 |
| Interaction | 9 | 7348,616 | 39,00 | 0.0001 |

ANOVA 2

**Futaie**

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Modèle | 15 | 151131,030 | 1004,31 | 0.0001 |
| Erreur | 34731 | 150,483 | | |
| | | | R carré = 30,26% | |

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Effet âge | 3 | 122687,190 | 815,29 | 0.0001 |
| Effet date | 3 | 192937,404 | 1282,12 | 0.0001 |
| Interaction | 9 | 1680,410 | 11,17 | 0.0001 |

**Taillis-sous-futaie**

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Modèle | 15 | 136042,413 | 573,74 | 0.0001 |
| Erreur | 31416 | 237,115 | | |
| | | | R carré = 21,50% | |

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Effet âge | 3 | 158221,602 | 667,28 | 0.0001 |
| Effet date | 3 | 95214,179 | 401,55 | 0.0001 |
| Interaction | 9 | 6456,122 | 27,23 | 0.0001 |

ANOVA 3

**Futaie**

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Modèle | 24 | 113729,440 | 1254,46 | 0.0001 |
| Erreur | 37820 | 90,660 | | |
| | | | R carré = 44,32% | |

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Effet âge | 4 | 305859,640 | 3373,56 | 0.0001 |
| Effet date | 4 | 113574,580 | 1252,70 | 0.0001 |
| Interaction | 16 | 2904,630 | 32,04 | 0.0001 |

**Taillis-sous-futaie**

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Modèle | 24 | 83439,510 | 503,50 | 0.0001 |
| Erreur | 21870 | 165,720 | | |
| | | | R carré = 35,59% | |

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Effet âge | 4 | 178168,693 | 1075,12 | 0.0001 |
| Effet date | 4 | 20851,775 | 125,83 | 0.0001 |
| Interaction | 16 | 2019,928 | 12,19 | 0.0001 |

ANOVA 4

**Futaie**

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Modèle | 15 | 77926,010 | 646,91 | 0.0001 |
| Erreur | 26351 | 120,460 | | |
| | | | R carré = 26,91% | |

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Effet âge | 3 | 108185,974 | 898,12 | 0.0001 |
| Effet date | 3 | 162261,239 | 1347,03 | 0.0001 |
| Interaction | 9 | 1105,465 | 9,18 | 0.0001 |

**Taillis-sous-futaie**

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Modèle | 15 | 50208,451 | 240,79 | 0.0001 |
| Erreur | 16894 | 208,517 | | |
| | | | R carré = 17,61% | |

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Effet âge | 3 | 108823,342 | 521,89 | 0.0001 |
| Effet date | 3 | 62491,207 | 299,69 | 0.0001 |
| Interaction | 9 | 3233,980 | 15,51 | 0.0001 |

**Tableau 12** : Résultats des quatre analyses de variance des effets de l'âge cambial, de la date et de leur interaction sur les surfaces de cernes annuels.

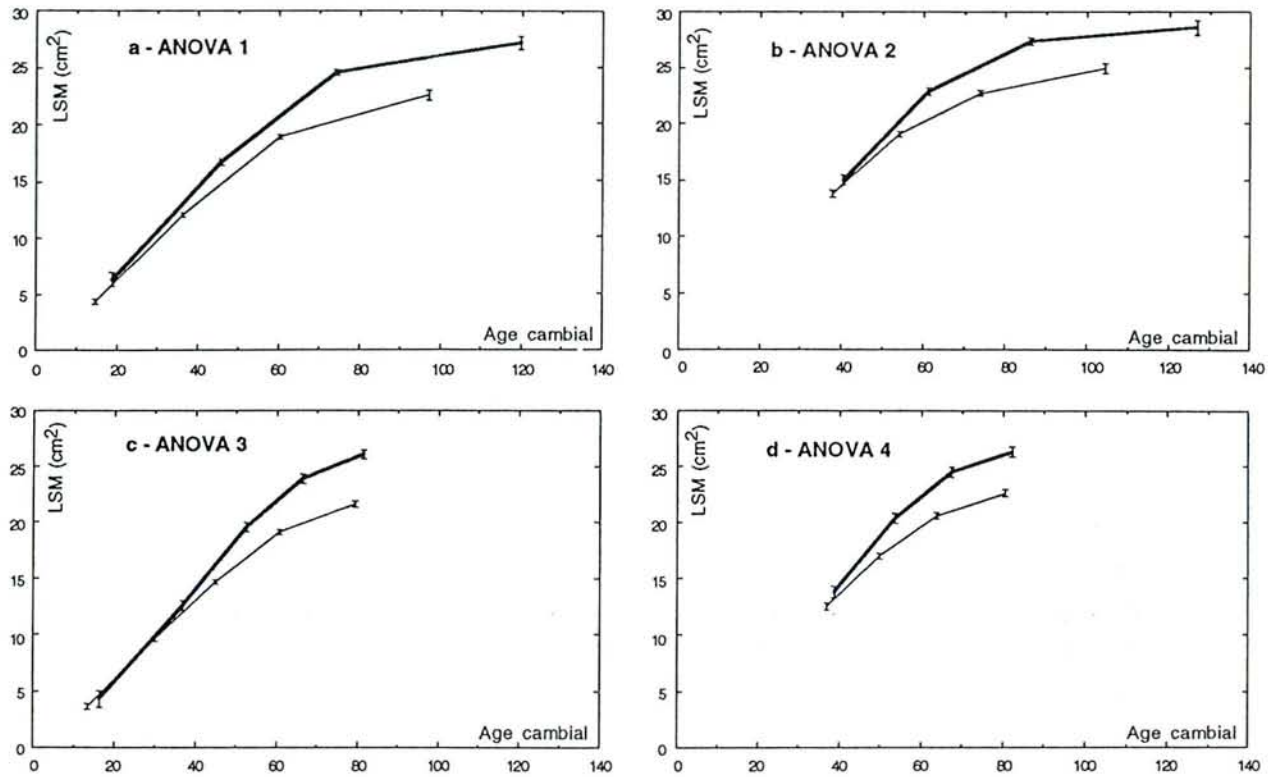



**Figure 63 : Effet âge.** Moyennes des moindres carrés des surfaces annuelles de cernes pour l'effet de l'âge cambial calculé à partir des quatre analyses de variance, pour les arbres de futaie (traits fins) et de taillis-sous-futaie (traits gras). Les intervalles de confiance au seuil de 95% sont indiqués.

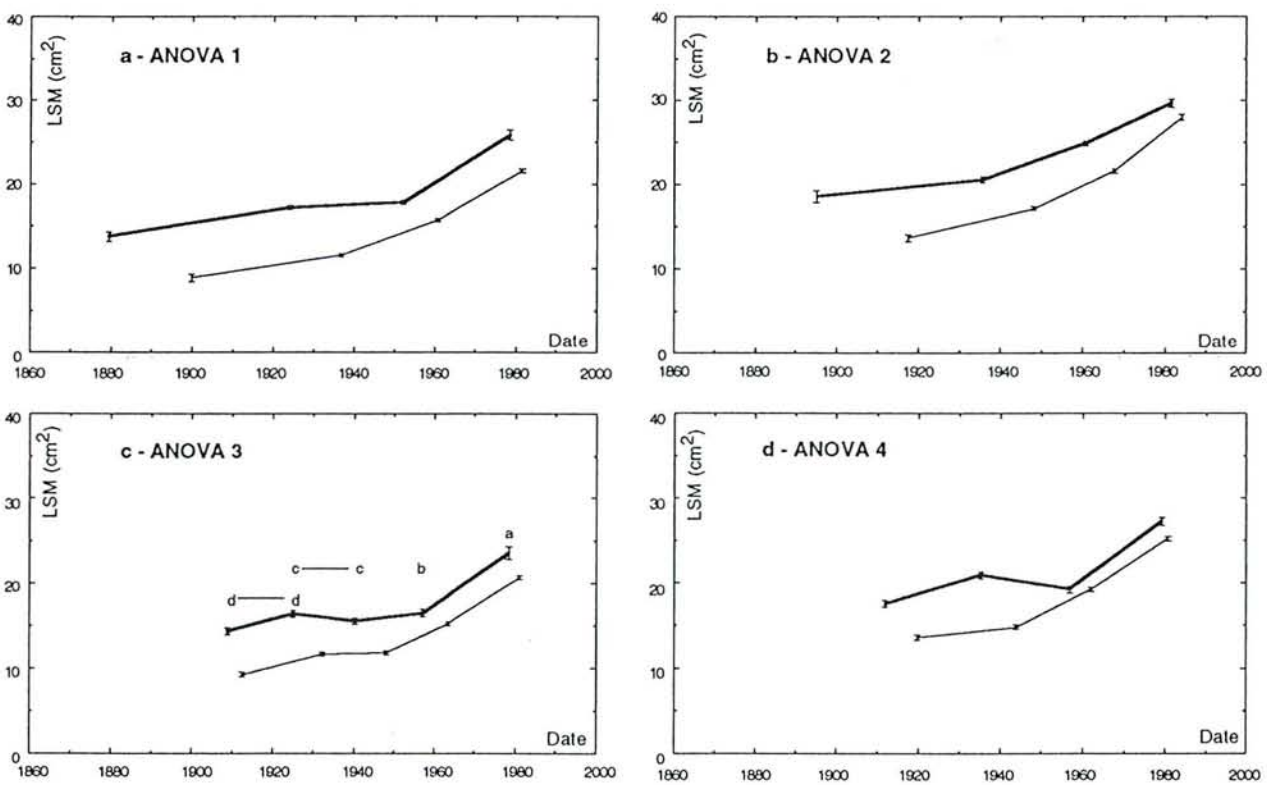



**Figure 64 : Effet date.** Moyennes des moindres carrés des surfaces annuelles de cernes pour l'effet de la date calculé à partir des quatre analyses de variance, pour les arbres de futaie (traits fins) et de taillis-sous-futaie (traits gras). Les intervalles de confiance au seuil de 95% sont indiqués. Sur le graphe "c", les moyennes relatives au taillis-sous-futaie ne sont pas significativement différentes si elles sont indicées par une même lettre.

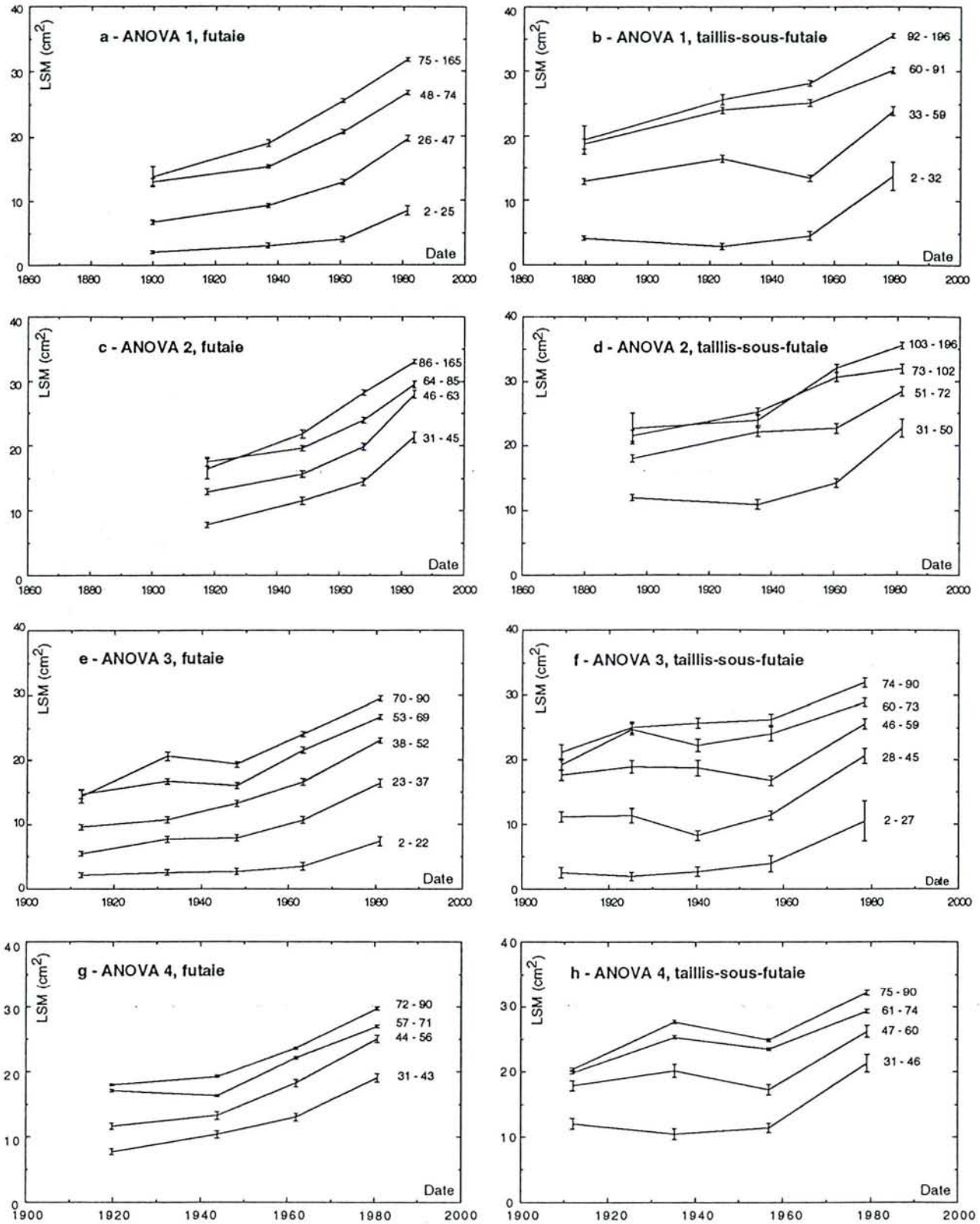



**Figure 65 : Interaction entre l'âge et la date.** Moyennes des moindres carrés des surfaces annuelles de cernes pour toutes les combinaisons d'âge cambial et d'années calendaires ; pour les arbres de futaie et de taillis-sous-futaie et pour les quatre analyses de variance. Les intervalles de confiance au seuil de 95% sont indiqués ainsi que les classes d'âge cambial.

### 2.2.2 - L'effet âge

Les moyennes corrigées relatives à l'effet âge et leurs intervalles de confiance à 95% sont reportés sur les figures 63a à 63d. On constate que, pour chacun des deux types de traitement sylvicole, les moyennes correspondant à l'effet âge suivent la même évolution que la croissance radiale moyenne régionale en fonction de l'âge cambial vu précédemment. Ces courbes ne sont cependant pas strictement identiques aux courbes âge régionales : l'effet date contenu dans les courbes âges est retiré.

Les points moyens de chacune des courbes âge sont significativement différents les uns des autres, pour une même sylviculture, conformément à un test de Bonferroni.

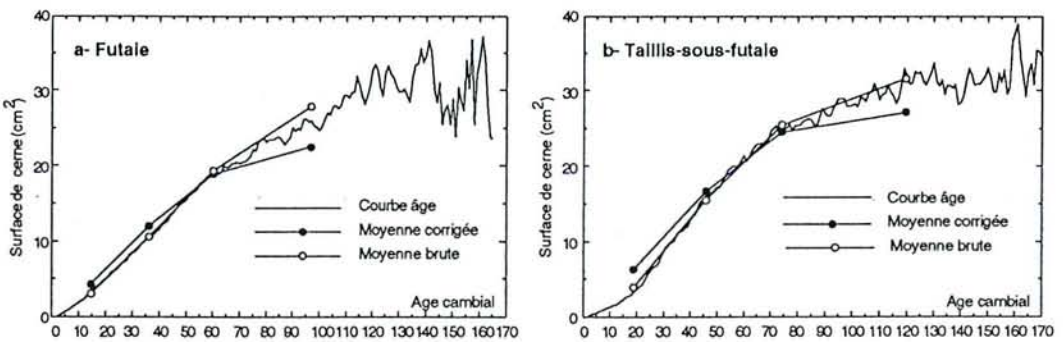



**Figure 66** : Comparaison entre les courbes âge calculées dans le chapitre précédent et les moyennes brutes et corrigées des surfaces de cernes calculées pour chaque classe d'âge dans l'analyse de variance n°1.

### 2.2.3 - L'effet date

Les moyennes des moindres carrés relatives à l'effet date, et leurs intervalles de confiance à 95%, sont représentées sur les figures 64a à 64d. La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus par standardisation selon une courbe âge régionale, permet de faire plusieurs remarques.

Les variations à haute et moyenne fréquence ont ici disparu car des classes de dates sont utilisées à la place d'années individuelles. Sans ces variations, les tendances à long terme de la croissance radiale apparaissent plus clairement pour chaque système sylvicole.

La tendance observée en futaie est toujours plus forte et plus régulière que celle du taillis-sous-futaie, et les deux tendances s'accentuent tout au long de la période étudiée. Pour les ANOVA n°1 et n°3, on retrouve, suivant la position des bornes des classes, que les années 1950 ont été une charnière dans l'évolution des tendances à long terme, surtout pour les arbres de taillis-sous-futaie.

Comme dans le cas de l'effet âge, les moyennes constituant chaque courbe sont significativement différentes selon le test t de Bonferroni, sauf dans le cas de ANOVA n°3, où, pour le taillis-sous-futaie, les moyennes des trois premières classes de dates ne sont pas significativement différentes.

Pour chaque analyse et chaque traitement sylvicole, il est possible de calculer un taux de croissance relatif ainsi que l'erreur standard de ce taux, entre la première et la dernière classe de date prise en compte sur la période étudiée. Ces valeurs sont reportées dans le tableau 13.

Pour les analyses n°1 et n°2, la période de temps prise en compte pour les deux traitements sylvicoles est différente ; pourtant, on constate que la tendance à long terme observable en futaie est plus forte qu'en taillis-sous-futaie. Pour les analyses n°3 et n°4, les mêmes âges et les mêmes dates sont pris en compte et, dans ce cas, la tendance observable en futaie est toujours plus forte que celle du taillis-sous-futaie.

| | Futaie | | Taillis-sous-Futaie | |
|---|---|---|---|---|
| | Taux | Période | Taux | Période |
| ANOVA 1 | 144% | entre 1832 et 1991 | 88% | entre 1803 et 1991 |
| ANOVA 2 | 105% | entre 1857 et 1991 | 59% | entre 1826 et 1991 |
| ANOVA 3 | 123% | entre 1900 et 1991 | 64% | entre 1900 et 1991 |
| ANOVA 4 | 85% | entre 1900 et 1991 | 55% | entre 1900 et 1991 |

**Tableau 13** : Valeur de la tendance à long terme pour l'effet date en fonction des différentes analyses de variance et en fonction des gestions sylvicoles.

| | Source de variation | % Carrés moyens futaie | % Carrés moyens TSF |
|---|---|---|---|
| ANOVA 1 | Effet âge | 67,122 | 80,242 |
| | Effet date | 31,697 | 17,428 |
| | Interaction | 1,181 | 2,330 |
| ANOVA 2 | Effet âge | 38,665 | 60,880 |
| | Effet date | 60,805 | 36,636 |
| | Interaction | 0,530 | 2,484 |
| ANOVA 3 | Effet âge | 72,420 | 88,623 |
| | Effet date | 26,892 | 10,372 |
| | Interaction | 0,688 | 1,005 |
| ANOVA 4 | Effet âge | 39,840 | 62,346 |
| | Effet date | 59,753 | 35,802 |
| | Interaction | 0,407 | 1,853 |

**Tableau 14** : Comparaison des carrés moyens exprimés en % des différents effets dans chacune des analyses de variance.

| | Futaie | | | Taillis-sous-futaie | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | classe d'âge | différence ($cm^2$) | accroissement relatif (%) | classe d'âge | différence ($cm^2$) | accroissement relatif (%) |
| ANOVA 1 | [2,25] | 6,359 | 312 ± 40 | [2,32] | 9,6911 | 234 ± 41 |
| | [26,47] | 12,84 | 191 ± 10 | [33,59] | 10,9795 | 85 ± 6 |
| | [48,74] | 13,741 | 106 ± 6 | [60,91] | 11,4535 | 61 ± 5 |
| | [75,165] | 18,062 | 131 ± 13 | [92,196] | 16,187 | 84 ± 11 |
| ANOVA 2 | [31,45] | 13,556 | 174 ± 12 | [31,50] | 10,7252 | 89 ± 10 |
| | [46,63] | 15,088 | 117 ± 6 | [51,72] | 10,3511 | 57 ± 5 |
| | [64,85] | 12,029 | 69 ± 5 | [73,102] | 10,3311 | 48 ± 5 |
| | [86,165] | 16,612 | 101 ± 10 | [103,196] | 12,7848 | 56 ± 9 |
| ANOVA 3 | [2,22] | 5,293 | 249 ± 45 | [2,27] | 7,96879 | 313 ± 110 |
| | [23,37] | 10,929 | 200 ± 16 | [28,45] | 9,4517 | 85 ± 12 |
| | [38,52] | 13,446 | 140 ± 8 | [46,59] | 7,9584 | 45 ± 6 |
| | [53,69] | 12,03 | 82 ± 6 | [60,73] | 9,6927 | 50 ± 5 |
| | [70,90] | 15,178 | 106 ± 9 | [74,90] | 10,7801 | 51 ± 6 |
| ANOVA 4 | [31,43] | 11,313 | 146 ± 11 | [31,46] | 9,2195 | 76 ± 11 |
| | [44,56] | 13,371 | 115 ± 7 | [47,60] | 8,3068 | 46 ± 6 |
| | [57,71] | 9,889 | 58 ± 4 | [61,74] | 9,4195 | 47 ± 5 |
| | [72,90] | 11,802 | 66 ± 6 | [75,90] | 11,7549 | 58 ± 6 |

**Tableau 15** : Pour chaque analyse de variance, chaque traitement sylvicole et chaque classe d'âge, la différence entre les surfaces moyennes des classes de dates extrêmes est calculée (Différence = Surface moyenne "actuelle" - Surface moyenne "la plus ancienne"). Un taux d'accroissement relatif, ainsi que l'erreur standard de cet accroissement, sont également calculés (Taux d'accroissement = 100 * (Surface moyenne actuelle - Surface moyenne la plus ancienne) / Surface moyenne la plus ancienne).

Pour chaque traitement sylvicole, la tendance à long terme est plus forte si les cernes de moins de 30 ans participent à l'analyse. Ce résultat ne concorde pas tout à fait avec ceux obtenus à partir des courbes de références indicées puisque si le retrait des cernes de moins de 30 ans entraînait bien, dans le cas des arbres de futaie, une diminution de la tendance à long terme, il entraînait au contraire dans le cas des arbres de taillis-sous-futaie, une augmentation de la tendance. Avec les analyses de variance (principalement dans le cas des analyses n°1 et n°2), et pour chaque traitement sylvicole, les valeurs des taux de croissance chutent quand on retire les cernes de moins de 30 ans. Le phénomène est cependant plus accentué dans le cas des futaies. On retrouve donc un résultat connu : les cernes de moins de 30 ans ont plus de poids sur l'importance de la tendance à long terme en futaie qu'en taillis-sous-futaie.

#### 2.2.4 - L'interaction entre l'âge et la date

L'interaction entre les effets âge et date est plus forte pour le taillis-sous-futaie que pour la futaie dans toutes les analyses (tableau 14). Ceci signifie que les différences de croissance radiale au cours du temps sont plus fortes entre les différentes classes d'âges pour les arbres de taillis-sous-futaie que pour les arbres de futaie. De manière générale, les surfaces des cernes des arbres de futaie ont réagi de façon plus homogène à des modifications supposées de l'environnement que les surfaces de cernes de taillis-sous-futaie, et ceci quels que soient leurs âges.

Graphiquement, ceci se traduit par un plus grand parallélisme entre les courbes présentant l'interaction entre l'âge et la date pour les arbres de futaie (Figures 65a à 65h).

Pour chaque analyse et chaque classe d'âge, nous avons calculé un taux d'accroissement moyen et l'erreur standard sur ce taux entre la première et la dernière classe de date prise en compte. Les résultats sont présentés dans le tableau 15. Quel que soit le traitement sylvicole, l'analyse de variance ou la classe d'âge considérée, il existe une tendance à long terme positive et significative de la croissance radiale. Pour toutes les analyses, et pour les deux types de traitement sylvicole, on s'aperçoit que le taux de croissance entre les différentes dates prises en compte est plus fort pour les arbres jeunes que pour les arbres âgés. La diminution de ce taux de croissance en fonction de l'augmentation de l'âge cambial est plus régulière pour les arbres de futaie que pour les arbres de taillis-sous-futaie.

### 4. - Analyse de variance en séparant le bois initial et le bois final

Les analyses de variance n°1 et n°2 qui viennent d'être présentées ont été appliquées séparément aux surfaces de bois initial et de bois final. Le tableau 16 présente les résultats de ces analyses ; les moyennes corrigées relatives à l'effet âge, à l'effet date et à l'interaction âge/date sont reportées respectivement sur les figures 67, 68 et 69. Le tableau 17 donne les taux de croissance relatifs calculés pour les surfaces de bois initial et de bois final, et le tableau 18 présente ces taux de croissance calculés pour chaque classe d'âge prise en compte.

Comme dans le cas du cerne complet, le modèle choisi s'est révélé très significatif, tant pour l'analyse du bois initial que pour l'analyse du bois final. La plus grosse partie de la variance est expliquée par les effets âge et date. La part relative à l'effet date est, comme dans le cas du cerne complet, plus importante en futaie qu'en taillis sous futaie, pour une même analyse. Dans l'analyse n°2, l'effet date explique la plus grosse partie de la variance associée aux surfaces de bois initial des cernes de futaie. Le terme interactif est toujours significatif et les interactions sont plus importantes en taillis-sous-futaie qu'en futaie.

L'emploi des unités de surfaces, au lieu de valeurs indicées relatives, rend plus difficile la comparaison entre les tendances à long terme exprimées par le bois initial et par le bois final. Pourtant, les moyennes corrigées, relatives aux effets âge et date, s'organisent de façon identique en fonction du temps entre le bois initial et le bois final. Ces courbes sont les mêmes que celles obtenues par l'analyse du cerne complet. Les graphiques représentant les interactions sont également les mêmes que ceux présentés plus haut.

## ANOVA 1 - FUTAIE

### Bois initial

| Source de variation | Degres de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Modèle | 15 | 221707,770 | 2730,06 | 0.0001 |
| Erreur | 50493 | 81,210 | | |
| | | | R carré = 44,78% | |

| Source de variation | Degres de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Effet âge | 3 | 238934,950 | 2942,34 | 0.0001 |
| Effet date | 3 | 127016,863 | 1564,13 | 0.0001 |
| Interaction | 9 | 4737,666 | 58,34 | 0.0001 |

### Bois final

| Source de variation | Degres de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Modèle | 15 | 14806,888 | 2568,41 | 0.0001 |
| Erreur | 500493 | 5,765 | | |
| | | | R carré = 43,28% | |

| Source de variation | Degres de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Effet âge | 3 | 19200,857 | 3330,51 | 0.0001 |
| Effet date | 3 | 5550,322 | 962,74 | 0.0001 |
| Interaction | 9 | 253,012 | 43,89 | 0.0001 |

## ANOVA 1 - TAILLIS-SOUS-FUTAIE

### Bois initial

| Source de variation | Degres de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Modèle | 15 | 210967,510 | 1620,83 | 0.0001 |
| Erreur | 40860 | 130,160 | | |
| | | | R carré = 37,30% | |

| Source de variation | Degres de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Effet âge | 3 | 162301,691 | 1246,98 | 0.0001 |
| Effet date | 3 | 33522,769 | 257,56 | 0.0001 |
| Interaction | 9 | 4702,098 | 36,13 | 0.0001 |

### Bois final

| Source de variation | Degres de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Modèle | 15 | 14127,557 | 1292,31 | 0.0001 |
| Erreur | 40860 | 10,932 | | |
| | | | R carré = 32,18% | |

| Source de variation | Degres de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Effet âge | 3 | 10042,412 | 918,61 | 0.0001 |
| Effet date | 3 | 2643,913 | 241,85 | 0.0001 |
| Interaction | 9 | 336,881 | 30,82 | 0.0001 |

## ANOVA 2 - FUTAIE

### Bois initial

| Source de variation | Degres de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Modèle | 15 | 97632,930 | 871,88 | 0.0001 |
| Erreur | 34731 | 111,980 | | |
| | | | R carré = 27,35% | |

| Source de variation | Degres de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Effet âge | 3 | 72789,204 | 650,01 | 0.0001 |
| Effet date | 3 | 133840,477 | 1195,20 | 0.0001 |
| Interaction | 9 | 1480,155 | 13,22 | 0.0001 |

### Bois final

| Source de variation | Degres de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Modèle | 15 | 5961,007 | 762,04 | 0.0001 |
| Erreur | 34731 | 7,822 | | |
| | | | R carré = 24,76% | |

| Source de variation | Degres de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Effet âge | 3 | 6511,786 | 832,45 | 0.0001 |
| Effet date | 3 | 5454,515 | 697,29 | 0.0001 |
| Interaction | 9 | 91,366 | 11,68 | 0.0001 |

## ANOVA 2 - TAILLIS-SOUS-FUTAIE

### Bois initial

| Source de variation | Degres de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Modèle | 15 | 88533,040 | 538,72 | 0.0001 |
| Erreur | 31416 | 164,340 | | |
| | | | R carré = 20,46% | |

| Source de variation | Degres de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Effet âge | 3 | 99054,099 | 602,74 | 0.0001 |
| Effet date | 3 | 64964,676 | 395,31 | 0.0001 |
| Interaction | 9 | 4586,239 | 27,91 | 0.0001 |

### Bois final

| Source de variation | Degres de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Modèle | 15 | 5132,572 | 376,75 | 0.0001 |
| Erreur | 31416 | 13,623 | | |
| | | | R carré = 15,24% | |

| Source de variation | Degres de liberté | Carrés moyens | F | Pr > F |
|---|---|---|---|---|
| Effet âge | 3 | 6908,883 | 507,14 | 0.0001 |
| Effet date | 3 | 2906,473 | 213,35 | 0.0001 |
| Interaction | 9 | 174,639 | 12,82 | 0.0001 |

**Tableau 16** : Résultats de deux analyses de variance des effets de l'âge cambial, de la date et de leur interaction sur les surfaces annuelles de bois initial et de bois final .

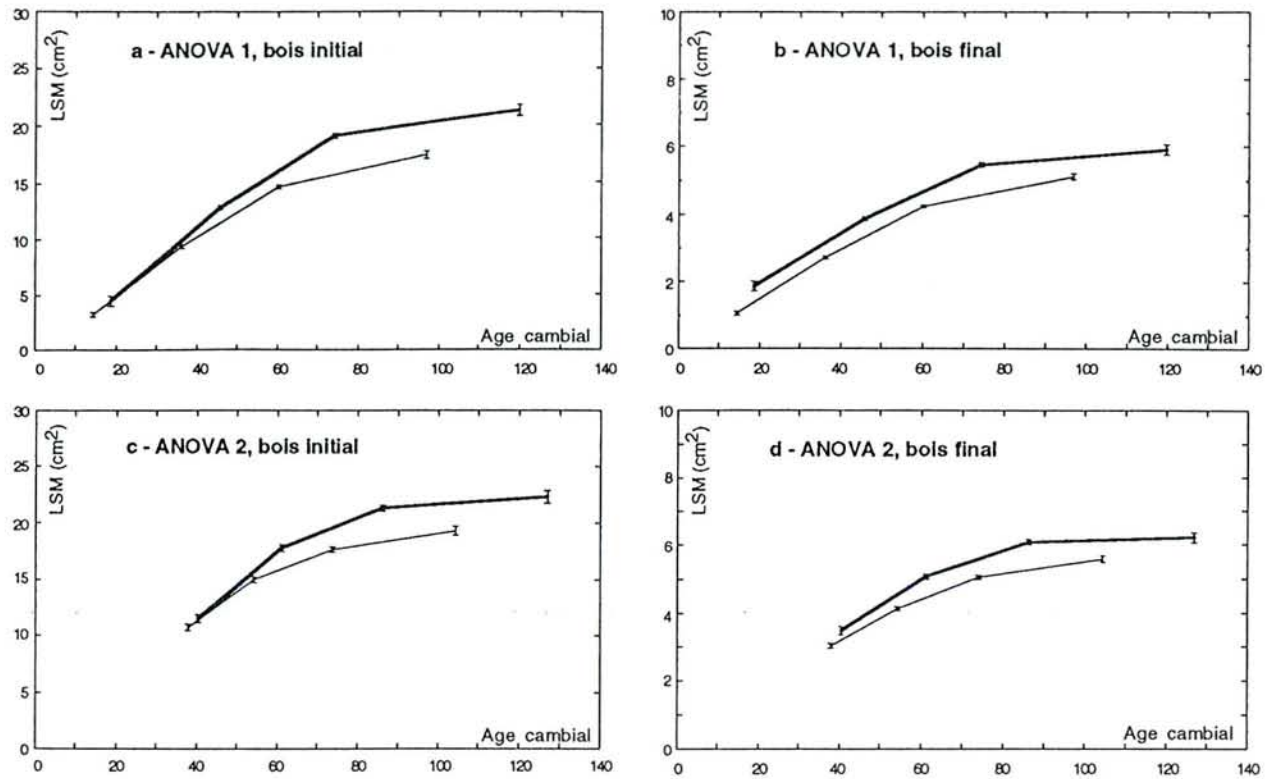



**Figure 67 : Effet âge.** Moyennes des moindres carrés des surfaces annuelles de cernes pour l'effet de l'âge cambial calculé à partir de deux analyses de variance, pour les arbres de futaie (traits fins) et de taillis-sous-futaie (traits gras) et pour les surfaces de bois inital (à gauche) et de bois final (à droite). Les intervalles de confiance au seuil de 95% sont indiqués.

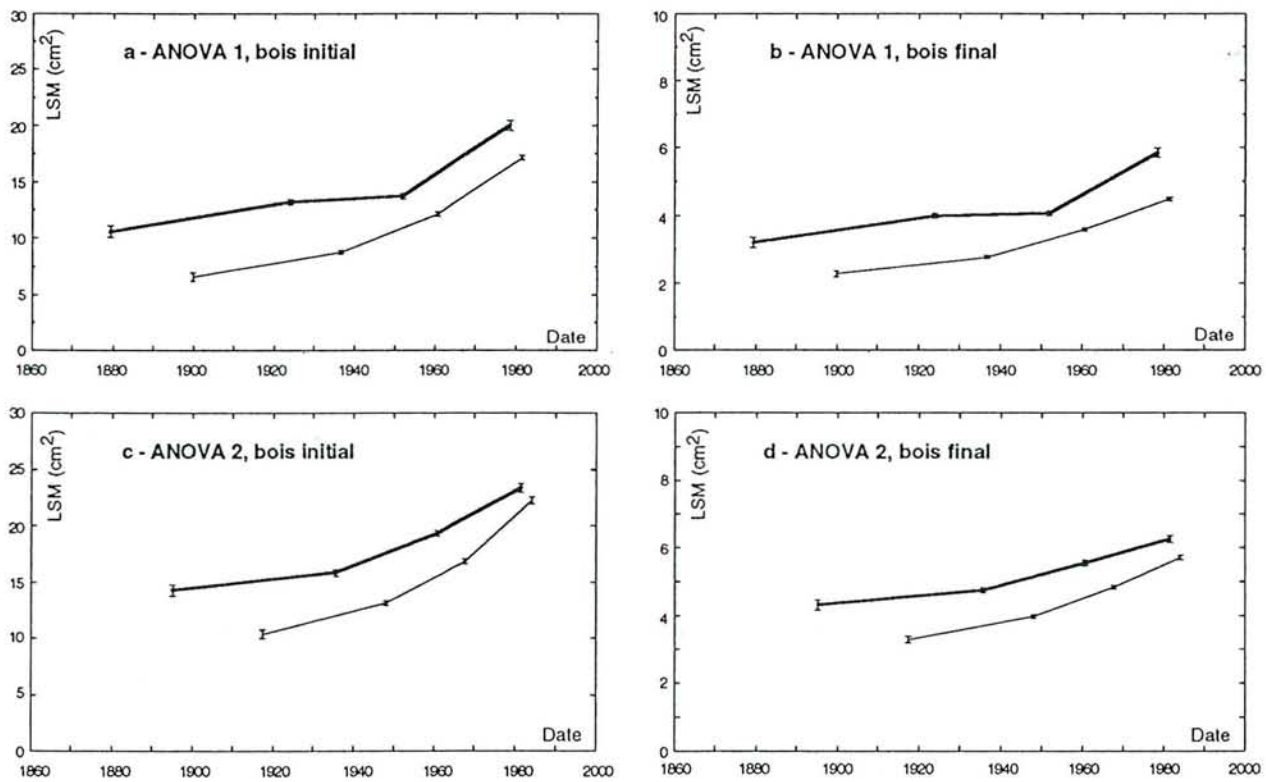



**Figure 68 : Effet date.** Moyennes des moindres carrés des surfaces annuelles de cernes pour l'effet de la date calculé à partir de deux analyses de variance, pour les arbres de futaie (traits fins) et de taillis-sous-futaie (traits gras) et pour les surfaces de bois inital (à gauche) et de bois final (à droite). Les intervalles de confiance au seuil de 95% sont indiqués.

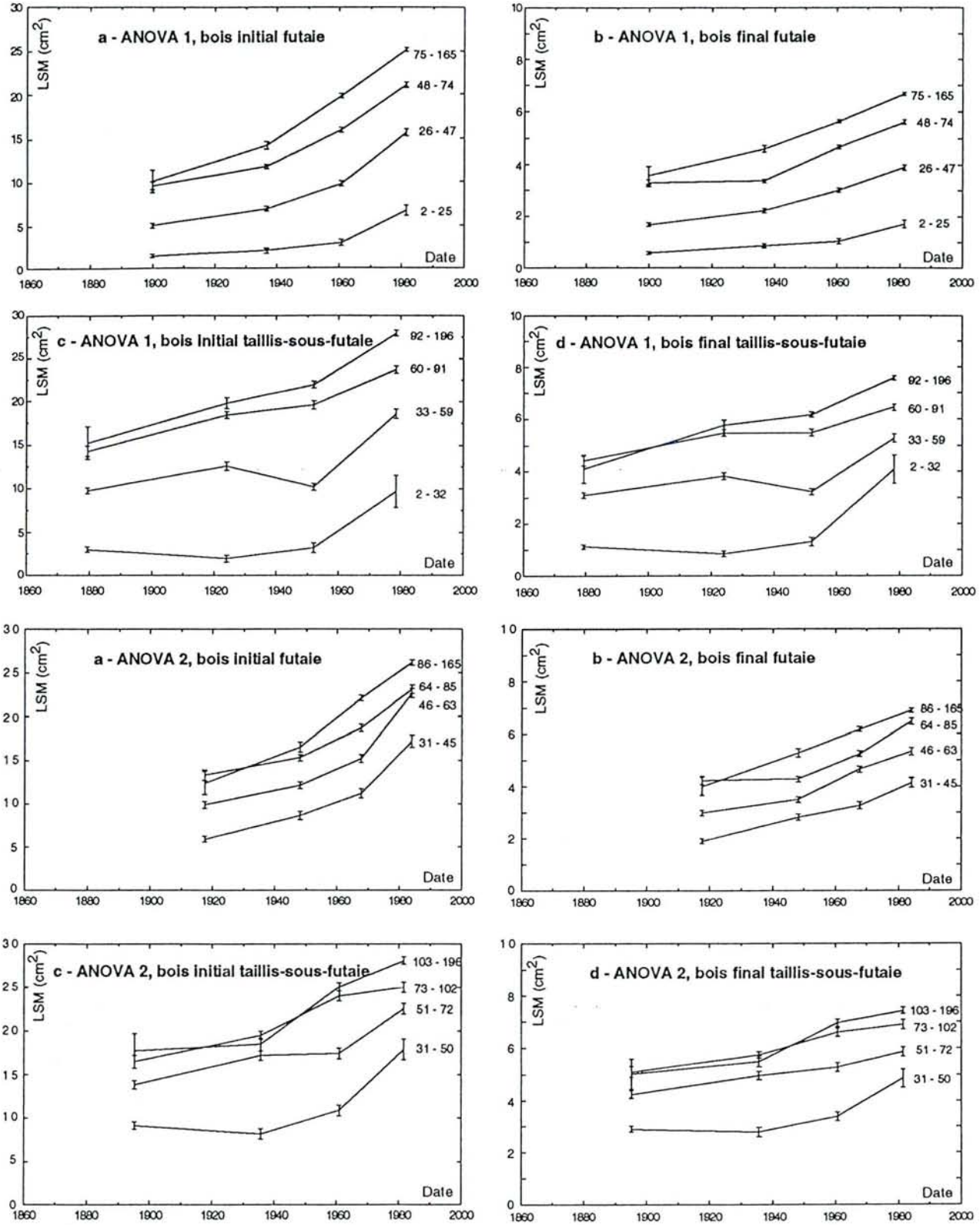



**Figure 69 : Interaction entre l'âge et la date.** Moyennes des moindres carrés des surfaces annuelles de cernes pour toutes les combinaisons d'âge cambial et d'années calendaires calculées à partir de deux analyses de variance ; pour les arbres de futaie et de taillis-sous-futaie et les surfaces de bois initial (à gauche) et de bois final (à droite). Les intervalles de confiance au seuil de 95% sont indiqués ainsi que les classes d'âge cambial.

Les taux de croissance relatifs, calculés globalement pour chaque cas étudié, montrent que la tendance à long terme due à l'effet date est toujours plus forte pour le bois initial que pour le bois final, tant en futaie qu'en taillis-sous-futaie. Pourtant les différences entre bois initial et bois final sont beaucoup plus importantes pour les arbres de futaie que pour les arbres de taillis-sous-futaie. Ces résultats avaient déjà été mis en évidence.

Conformément aux analyses des surfaces de cernes complètes, les taux de croissance relatifs en fonction du temps sont plus forts pour les cernes jeunes que pour les cernes âgés.

| | Futaie | | Taillis-sous-Futaie | |
|---|---|---|---|---|
| | Bois initial | Bois final | Bois initial | Bois final |
| ANOVA 1 | 160 ± 9% | 97 ± 5% | 89 ± 7% | 83 ± 7% |
| ANOVA 2 | 114 ± 6% | 74 ± 4% | 64 ± 4% | 45 ± 4% |

**Tableau 17** : Valeurs de la tendance à long terme pour l'effet date et pour les surfaces de bois initial et de bois final, en fonction des différentes analyses de variance et des gestions sylvicoles.

| | Futaie | | Taillis-sous-futaie | |
|---|---|---|---|---|
| | classe d'âge | accroissement relatif (%) | classe d'âge | accroissement relatif (%) |
| ANOVA 1 bois initial | [2,25] | 361 ± 61 | [2,32] | 224 ± 51 |
| | [26,47] | 210 ± 13 | [33,59] | 90 ± 7 |
| | [48,74] | 118 ± 7 | [60,91] | 66 ± 5 |
| | [75,165] | 146 ± 18 | [92,196] | 83 ± 13 |
| ANOVA 1 bois final | [2,25] | 192 ± 30 | [2,32] | 262 ± 40 |
| | [26,47] | 133 ± 9 | [33,59] | 70 ± 6 |
| | [48,74] | 71 ± 5 | [60,91] | 46 ± 4 |
| | [75,165] | 88 ± 11 | [92,196] | 85 ± 14 |
| ANOVA 2 bois initial | [31,45] | 191 ± 15 | [31,50] | 96 ± 11 |
| | [46,63] | 129 ± 7 | [51,72] | 63 ± 5 |
| | [64,85] | 73 ± 6 | [73,102] | 52 ± 5 |
| | [86,165] | 110 ± 13 | [103,196] | 58 ± 11 |
| ANOVA 2 bois final | [31,45] | 119 ± 10 | [31,50] | 67 ± 10 |
| | [46,63] | 79 ± 5 | [51,72] | 38 ± 4 |
| | [64,85] | 53 ± 5 | [73,102] | 36 ± 5 |
| | [86,165] | 72 ± 9 | [103,196] | 48 ± 10 |

**Tableau 18** : Pour chaque analyse de variance, chaque traitement sylvicole, chaque compartiment du cerne et chaque classe d'âge, un taux d'accroissement relatif est calculé ainsi que l'erreur standard de cet accroissement (*cf.* tableau 15)

| | | Futaie | | Taillis-sous-Futaie | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Bois initial | Bois final | Bois initial | Bois final |
| ANOVA 1 | effet âge | 64,45% | 76,79% | 80,94% | 77,11% |
| | effet date | 34,26% | 22,20% | 16,72% | 20,30% |
| | interaction | 1,28% | 1,01% | 2,34% | 2,58% |
| ANOVA 2 | effet âge | 34,98% | 54,00% | 58,75% | 69,16% |
| | effet date | 64,31% | 45,23% | 38,53% | 29,09% |
| | interaction | 0,71% | 0,76% | 2,72% | 1,75% |

**Tableau 19** : Répartition de la variance expliquée entre les différents effets pris en compte dans l'analyse de variance des surfaces de bois initial et de bois final.

### 5 - Les hypothèses de l'analyse de variance

Quelques critiques pourraient être faites quant à l'utilisation de l'analyse de variance pour traiter les surfaces de cernes. Les hypothèses de normalité et d'homoscédaticité, d'une part, et l'hypothèse d'indépendance des échantillons, d'autre part, doivent en théorie être vérifiées avant toute analyse de variance.

#### 5.1 - Normalité et homoscédaticité

La distribution des surfaces de cernes ne suit pas une loi normale. Puisque la moyenne des surfaces augmente en fonction de l'âge, la variance augmente également : il y a hétéroscédaticité.

Des transformations de variables ont été tentées : transformation logarithmique et racine carrée des surfaces de cernes. La transformation logarithmique est fréquemment employée car elle tend à égaliser les variances. Cette transformation de variables tend également à normaliser la distribution comme la racine carrée. Le tableau 20 donne les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement de chacune des distributions.

Les variables transformées sont analysées comme précédemment. Nous présentons ici les résultats de l'analyse de variance n°2. Malgré les transformations, les résutats des analyses sont stables, tant d'un point de vue qualitatif (Figure 70) que d'un point de vue quantitatif (Tableau 21).

| | Futaie | | Taillis-sous-futaie | |
|---|---|---|---|---|
| | Coefficient d'asymétrie | Coefficient d'aplatissement | Coefficiwent d'asymétrie | Coefficient d'aplatissement |
| Surfaces brutes | 1,57 | 3,39 | 1,59 | 3,96 |
| Logarithmes | -1,28 | 1,76 | -1,01 | 0,997 |
| Racine carrées | 0,34 | -0,36 | 0,33 | -0,32 |

**Tableau 20** : Coefficients d'asymétrie et d'aplatissement calculés à partir des surfaces de cernes brutes, leur logarithme ou leur racine carrée. Pour une distribution normale le coefficient d'asymétrie est nul et le coefficient d'aplatissement est égal à 3.

| | Futaie | Taillis-sous-futaie |
|---|---|---|
| Surfaces brutes | 105 ± 5 % | 59 ± 4 % |
| Logaritmes | 137 ± 5% | 59 ± 4% |
| Racines carrées | 116 ± 2% | 58 ± 4 ‰ |

**Tableau 21** : Taux de croissance relatifs entre les classes de dates extrêmes pour les arbres de futaie et de taillis-sous-futaie, calculés à partir des analyses de variance prenant en compte les surfaces de cernes brutes, leur logarithme ou leur racine carrée.

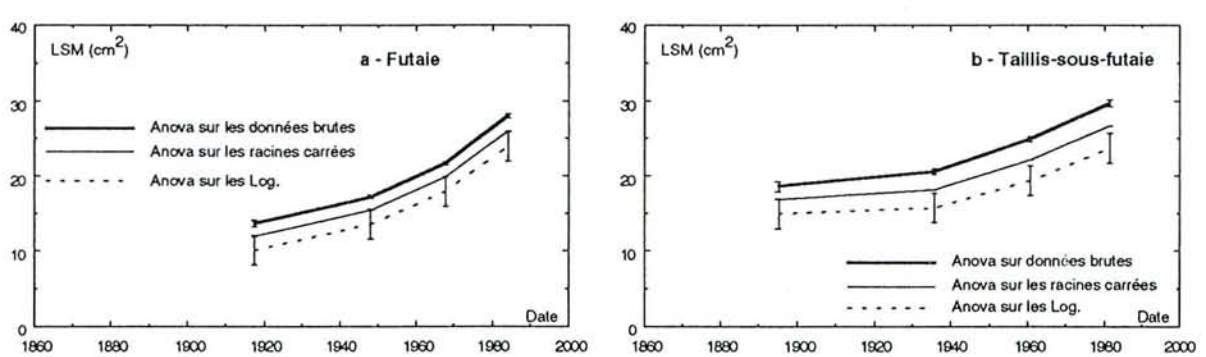



**Figure 70** : Moyenne des moindres carrés relatives à l'effet date pour chaque traitement sylvicole en fonction de la date. Les résultats proviennent de l'analyse des surfaces de cernes brutes, de leur logarithme ou de leur racine carrée.

### 5.2 - Indépendance des échantillons

Les mesures successives des surfaces de cernes effectuées sur un individu ne sont pas indépendantes. Il existe un biais lié à l'effet arbre et un autre lié aux arrière-effets (autocorrélation entre les largeurs de cernes successives). Puisque l'on travaille sur des mesures d'accroissements annuels, les valeurs sont toutefois moins liées que si l'on considérait un suivi cumulé de la croissance des différents arbres. Le poids des arbres n'est pas homogène dans chacune des cellules des tableaux de données. Un arbre peut être représenté par un grand nombre de cernes s'il est disposé dans la diagonale d'une classe ; il peut également n'être représenté que par un seul cerne s'il se trouve en position marginale.

Pour minimiser ce biais, l'analyse de variance n°1 a été refaite, non pas en utilisant les surfaces de chaque cerne présent dans chaque classe du tableau de données, mais en utilisant les moyennes des surfaces calculées pour un arbre donné. Ainsi chaque arbre a le même poids dans chaque case du tableau.

Les effectifs disponibles pour chaque combinaison de classes d'âges cambiaux et d'années calendaires sont très diminués (Tableau 22) par rapport aux effectifs que nous avions observés auparavant.

Le résultat essentiel de cette analyse est la similitude des résultats par rapport à ceux précédemment exposés. Pour illustrer ce point, la figure 71 présente l'évolution dans le temps des moyennes corrigées relatives à l'effet date, pour les deux traitements sylvicoles, et pour les analyses réalisées à partir des surfaces de cernes brutes ou leur moyenne par arbre.

| | Taillis-sous-futaie | | | |
|---|---|---|---|---|
| Age / date | 2 - 32 | 33 - 59 | 60 - 91 | 92 - 196 |
| 1803 - 1907 | 242 | 178 | 84 | 16 |
| 1908 - 1938 | 196 | 171 | 174 | 79 |
| 1939 - 1965 | 118 | 180 | 175 | 175 |
| 1966 - 1991 | 17 | 118 | 194 | 230 |

| | Futaie | | | |
|---|---|---|---|---|
| Age / date | 2 - 25 | 26 - 47 | 48 - 74 | 75 - 165 |
| 1832 - 1922 | 383 | 270 | 109 | 19 |
| 1923 - 1944 | 269 | 301 | 277 | 109 |
| 1945 - 1971 | 178 | 240 | 301 | 27 |
| 1972 - 1991 | 72 | 169 | 264 | 386 |

**Tableau 22** : Nombre d'arbres disponibles pour chaque classe d'âge (colonnes) et de date (lignes).

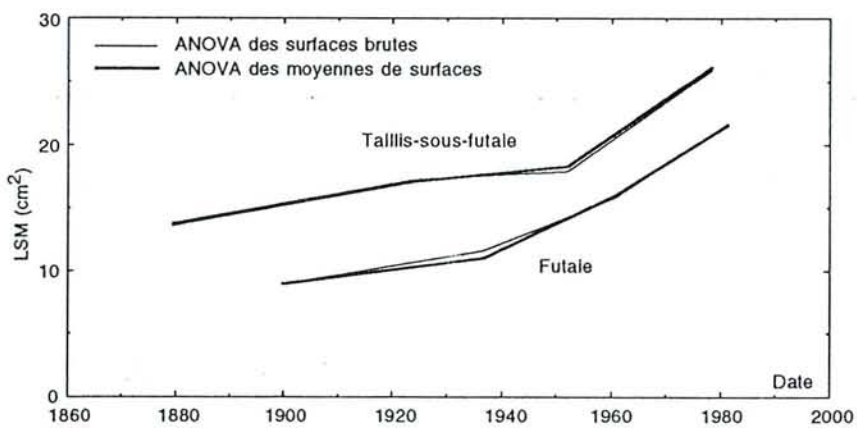



**Figure 71** : Moyennes corrigées relatives à l'effet date pour la futaie et le taillis-sous-futaie. Utilisation des surfaces de cernes brutes ou de leur moyenne par arbre.

### 6 - Conclusion sur l'analyse de variance

D'un point de vue méthodologique, l'analyse de variance offre des avantages et des inconvénients par rapport à l'utilisation des indices de croissance.

C'est tout d'abord une méthode rapide et directe, puisque, contrairement à la méthode utilisant une courbe âge régionale, tous les calculs sont réalisés en une seule étape. Les surfaces de cernes n'étant pas transformées en indices de croissance, les unités de mesure sont conservées tout au long de l'analyse : l'évolution à long terme de la croissance radiale peut donc être directement interprétée en unités de surface par exemple (ce calcul est théoriquement possible dans le cas des courbes de référence indicées, mais il implique une étape de calculs supplémentaire). Les principaux avantages de l'analyse de variance sont autres. Elle offre la possibilité, d'une part, d'étudier conjointement les facteurs âge et date et d'autre part, de pouvoir étudier les interactions entre ces deux facteurs. L'étude conjointe des facteurs âge et date est importante car, comme nous l'avons montré, les courbes régionales de l'effet âge ne sont pas indépendantes du temps. La prise en compte de l'interaction entre l'âge cambial et l'année calendaire n'est pas possible avec la méthode basée sur la courbe régionale de l'effet âge. Il est évidemment possible de stratifier les échantillons en classes d'âges, mais pour les différentes classes obtenues, toutes les années calendaires ne sont pas disponibles et on se trouve vite confronté à un problème d'effectif. Les résultats d'une telle stratification seraient d'ailleurs meilleurs si pour chaque classe d'âge une courbe âge puis une standardisation étaient réalisées. Une telle procédure devient alors très lourde.

D'un autre point de vue, il est nécessaire de disposer d'un lot de données équilibré pour pouvoir appliquer les méthodes d'analyse de variance à des séries chronologiques, et ceci est une condition très restrictive. En raison de cette contrainte, la résolution temporelle que l'analyse de variance permet d'obtenir est directement liée à la taille de l'échantillon. Dans notre cas, il n'était pas envisageable de créer plus de quatre classes d'âges et de dates sans biaiser les résultats, alors que nous disposions respectivement de 40 876 et 50 509 cernes pour les peuplements de taillis-sous-futaie et de futaie. Ces problèmes d'effectif sont particulièrement contraignants si on désire analyser, non pas les surfaces de cernes, mais des moyennes pour limiter la dépendance des échantillons, ce qui est statistiquement plus valide, mais sans effet sur les résultats à cause de l'importance de nos deux échantillons.

Le nombre de classes que nous avons utilisé est suffisant pour mettre en évidence et quantifier l'évolution de la croissance radiale au cours du temps. Rappelons que dans ce cas, les perturbations à court et moyen terme du signal étudié sont indésirables. Par contre, avec un nombre aussi restreint de classes, il n'est pas possible de mettre en évidence de façon certaine des phénomènes particuliers comme la rupture de pente dans les tendances à long terme observée par ailleurs dans les années 1950. Pour analyser plus finement ce phénomène, un sous-échantillon plus équilibré a dû être séparé, et un nombre plus grand de classes utilisé (cas de l'ANOVA n°3). L'accélération de la tendance à long terme dans les années 1950 devient alors plus évidente pour le taillis-sous-futaie comme pour la futaie, mais la précision de ce résultat se fait au détriment d'un grand nombre d'âges cambiaux et de dates qui ont dû être retirés.

L'emploi des analyses de variances se justifie donc en tant que nouvelle méthode de standardisation : elle s'est révélée très performante pour étudier les variations à basse fréquence de la croissance radiale. Pourtant, les contraintes relatives à l'échantillonnage sont encore plus fortes que dans le cas de l'utilisation d'une méthode de standardisation plus classique.

## IV - BIAIS D'ECHANTILLONNAGE : LES ARBRES ANCIENS PEUVENT-ILS ETRE COMPARES AUX JEUNES ARBRES ?

Les tendances à long terme de la croissance radiale que nous observons pour les arbres de futaie et de taillis-sous-futaie pourraient être remises en question s'il existait des biais d'échantillonnage. Le biais le plus important concerne la vitalité des arbres.

On peut suspecter que les plus vieux arbres toujours sur pied n'ont pas encore été récoltés à cause de leur trop faible diamètre. L'âge d'exploitabilité de ces arbres aurait été repoussé alors que certains de leurs contemporains, plus vigoureux, auraient déjà été récoltés. La trop faible vitalité des plus vieilles tiges entraînerait alors une sous-estimation du niveau de croissance pour les dates anciennes. Cette vitalité plus faible peut être due à trois facteurs : une prédisposition génétique des arbres, une présence particulièrement forte dans les stations les moins productives, une compétition inter-individuelle très forte.

A l'opposé, des auteurs comme Lucier *et al.* (1989) ou Hartmann *et al.* (1992) pensent que les accroissements radiaux des jeunes arbres ne sont pas surestimés par rapport aux anciens. Il existerait, parmi les jeunes arbres que l'on peut actuellement échantillonner, une proportion non négligeable d'individus peu vigoureux qui disparaîtront à terme des peuplements sous l'effet de la sélection naturelle, de la compétition ou des interventions sylvicoles. Les arbres plus âgés restant sur pied seraient par contre uniquement représentés par "les meilleurs". Ainsi selon Lucier *et al.* (*op. cit.*), on sous-estimerait les largeurs de cernes actuelles des plus jeunes arbres : en comparant la largeur moyenne de cernes élaborés entre 1960 et 1964, ces auteurs ont montré que cette moyenne passait d'une valeur de 0,64 mm pour des arbres carottés en 1964 à 1,33 mm pour ceux carottés en 1980. En stratifiant un échantillon d'épicéa en trois classes de transparence du houppier, Hartmann *et al.* (*op. cit.*) constatent que les courbes relatives à chacune des classes ne se différencient pas depuis 1910, puis elles divergent à partir de 1950. Selon ces auteurs cette différenciation pourrait fort bien n'être que l'expression d'un processus naturel de la concurrence et de la sylviculture : les arbres peu vigoureux auraient été éliminés alors qu'actuellement toutes les classes de vigueur sont représentées. Dans l'étude des tendances à long terme de la croissance radiale, et pour un type de station donné, on peut donc penser que les tendances à long terme positives seraient sous-estimées. Dhôte (1990) constate également que la pratique de sylvicultures sélectives se traduit par un tri des individus suivant leur vitesse de croissance. L'importante variabilité des vitesses d'accroissement dans le jeune âge se traduit par des reclassements en terme de position relative des circonférences mais pas en terme de reclassement au point de vue du statut social.

Pour s'affranchir de ces contraintes dues à l'échantillonnage il est indispensable d'être strict sur le choix des arbres utilisés.

### 1 - Suppression des plus vieux arbres

Sur les plateaux calcaires de Lorraine, toutes stations confondues, l'âge optimum d'exploitabilité du hêtre traité en futaie varie entre 100 et 130 ans avec un âge limite acceptable de 150 ans ; en moyenne l'âge d'exploitabilité se situe entre 120 et 130 ans. Pour cette gamme d'âge, le diamètre des arbres à 1,30 m doit être compris entre 40 et 65 cm.

La répartition des diamètres à 1,30 m en fonction de l'âge est présentée respectivement pour nos arbres de futaie et de taillis-sous-futaie, sur les figures 72a et 72b.

Pour les deux traitements sylvicoles, la répartition des diamètres est homogène. Les critères d'âge et de diamètre optimum d'exploitabilité sont à l'heure actuelle peu mis en pratique. Il reste sur pied des arbres de fort diamètre et relativement vigoureux qui n'ont toujours pas été exploités. A partir de 140 ans en futaie et de 160 ans en taillis-sous-futaie, on note cependant que les plus gros arbres sont absents. Notre échantillon de hêtres semble donc peu perturbé par un nombre significatif d'arbres anciens peu vigoureux. Toutefois, afin

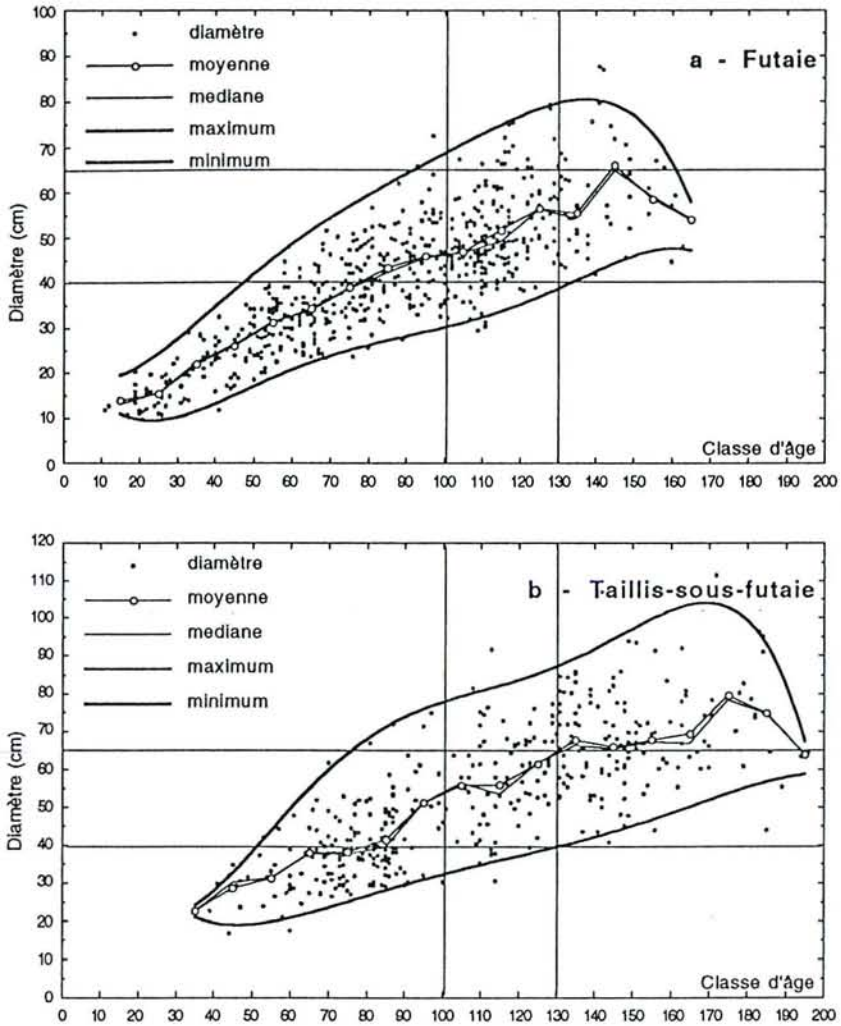



**Figure 72** : Diamètre à 1,30 m des arbres de futaie (a) et des arbres de taillis-sous-futaie (b) en fonction de l'âge. Les courbes "moyenne" et "médiane" représentent ces paramètres calculés sur des classes d'âges de 10 ans ; dans ce cas, les abscisses représentent les bornes supérieures des classes. Les courbes "maximum" et "minimum" représentent les ajustements réalisés à partir des valeurs maximales et minimales des circonférences observées pour chaque classe d'âge.

de vérifier l'absence de biais dû à la structure de l'échantillonnage, nous avons reconstruit des courbes d'indices de croissance radiale en excluant les plus vieux arbres.

Pour la futaie, plusieurs calculs ont été réalisés en ne gardant tour à tour que les arbres de moins de 100 ans, de moins de 110 ans, etc. Les résultats obtenus sont similaires dans tous les cas et nous ne présentons ici que les résultats concernant les arbres de moins de 130 ans. Pour le taillis-sous-futaie, nous disposons d'une plus petite quantité d'arbres que pour la futaie. Afin d'obtenir une courbe âge statistiquement valide et une série d'indices suffisamment longue, les arbres de moins de 140 ans sont conservés.

Pour chaque sous-échantillon, une courbe âge est recalculée puis ajustée. Les indices de croissance radiale sont calculés puis moyennés en fonction de la date. Les figures 73a et 73b présentent l'évolution de ces indices moyens en fonction du temps.

Malgré le raccourcissement conséquent des chronologies, la tendance à long terme est conservée pour la futaie comme pour le taillis-sous-futaie. Entre 1873 et 1991, les indices de croissance des arbres de futaie ont subi une augmentation relative de +153%, et en taillis-sous-futaie, le taux est de +51% entre 1887 et 1991. La tendance à long terme est, une fois encore, plus forte après les années 1950 qu'avant.

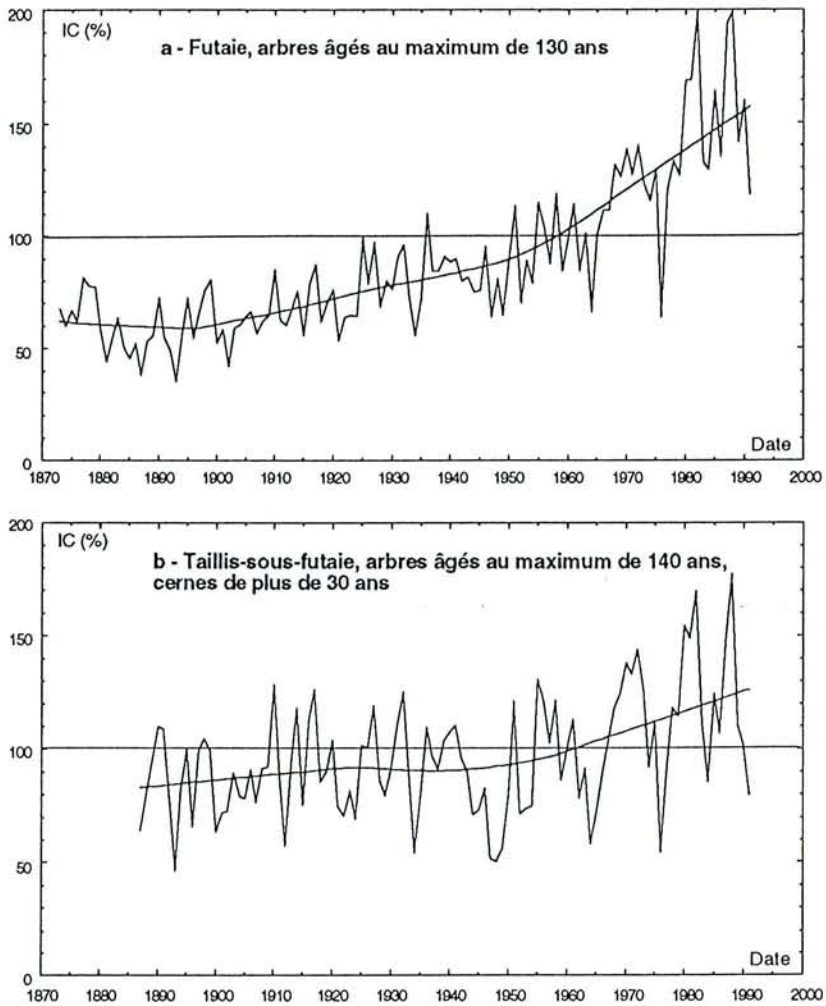



**Figure 73** : Evolution de la croissance radiale des hêtres de futaie (a) et de taillis-sous-futaie (b). Les indices sont calculés à partir d'un échantillon réduit d'arbres où ne sont pris en compte que les individus âgés de moins de 130 ans en futaie et de moins de 140 ans en taillis-sous-futaie. Chaque indice moyen est calculé à partir d'un minimum de trente valeurs par date.

Sur la même période, et en utilisant les résultats précédents, l'augmentation relative de la croissance radiale était de +185% en futaie et de +69% en taillis-sous-futaie. Avec les chiffres de +153 et +51% obtenus ici, nous pouvons dire que la suppression des plus vieux arbres a entraîné une baisse de l'ampleur de la tendance Ce résultat était attendu ; pourtant cette diminution est relativement faible, surtout dans le cas des arbres de taillis-sous-futaie, et nous pouvons dire que les plus vieux arbres échantillonnés ne sont pas à l'origine des tendances à long terme observées dans la croissance radiale des hêtres des plateaux calcaires.

## 2 - Stratification en fonction d'un indice de vigueur

### 2.1 - Calcul d'un indice de vigueur

Selon Lucier *et al.* et Hartmann *et al.* (*op. cit.*), la vigueur moyenne des jeunes arbres dont on dispose devrait être actuellement sous-estimée par rapport à la vigueur de leurs aînés ou en tout cas être plus variable. Nous pouvons essayer de confirmer ces hypothèses.

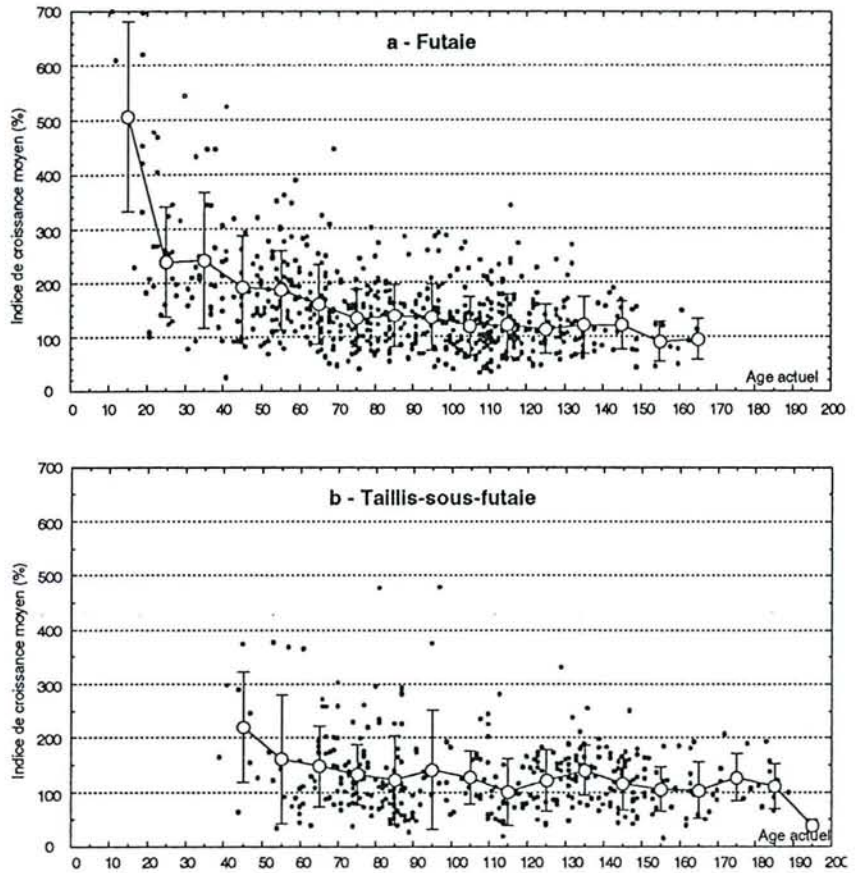



**Figure 74** (a et b) : Indice de croissance moyen (indice de vigueur actuelle) calculé à partir des indices de croissance des années 1981 à 1991, en fonction de l'âge actuel des arbres de futaie (**a**) et de taillis-sous-futaie (**b**), (points noirs).
Moyennes et écart-types des indices de vigueur par classes d'âge actuel de 10 ans (points blancs) ; *cf.* fig. 75.

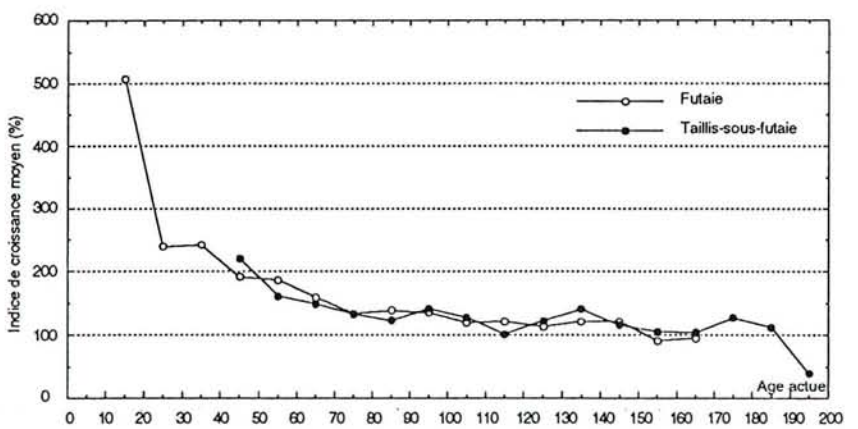



**Figure 75** : Evolution de la moyenne des indices de vigueur en fonction de l'âge actuel quand tous les arbres sont pris en compte.

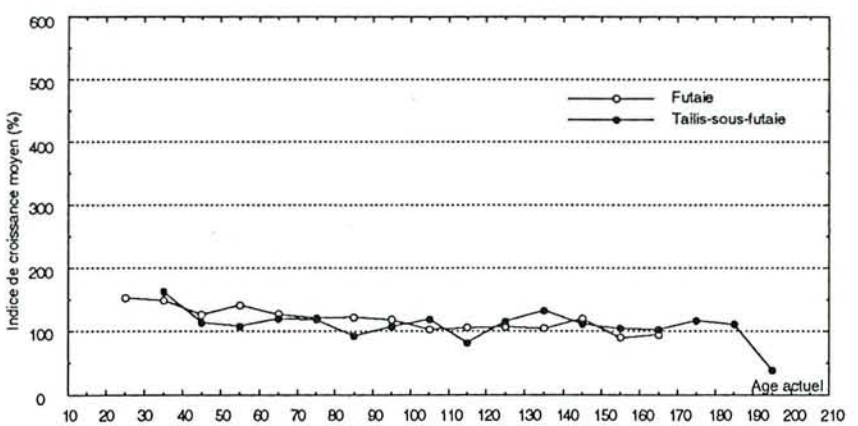



**Figure 76** : Evolution de la moyenne des indices de vigueur en fonction de l'âge actuel quand les arbres ayant un indice supérieur à 200% sont éliminés.

Un indice de vigueur moyen est calculé sur la période 1981 - 1991 à partir des indices de croissance radiale. Cet indice de vigueur donne une estimation de la croissance radiale dégagée de l'effet de l'âge sur une période de dix ans. Cet intervalle de dix ans permet le calcul de l'indice de vigueur pour tous les arbres disponibles en futaie et en taillis-sous-futaie. Les figures 74a et 74b présentent la répartition des indices de vigueur moyens en fonction de l'âge actuel des arbres de futaie et de taillis-sous-futaie.

Ces figures montrent, selon notre attente, que la vigueur actuelle des arbres n'est pas indépendante de leur âge bien que nous utilisions des indices de croissance dégagés de l'effet de l'âge. La variance de la vigueur est plus forte pour les jeunes arbres que pour les arbres âgés, pourtant, contrairement aux observations de Lucier *et al.* (1989), la vigueur des jeunes arbres n'est pas sous-estimée par rapport à celle de leurs aînés et ceci, quel que soit le type de sylviculture. Il n'existe pas d'arbres jeunes moins vigoureux que les anciens, et les plus vieux arbres ne sont pas les plus vigoureux actuellement. On observe au contraire - et ce résultat a déjà été présenté - que pour les dates actuelles (période où est calculé l'indice de vigueur), les jeunes cernes (= cernes actuels des jeunes arbres) sont plus réactifs aux changements environnementaux supposés que les cernes âgés (= cernes actuels des vieux arbres). On doit remarquer également, bien que l'étude phytoécologique n'ait pas encore été présentée, qu'il n'existe aucune relation entre les indices de vigueur et la fertilité stationnelle : les jeunes arbres présentant de forts indices de croissance ne sont pas confinés aux meilleures stations.

On peut admettre que dans le cas des arbres de futaie, les forts indices de croissance moyens obtenus pour les arbres de moins de 40 ans sont le reflet, au moins en partie, d'une évolution des pratiques sylvicoles (*cf.* § 5 - Evolution de la croissance radiale des futaies et taillis-sous-futaie de hêtres en fonction des classes d'âges cambiaux). Cependant, l'évolution des indices moyens, ou coefficients de vigueur, est perceptible pour des arbres plus âgés, à la fois en futaie et en taillis-sous-futaie où il n'y a pas eu d'évolution de la sylviculture (Figure 75). Les pentes des droites de régression calculées à partir des indices de vigueur moyennés sur des classes d'âge de dix ans entre 45 et 65 ans ne sont d'ailleurs pas différentes entre la futaie et le taillis-sous-futaie (respectivement -0,72 et -0,66). Il semblerait donc que le meilleur taux d'accroissement observé pour les arbres les plus jeunes ne soit pas uniquement en rapport avec la sylviculture. Il doit y avoir eu une évolution des facteurs écologiques qui a déplacé certains facteurs limitants et les arbres sont d'autant plus réactifs à ces changements qu'ils sont jeunes.

### 2.1 - Elimination des arbres les plus vigoureux

La présence d'arbres très vigoureux dans l'échantillon a une influence sur l'intensité des tendances à long terme de la croissance radiale mise en évidence, surtout dans le cas de la futaie. Pour étudier cette influence, nous avons exclu les arbres présentant un indice de vigueur supérieur à 200%. Ce seuil permet de conserver un nombre suffisant d'arbres : 490 en futaie et 351 en taillis-sous-futaie. Pour l'ensemble des arbres conservés, l'évolution de la moyenne des indices de vigueur en fonction de l'âge actuel des arbres est alors limitée (Figure 76).

Avec ces arbres, les courbes retraçant l'évolution de la croissance radiale sont reconstruites (Figures 77 à 80). Pour chaque traitement sylvicole, la suppression des arbres les plus vigoureux a entraîné une baisse de l'amplitude de la tendance à long terme : il ne pouvait en être autrement. Cette baisse est plus importante pour la futaie que pour le taillis-sous-futaie où moins d'arbres ont été retirés.

Les jeunes arbres très vigoureux ont donc une responsabilité dans l'évolution moyenne des accroissements radiaux, mais s'ils amplifient le phénomène, ils n'en sont pas à l'origine. Il existe une évolution positive de la croissance radiale, au moins depuis la fin du siècle dernier, sans rapport avec la vigueur des arbres.

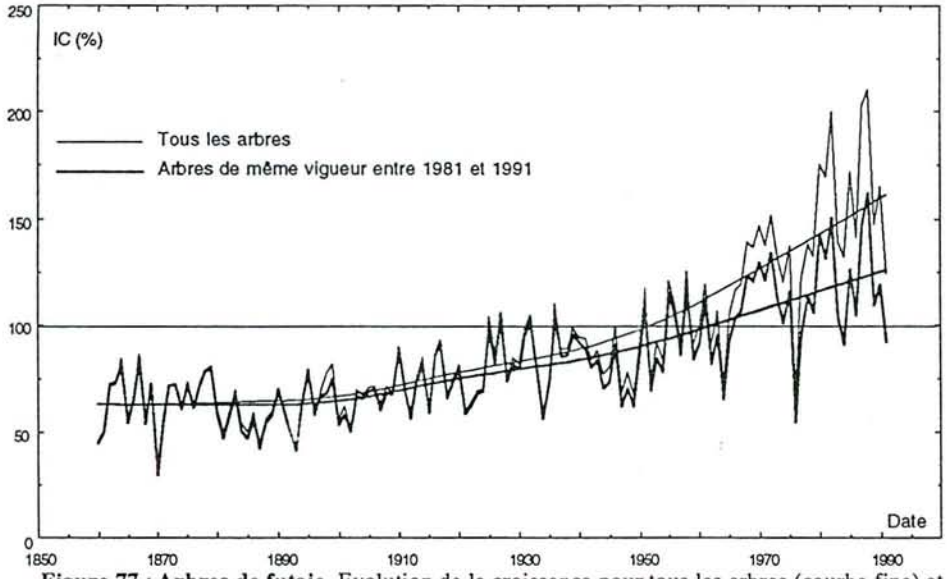



**Figure 77 : Arbres de futaie.** Evolution de la croissance pour tous les arbres (courbe fine) et pour les arbres selectionnés d'après leur vigueur entre 1981 et 1991 (courbe grasse)

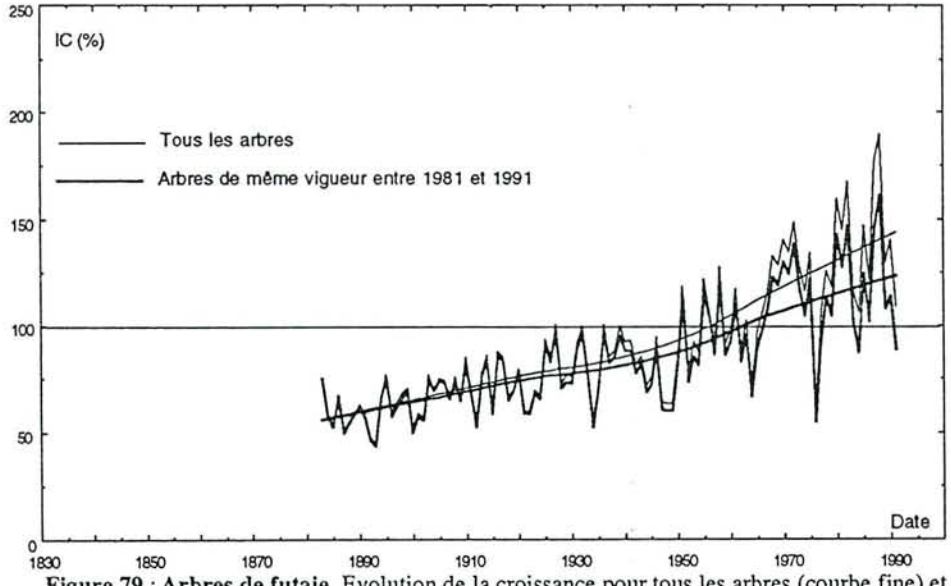



**Figure 79 : Arbres de futaie.** Evolution de la croissance pour tous les arbres (courbe fine) et pour les arbres selectionnés d'après leur vigueur entre 1981 et 1991 (courbe grasse). Les cernes de moins de 30 ans ne sont pas pris en compte.

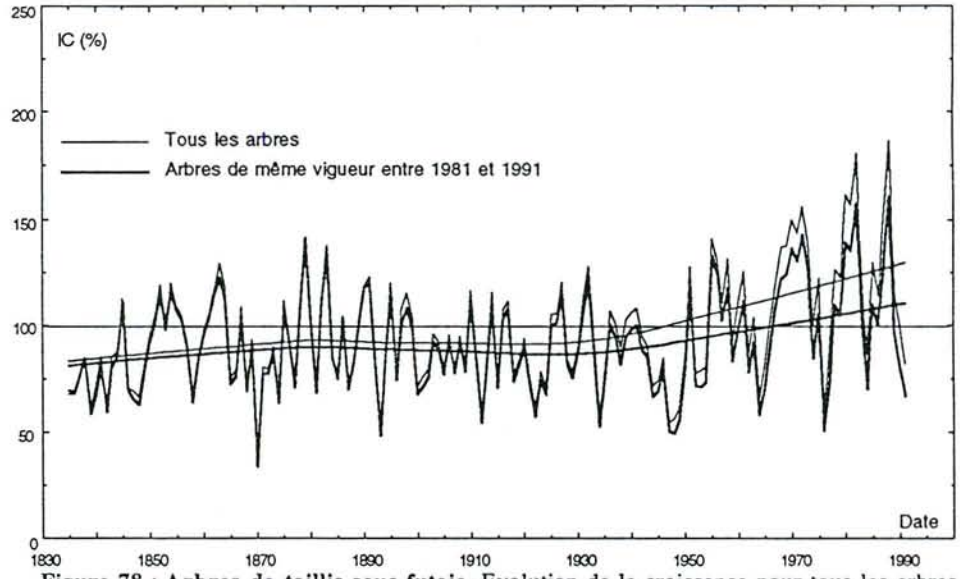



**Figure 78 : Arbres de taillis-sous-futaie.** Evolution de la croissance pour tous les arbres (courbe fine) et pour les arbres selectionnés d'après leur vigueur entre 1981 et 1991 (courbe grasse)

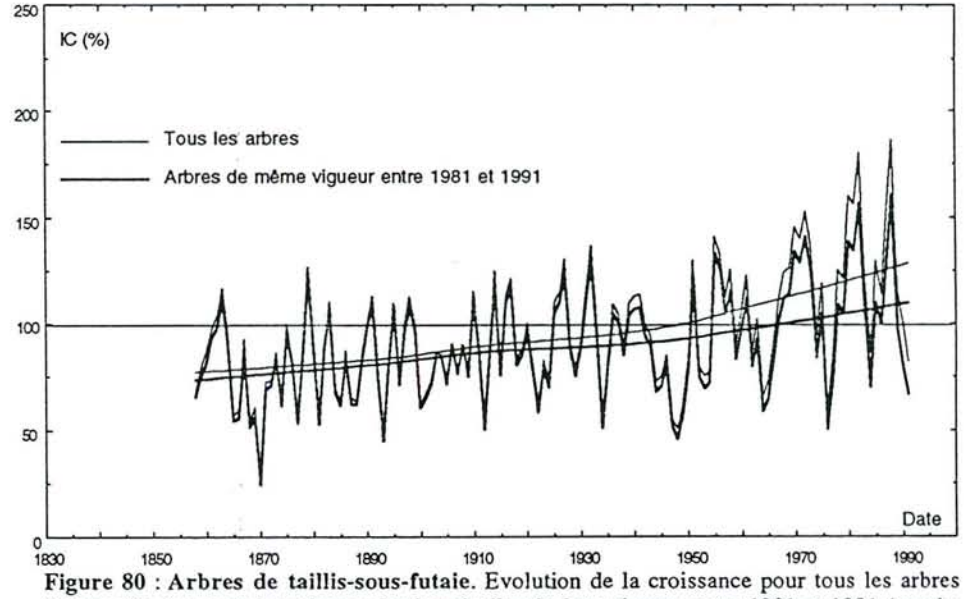



**Figure 80 : Arbres de taillis-sous-futaie.** Evolution de la croissance pour tous les arbres (courbe fine) et pour les arbres selectionnés d'après leur vigueur entre 1981 et 1991 (courbe grasse) Les cernes de moins de 30 ans ne sont pas pris en compte.

**2 - Conclusions sur les biais possibles d'échantillonnage**

Parmi les causes susceptibles d'expliquer les tendances positives de la croissance radiale sur le long terme, les biais d'échantillonnage pourraient avoir un poids non négligeable.

On peut tout d'abord penser que la prise en compte d'arbres très vieux, et supposés peu vigoureux, influence de façon notable la mise en évidence d'une dérive positive de la croissance radiale.

Si on retire du lot de données les arbres les plus anciens, on constate qu'ils ont effectivement une influence sur les tendances à long terme. Leur rôle n'est cependant pas prépondérant : en futaie, la tendance est un peu diminuée et en taillis-sous-futaie la tendance est peu sensible au retrait des vieux arbres. Ces résultats confirment ceux obtenus par Becker *et al.* (1994a) qui ont montré que la prise en compte de très vieux arbres ne jouait en général pas un rôle important sur l'amplitude de la tendance à long terme observée pour plusieurs essences et dans plusieurs régions.

Certains auteurs pensent que parmi les arbres jeunes il existe une proportion significative d'individus peu vigoureux, ce qui aurait comme conséquence une sous-estimation de la tendance à long terme pour les dates actuelles.

Si on étudie l'influence de ce biais, on constate tout d'abord que parmi les plus jeunes arbres, il n'existe pas d'individus moins vigoureux que leurs aînés ; au contraire. Enfin, si on analyse l'évolution de la croissance radiale en supprimant les arbres actuellement les plus vigoureux, on constate que ceux-ci ont une influence assez faible sur le phénomène de dérive à long terme de la croissance radiale.

Si les biais d'échantillonnage peuvent avoir une influence sur le phénomène de tendance à long terme, il apparaît donc que l'importance de l'erreur est globalement faible et que ces biais ne sont pas à l'origine de la mise en évidence d'une dérive positive de la croissance.

*Troisième partie*

# *ANALYSE DENDROECOLOGIQUE*

# Chapitre V

# ETUDE PHYTOECOLOGIQUE

## I - INTRODUCTION

L'étude des changements de croissance radiale à long terme ayant été délibérément privilégiée dans ce travail, nous avons choisi d'échantillonner les arbres en limitant *a priori* les types de stations. A partir de nos seuls relevés, il n'est donc pas possible de réaliser une étude typologique pertinente : la définition des stations forestières d'une région naturelle n'est possible qu'avec la mise en place d'un protocole lourd (préétude, échantillonnage judicieux et abondant, études statistiques précises, etc.), (Becker, 1988). Cependant, les hêtraies lorraines ont fait l'objet de nombreuses études ; il en découle une littérature abondante. Les types de milieux forestiers (ou stations) susceptibles d'être rencontrés sur les plateaux calcaires, en fonction de leurs caractéristiques floristiques, topographiques et édaphiques, sont bien connus. L'ouvrage auquel nous ferons préférentiellement référence tout au long de ce chapitre est le catalogue des plateaux calcaires de Lorraine (Becker *et al.*, 1980).

Pour caractériser la variabilité stationnelle de nos 102 placettes, trois méthodes complémentaires sont utilisées :

- classement des relevés en utilisant les coefficients d'Ellenberg (Ellenberg *et al.*, 1992) ;
- classement des relevés en utilisant l'analyse factorielle des correspondances (AFC) ;
- regroupement des relevés, d'une part, en fonction des résultats de l'AFC et d'autre part, en utilisant les caractères diagnostiques et les clefs de détermination des stations du catalogue des plateaux calcaires.

## II - METHODES

### 1 - Coefficients d'Ellenberg

Ellenberg a développé depuis 1950 la caractérisation de la valeur indicatrice d'un grand nombre d'espèces vis-à-vis de huit facteurs écologiques. Dans notre étude nous avons retenu : le pH du sol (coefficient R) ; la nutrition azotée (coefficient N) ; le régime hydrique du sol (coefficient F) ; l'éclairement relatif (coefficient L) ; la température (coefficient T) et la continentalité (coefficient K). Chaque coefficient peut prendre une valeur de 1 à 9, (de 1 à 12 dans le cas de F), en fonction de l'exigence de l'espèce végétale à l'égard du facteur écologique considéré : par exemple, la viorne lantane, caractéristique des sols calcaires, est affectée de la valeur 8 pour le coefficient R ; l'ortie, exigeante en azote, possède pour le facteur N, la valeur 9 ; la valeur 3 est affectée au coefficient F pour le chêne pubescent, assez peu exigeant en eau. Si une espèce est considérée comme indifférente à l'un ou l'autre des facteurs, aucune valeur ne lui est attribuée.

Pour chaque relevé floristique et pour chaque facteur, il est possible de calculer une valeur moyenne à partir des espèces rencontrées. Cette valeur moyenne est un indice synthétique des conditions de milieu. Pour une placette, cet indice est la moyenne arithmétique des valeurs du coefficient de chaque espèce rencontrée et non indifférente au facteur considéré. Le calcul de cet indice moyen peut également être pondéré par la valeur des coefficients d'abondance-dominance des espèces sur chaque relevé. Cependant, nous avons constaté que ce calcul n'apporte pas une précision supplémentaire significative.

Il faut également considérer que les coefficients d'Ellenberg ne sont que des valeurs relatives. Etablis pour l'ensemble du domaine médio-européen, ces coefficients ne peuvent prendre en compte des phénomènes locaux, comme par exemple des compensations de facteurs ou des différenciations écotypiques. Ainsi, la germandrée scorodoine (*Teucrium scorodonia*) est une espèce généralement acidiphile et en ce sens affectée d'un coefficient 2 pour le pH du sol. Pourtant il existe sur les plateaux calcaires de Lorraine un écotype xérocalcaricole thermophile. La même remarque peut être faite pour le mélampyre de prés (*Melampyrum pratense*) ou la bourdaine (*Frangula alnus*), (Becker *et al.*, 1978). Dans le cadre de notre étude, les coefficients d'Ellenberg moyens ne représentent donc que des conditions générales.

### 2 - Analyse factorielle des correspondances

L'analyse factorielle des correspondances (AFC) permet la caractérisation statistique de la variabilité stationnelle. Ce type d'analyse multivariée est très largement utilisé dans toutes les études typologiques, et nous ne détaillerons ni les principes de base, ni les avantages ou les inconvénients de cette méthode. Nous pouvons cependant préciser que dans une série de relevés, si la répartition des espèces n'est pas aléatoire en fonction des conditions environnementales, les facteurs écologiques principaux structurant la végétation peuvent être extraits par l'AFC à partir d'un tableau de contingence de n relevés et de p espèces. L'AFC permet de mettre en évidence les espèces dont la distribution dans les relevés est comparable (même profil écologique), et puisque les espèces et les relevés jouent des rôles symétriques, chaque relevé peut être projeté dans l'espace des espèces. L'AFC permet alors de mettre en évidence les relevés dont la composition floristique est semblable.

Dans notre cas, le caractère indicateur de chaque espèce et les facteurs écologiques déterminants pour la végétation sont connus (Becker, 1979 ; Becker *et al.*, 1980 ; Becker, 1987b). L'AFC nous permet donc simplement d'ordonner nos relevés phytoécologiques en fonction des coordonnées des principaux axes factoriels synthétisant les conditions de milieu.

### 3 - Classification des stations

Les relevés peuvent être triés d'une part, en fonction des paramètres reconnus pertinents lors de l'élaboration de la typologie des plateaux calcaires (caractères diagnostiques et clefs de détermination) (Becker, 1979 ; Becker *et al.*, 1980), et d'autre part, à partir des résultats obtenus par analyse factorielle des correspondances. Le résultat de ces classifications aboutit au regroupement des relevés dans les types de stations décrits sur les plateaux calcaires.

## III - CARACTERISTIQUES GENERALES DE LA REGION

### 1 - Substrat géologique et formations superficielles

Trois caractères principaux permettent de décrire la région des plateaux calcaires de Lorraine : le climat (cf. p. 5), les roches mères et les types de sols.

Le substrat géologique de la région est constitué par des auréoles successives de calcaires et calcaires marneux Jurassiques. Les côtes de Moselle, que nous avons plus particulièrement étudiées, sont des formations Bajocienne et Bathonienne de calcaire dur. Le déterminisme de la pédogenèse et l'économie en eau des sols sont cependant principalement liés à la présence et à l'épaisseur de diverses formations superficielles couvrant les bancs calcaires. Les formations superficielles les plus communément rencontrées sont :

- **La terra fusca** qui recouvre fréquemment les formations calcaires, surtout en position de plateau où l'érosion ne l'a pas ou peu entraînée. La terra fusca est une argile de décarbonatation formée lors des

processus pédogénétiques du tertiaire puis modifiée chimiquement par d'autres cycles, avec une phase principale de rubéfaction (déshydratation des oxydes de fer à l'origine de la couleur rouge vif de cette argile) ;

- **les limons éoliens** quaternaires qui couvrent de place en place la terra-fusca ou se mélangent à elle ;

- **les alluvions anciennes** se trouvent uniquement sur les plateaux, toujours mélangées à la terra-fusca et aux limons éoliens. Ces alluvions sont très facilement reconnaissables grâce aux galets de quartz roulés qu'ils renferment ;

- **les colluviums** couvrent toutes les pentes. Ils résultent de l'érosion et du mélange des formations présentes sur les plateaux avec le substrat calcaire plus ou moins démantelé ;

- **la grouine** est un amas de cailloutis calcaires très fins que l'on rencontre dans les fonds de vallons, sur les pentes ou parfois sur les plateaux.

### 2 - Processus pédogénétiques et principaux types de sols

La pédogénèse sur les plateaux calcaires est liée, d'une part, aux processus de décarbonatation, et, d'autre part, aux processus de désaturation et de lessivage. Ces deux processus, associés à la présence ou à l'absence de formations superficielles conditionnent directement la nature de l'humus et le type de sol.

#### 2.1 - Décarbonatation

La décarbonatation, c'est à dire la dissolution des éléments calcaires en place, se fait par trois voies différentes : 1) attaque par le gaz carbonique contenu dans les eaux de pluies ou provenant de la respiration racinaire et bactérienne ; 2) action des acides organiques provenant de la litière ; 3) action de l'azote nitrique provenant de la minéralisation de l'azote organique.

Selon la pureté initiale des formations calcaires et en fonction de la situation topographique, les phénomènes de décarbonatation vont conduire à l'accumulation plus ou moins importante de résidus argileux. En position de plateau, si la roche calcaire est très pure, il n'y a pas d'accumulation de produits résiduaires ; le sol reste carbonaté (rendzine). Si le calcaire est impur, il y a accumulation de matériaux puis disparition progressive des carbonates sur des profondeurs variables ; le sol évolue vers le type sol brun. En situation de pente, les argiles de décarbonatation ne peuvent s'accumuler (sauf sur les pentes faibles). Par colluvionnement, il y a recharge continuelle en éléments calcaires et les sols restent carbonatés (rendzine ou rendzine brunifiée).

#### 2.2 - Désaturation et lessivage

Ces processus n'interviennent qu'en situation de plateau et s'il existe une accumulation de produits résiduaires.

Lorsque le front de décarbonatation est à moins de 20 cm de la surface, le profil reste entièrement saturé en cations échangeables. Si le matériel décarbonaté a une épaisseur de plus de 20 cm, le profil est **désaturé** par l'entraînement des cations ($Ca^{++}$, $Mg^{++}$, $Na^{+}$, $K^{+}$) à l'état de sels ou de complexes organo-minéraux solubles. Le complexe absorbant se désature progressivement et le pH s'abaisse. Cependant, par le jeu du cycle biologique et grâce à la proximité du substrat calcaire, le profil est continuellement rechargé en ions $Ca^{++}$ et $Mg^{++}$. Les sols ne sont donc jamais très désaturés ou très acidifiés sur les plateaux calcaires (taux de saturation de l'horizon $A_1$ toujours supérieur à 40% et pH toujours supérieur à 5).

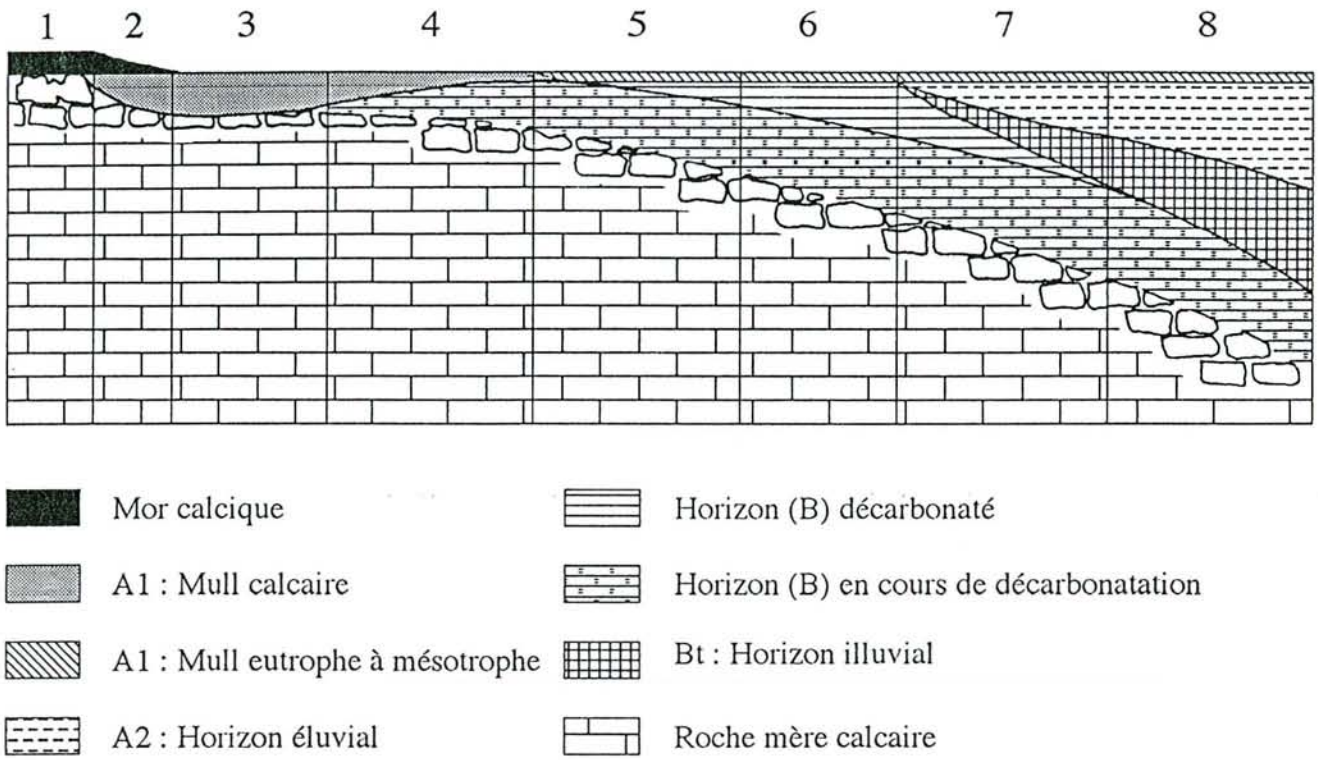



**Figure 81** : Représentation schématique des différents types de sol sur les plateaux calcaires du Nord-Est de la France (d'après Becker *et al.*, 1980).

- 1 - sol lithocalcique
- 2 - sol humocalcaire
- 3 - rendzine
- 4 - rendzine brunifiée
- 5 - sol brun calcique
- 6 - sol brun eutrophe
- 7 - sol brun lessivé
- 8 - sol lessivé

Si le front de décarbonatation devient supérieur à 55 cm (taux de saturation inférieur à 70%), l'absence de carbonate entraîne la dispersion des argiles qui s'infiltrent en profondeur sous l'action des eaux de pluie. Il y a alors formation par **lessivage** d'un horizon $A_2$, appauvri en argile et en fer libre, et formation d'un horizon sous-jacent $B_t$ enrichi par ces éléments et resaturé.

### 2.3 - Les humus

Les types d'humus sont directement liés à la présence ou à l'absence de calcaire dans l'horizon $A_1$. Si le calcaire est présent, l'humus est de type mull calcaire, noir et épais (plus de 15 cm), avec un pH variant entre 7 et 7,5. En l'absence de calcaire, l'humus est un mull eutrophe ou un mull mésotrophe. L'épaisseur d'incorporation de la matière organique varie alors respectivement entre 15 et 5 cm. Le pH du mull eutrophe varie entre 6 et 7 et le taux de saturation est supérieur à 85%. Pour le mull mésotrophe, ce taux descend entre 30 et 85% et le pH se situe entre 5 et 6.

### 2.4 - Principaux types de sol

En situation de plateau, la profondeur de décarbonatation induit le type de sol (Figure 81).

En l'absence d'évolution de la roche mère, la matière organique se dépose directement sur le calcaire en dalle pour former un *mor calcique*. Le sol est un *lithosol* ou *lapiaz*, dont le profil type est $A_0$ - C.

Au stade suivant il y a fragmentation du calcaire. La matière organique et la matière minérale se superposent pour former un horizon $A_1$. Ce profil est un sol *humocalcaire* à *mor calcique* ($A_0$ - $A_1$ - C).

Si la quantité d'argile est suffisante, il y a formation d'un complexe argilo-humique stable (*mull calcaire*). Si le profil est de type $A_1$ - C, le sol est une *rendzine*. Si un horizon (B) s'intercale entre les deux horizons précédents, le sol est une *rendzine brunifiée*.

Quand le calcaire est absent de l'horizon $A_1$, le mull est de type mull eutrophe ou mull calcaire. Si la profondeur de décarbonatation est inférieure à 20 cm, le sol est de type *brun calcique* ; si elle est supérieure à 20 cm, c'est un *sol brun*.

Après l'étape de désaturation viennent les phénomènes de lessivage avec formation d'un horizon $A_2$ et $B_t$. Le sol est alors de type *brun lessivé* ou *lessivé*. L'humus est alors un mull eutrophe ou un mull mésotrophe.

## 3 - Flore des plateaux calcaires

La composition de la végétation d'une surface forestière est la résultante de la flore régionale et des conditions d'environnement physique et biotique. Pour simplifier, nous dirons que sur les plateaux calcaires, la diversité floristique est principalement liée aux conditions édaphiques (pH, nutrition minérale et alimentation en eau) et secondairement aux conditions méso-climatiques (principalement la température qui est liée à la position topographique : rebord de plateau, fond de vallon ...).

Les espèces végétales caractérisées par des exigences comparables vis-à-vis des facteurs environnementaux peuvent être rassemblées en groupes écologiques (ou groupes socio-écologiques). Si aucune interprétation écologique des groupes ne peut être faite, ce sont des groupes sociologiques. Les espèces végétales formant chaque groupe sont répertoriées en annexe 5. Les groupes écologiques s'ordonnent ainsi :

*** Groupes écologiques sensibles au pH du sol** : dans cet ensemble, les groupes s'ordonnent principalement selon un gradient décroissant du taux de saturation du sol.

**- 1 -** ***groupe des xérocalcaricoles thermophiles***: le caractère thermophile et xérotolérant de ces espèces est le plus marqué. Certaines d'entre elles caractérisent plus les lisières et les milieux ouverts que les peuplements forestiers. Elles ont donc un caractère héliophile plus ou moins net.

**- 2 -** ***groupe des xérocalcaricoles*** : le caractère xérophile s'atténue dans ce groupe par rapport au précédent. Les espèces sont surtout des calcaricoles affirmées.

**- 3 -** ***groupe des calcaricoles*** : renferme toutes les espèces calcaricoles très répandues sur les plateaux calcaires. L'absence de ce groupe peut ainsi avoir une signification très forte pour la définition de certaines stations.

**- 4 -** ***groupe des neutrophiles à large amplitude*** : ce groupe est composé par l'ensemble des espèces que l'on trouve partout, quelque soit le type de station.

**- 5 -** ***groupe des neutroacidoclines*** : l'apparition de ce groupe indique un début de désaturation de l'humus, sans que l'on puisse toutefois parler d'acidification.

**- 6 -** ***groupe des acidoclines*** : avec ce groupe on franchit une étape supplémentaire dans les processus de désaturation. Ce groupe possède une faible amplitude écologique et son optimum se situe sur les humus à complexe absorbant non saturé.

**- 7 -** ***groupe des acidophiles*** : l'optimum d'acidité correspondant aux espèces formant ce groupe n'est jamais atteint sur les plateaux calcaires. Leur présence indique cependant une désaturation très poussée du sol.

*** Groupes écologiques sensibles à la disponibilité en azote :** les espèces de ces groupes sont caractérisées par des exigences plus ou moins strictes quant à la disponibilité d'azote dans le sol. Il faut noter toutefois que la disponibilité en azote minéral n'est pas indépendante de la présence ou de l'absence de calcaire : la présence de calcaire dès la surface réduit la minéralisation (cas des mull calcaires). La quantité d'azote minéral est plus forte dans les mull eutrophes à mésotrophes (plus forte ammonification mais nitrification identique à celle des mull calcaires). Une exception cependant : dans les sols bruns calcaires colluviaux, la recharge permanente en calcaire est contrebalancée par l'augmentation de l'activité biologique. La minéralisation est rapide ; l'azote nitrique est fortement disponible et l'humus est du type mull eutrophe.

**- 8 -** ***groupe des neutronitroclines*** : les espèces de ce groupe ont une préférence plus ou moins marquée pour les sols à nutrition azotée (principalement) optimale, mais avec cependant une relative amplitude.

**- 9 -** ***groupe des neutronitrophiles*** : les exigences de ce groupe sont identiques au groupe précédent mais avec une amplitude beaucoup plus faible autour de l'optimum.

*** Groupes écologiques sensibles aux conditions d'alimentation en eau :** les espèces de ces groupes requièrent une disponibilité en eau importante.

**- 10 -** ***groupe des hygro-neutronitrophiles*** : en plus du besoin en eau (sans excès cependant), les espèces de ce groupe exigent un niveau trophique optimal. Certaines espèces peuvent présenter un caractère hygrophile ou nitrophile plus marqué.

**- 11 -** ***groupe des neutrohygrophiles*** : le facteur caractérisant ce groupe est la nécessité d'une alimentation en eau constante et élevée.

*** Groupes écologiques sensibles aux conditions méso-climatiques:**

- **12 - *groupe des espèces à affinités montagnardes*** : les espèces de ce groupe se rencontrent sur les versants exposés au nord et où l'air froid s'accumule (fonds de vallons encaissés).

- **13 - *groupe des éboulis calcaires ombragés*** : ce groupe est très localisé et spécifique à l'érablière à scolopendre.

## III - ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES

Quelques analyses préliminaires ont tout d'abord été réalisées afin de mettre en évidence les paramètres les plus adaptés aux objectifs de description et de classification de nos relevés. Nous avons ainsi pu mettre en évidence que les espèces rencontrées une ou deux fois produisent un bruit de fond indésirable, cachant les réelles ressemblances floristiques entre les relevés. Ces espèces sont alors considérées comme "supplémentaires", c'est à dire inactives dans les analyses.

L'axe principal de différenciation de la flore est apparu comme un gradient de pH. Cependant, deux placettes seulement appartiennent à un type de station "très" acide. Ce pôle acidiphile extrême dans le nuage des espèces cache la variabilité au sein des autres relevés : les deux placettes incriminées sont alors placées en individus supplémentaires.

Afin de minimiser l'influence de la gestion sylvicole, les essences notées dans la strate arborescente sont supprimées et les strates arbustive et herbacée sont regroupées.

L'analyse factorielle des correspondances a donc été réalisée *in fine* à partir de cent relevés actifs et deux relevés supplémentaires. Cent vingt deux espèces sur les cent quatre vingt six rencontrées participent à l'analyse en présence - abscence. L'utilisation des coefficients d'abondance - dominance serait préférable pour analyser des axes d'ordre élevé (axe 3, 4 ou 5), mais ils ne modifient pas l'information véhiculée par le plan formé par les axes 1 et 2.

Les deux premiers axes factoriels suffisent à la définition des stations. Même si l'axe 3 peut être interprété biologiquement, il n'apporte pas d'information fondamentale dans cette définition (Becker, 1979). Le plan des axes 1 et 2 de l'AFC absorbe 12,69% de la variance totale du nuage de points dont 7,9% pour le seul axe 1. L'axe 3 représente 4,46% de la variance. La signification écologique de ces trois axes est mise en évidence grâce à l'étude de la répartition des espèces le long de ces axes en utilisant, soit les groupes écologiques, soit les coefficients d'Ellenberg qui permettent une bonne approche générale des résultats.

Si on cherche les meilleures corrélations existant entre les coordonnées des espèces sur les différents axes et les coefficients d'Ellenberg, nous constatons que les premiers axes peuvent être interprétés comme des gradients de quelques facteurs écologiques :

- l'axe 1 est corrélé positivement avec les coefficients F et N (0,48 et 0,45) et négativement avec le coefficient R (-0,31) ;
- l'axe 2 est corrélé négativement avec les coefficients R et N (-0,35 et -0,27) ;
- l'axe 3 est corrélé négativement avec le coefficient L (-0,30).

### 1 - Interprétation de l'axe 1

La figure 82 présente les espèces contribuant le plus à l'élaboration des axes 1 et 2, et bien représentées dans ce plan (variable "best"=1 ou 2 pour une inertie minimum de 90% (procédure CORRESP, SAS, 1988)), et la figure 83 représente les positions moyennes de chacun des groupes écologiques sur le même plan factoriel.

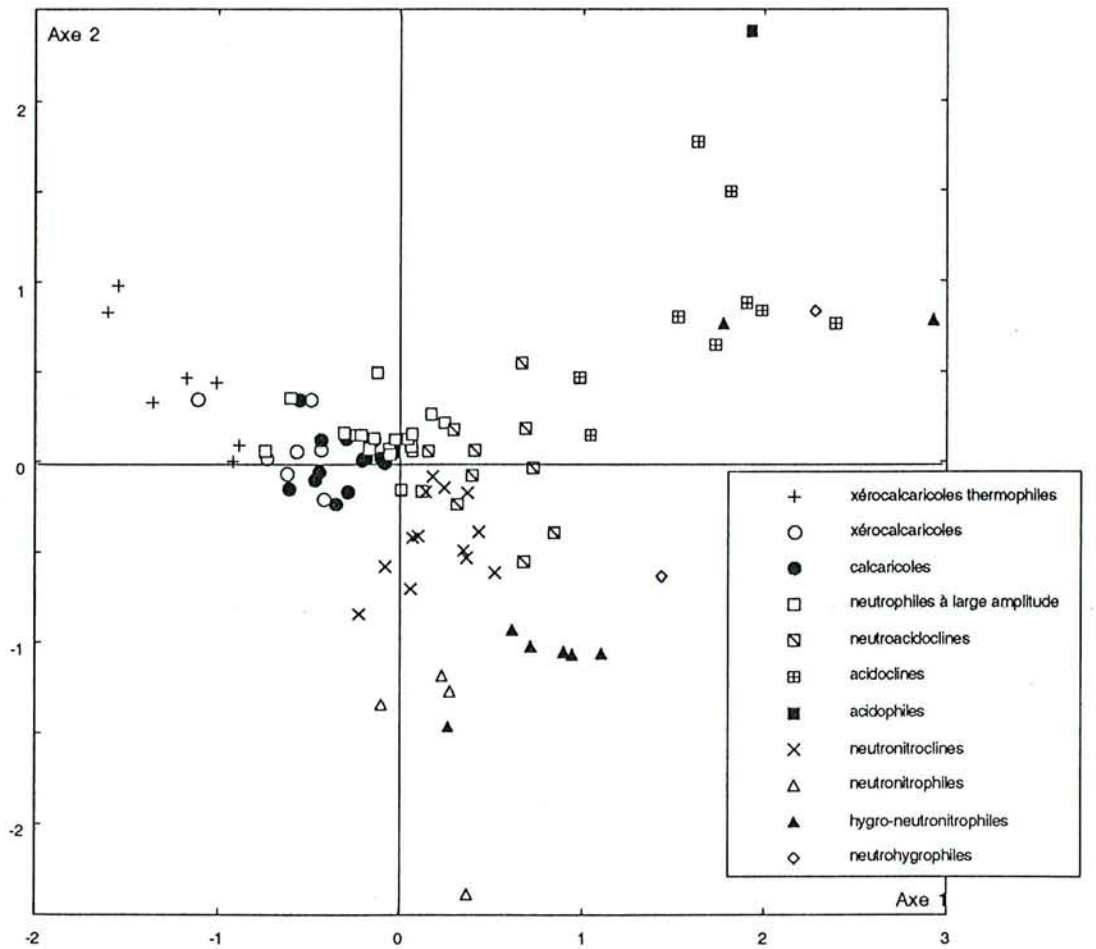



**Figure 82** : Distribution des espèces participant de façon significative à l'élaboration des axes factoriels 1 et 2, et espèces les mieux représentées dans ce plan (95 espèces représentées sur 122 espèces actives).

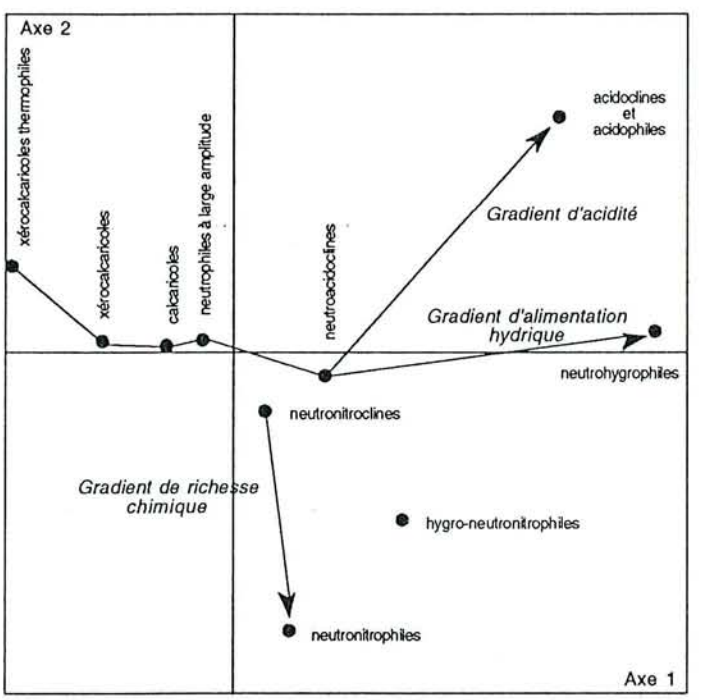



**Figure 83** : Représentation des coordonnées moyennes des groupes écologiques sur le plan formé par les axes factoriels 1 et 2. Toutes les espèces actives sont prises en compte dans le calcul de ces points moyens.

Sur les 122 espèces actives, une vingtaine contribue à plus de 50% à l'édification de l'axe 1. De part et d'autre de cet axe s'opposent, d'une part, les espèces xérocalcaricoles et calcaricoles (groupes écologiques 2 et 3) avec *Buglossoides purpurocaerulea, Carex digitata, Carex montana, Hepatica nobilis, Sorbus torminalis, Viburnum lantana*, et d'autre part, les espèces acidoclines et acidophiles (groupe écologiques 6 et 7) avec *Athyrium filix-femina, Dryopteris carthusiana, Epilobium montanum, Galeopsis tetrahit, Luzula luzuloides, Moehringia trinervia, Rubus idaeus, Rumex acetosa, Veronica montana.* L'alisier torminal, la laîche des montagnes ou la laîche glauque ont, à l'intérieur de la région étudiée, une répartition bimodale : elles correspondent soit au groupe des xérocalcaricoles, soit au groupe des acidoclines. Dans le cas particulier de notre étude, elles sont rattachées au groupe des xérocalcaricoles.

Entre ces extrêmes, les groupes écologiques sensibles au pH du sol s'organisent régulièrement : groupe des neutrophiles (*Corylus avellana, Potentilla sterilis*) ; groupe des neutroacidoclines (*Deschampsia caespitosa, Luzula pilosa, Milium effusum*). L'interprétation de l'axe 1 est donc immédiate : il correspond principalement à un gradient de pH très net. Sur les sols calcaires de la région étudiée, ce gradient de pH est très fortement corrélé aux possibilités d'alimentation en eau, ce qui explique la forte corrélation obtenue entre les coordonnées des espèces sur l'axe 1 avec le coefficient F d'Ellenberg.

Parmi les espèces les plus actives sur cet axe se trouvent, jointes au groupe des espèces acidoclines, des espèces hygro-neutronitrophiles (*Rumex acetosa, Urtica dioica*). Elles n'ont été rencontrées que sur les stations les plus acides ; elles sont donc groupées avec elles. La présence de ces espèces à une extrémité de l'axe 1 explique donc en partie la forte corrélation que nous avons obtenue avec le coefficient N d'Ellenberg. Elles n'indiquent pas dans ce cas particulier de fortes conditions d'approvisionnement en azote (les autres espèces neutronitrophiles ne les accompagnent pas), mais plutôt de bonnes conditions d'alimentation hydrique. On trouve également avec ces espèces le groupe des neutrohygrophiles (comme *Eupatorium cannabinum*). L'axe 1 est donc également un axe de disponibilité en eau.

### 2 - Interprétation de l'axe 2

L'axe 2 n'oppose pas deux groupes d'espèces. Sur les quatorze espèces contribuant à 50% au déterminisme de cet axe, on trouve à une extrémité neuf hygro-neutro-nitrophiles et trois neutronitroclines. La présence de ces groupes écologiques indique donc clairement l'existence d'un pôle de nutrition optimal que caractérisent des espèces exigeantes ou très exigeantes quant à la nutrition azotée. Ces espèces ne sont pas spécifiquement calcicoles ou acidophiles.

A l'autre extrémité de l'axe 2, se trouvent au contraire des espèces principalement calcicoles, mais surtout acidiphiles, peu exigeantes en azote et déjà discriminées par l'axe 1. Il n'existe pas d'espèces très peu exigeantes en azote qui ne soient pas spécifiquement liées au pH du sol. La plus forte proportion d'espèces acidiclines par rapport aux espèces calcicoles, s'opposant aux groupes exigeants en azote, explique la forte corrélation que nous avons obtenue entre les coordonnées de l'axe 2 avec le coefficient R d'Ellenberg.

L'axe 2 correspond donc clairement à un axe de nutrition azotée.

### 3 - Interprétation de l'axe 3

Les espèces contribuant le plus à la formation de cet axe sont très peu nombreuses. Quelques unes, héliophiles et nécessitant un bon niveau de nutrition (*Eupatorium canabinum, Carex muricata, Hypericum hirsutum, Arctium nemorosum*), s'opposent à des espèces plus sciaphiles et moins gourmandes (*Dryopteris carthusiana, Luzula luzuloïdes, Carex sylvatica, Athyrium filix-femina*).

L'axe 3 correspond donc, comme l'axe 2, à un gradient de nutrition minérale, mais surtout à un gradient de lumière, comme nous l'ont montré les corrélations avec les coefficients d'Ellenberg.

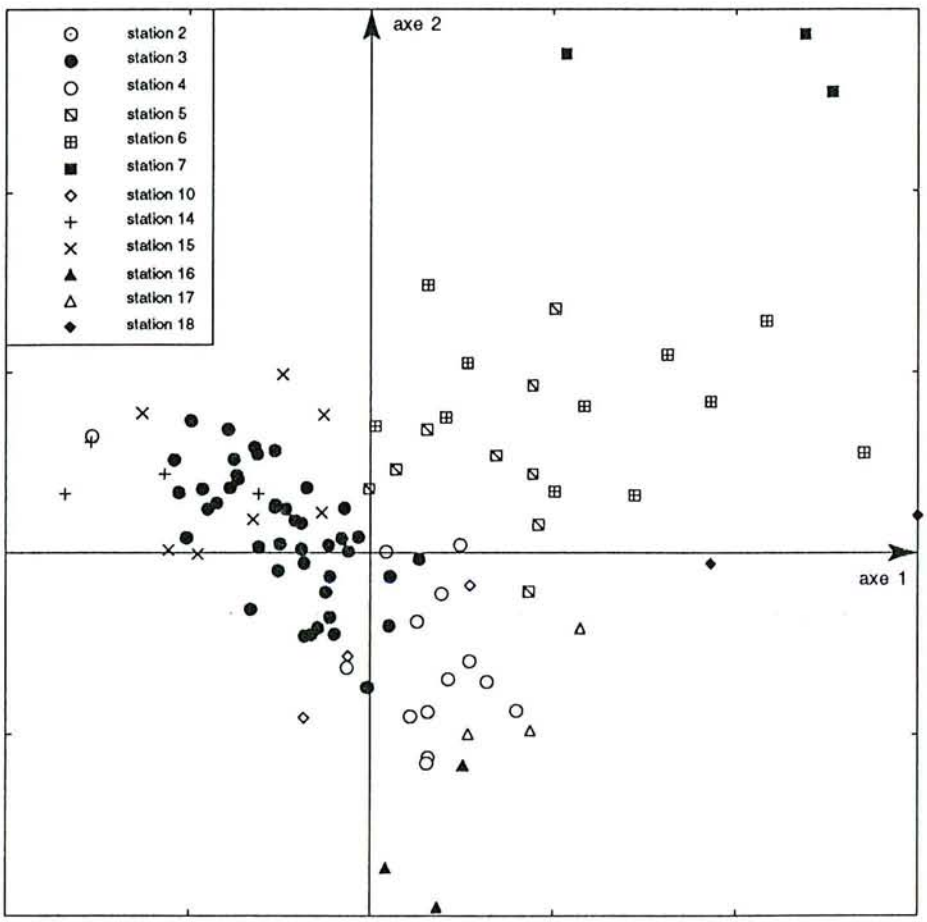



**Figure 84** : Distribution des 102 placettes et des 12 types de stations sur le plan formé par les axes factoriels 1 et 2 calculés à partir des espèces végétales.

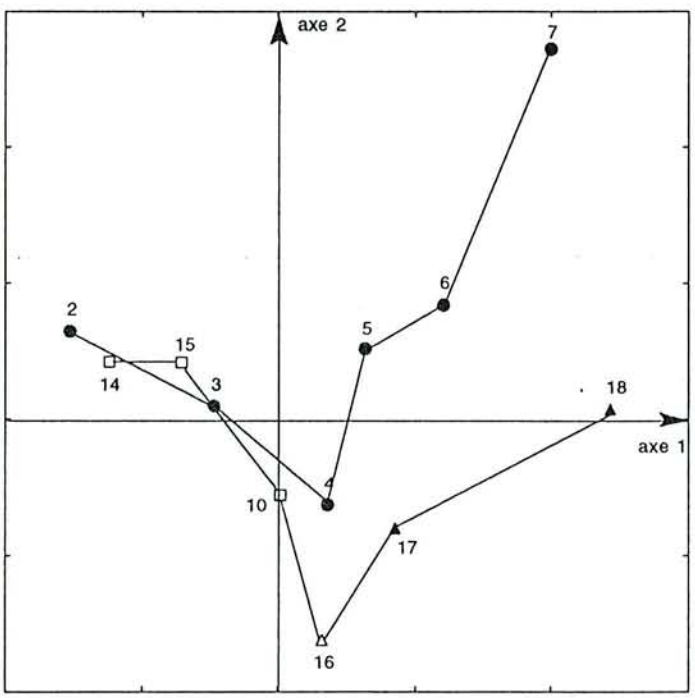



**Figure 85** : Représentation des coordonnées moyennes des types de stations sur le plan formé par les axes factoriels 1 et 2. Deux groupes de stations sont séparés : les stations de plateau (n°2 à 7) d'une part et, d'autre part, les stations de versants (n°10, 14, 15), les stations de bas de pentes (n°16) et les stations de fonds de vallons (n°17 et 18).

### 4 - Conclusion

L'analyse statistique de la flore permet de mettre en évidence deux gradients écologiques principaux : d'une part, le pH, fortement corrélé aux possibilités d'alimentation en eau, et, d'autre part, un gradient de nutrition azotée. Ces résultats concordent parfaitement avec ceux d'études antérieures réalisées dans la même région naturelle, notamment ceux de Becker (1979). La concordance de ces résultats devrait pouvoir nous permettre de définir des types stationnels à partir des groupes écologiques en présence dans les relevés, selon le descriptif des unités présentées dans le catalogue des plateaux calcaires de Lorraine.

## IV - CLASSIFICATION DES TYPES DE STATIONS

L'identification des stations forestières à partir des groupes écologiques en présence dans chacun des relevés et à partir de la position de ces relevés projetés dans l'espace factoriel défini par les espèces, a été grandement simplifiée par l'utilisation des clés de déterminations et des caractères diagnostiques présentés dans le catalogue des plateaux calcaires de Lorraine.

La réalisation d'un tableau phytosociologique diagonalisé, pour visualiser les groupes d'espèces et les groupes de relevés, s'est révélée inutile. Dans notre cas, la diagonalisation devrait prendre en compte deux facteurs codominants : le pH et la nutrition azotée. La création d'un tel tableau est malcommode. La classification des relevés à l'aide de procédures automatiques comme la classification ascendante hiérarchique (CAH) ou la classification non hiérarchique sur centres mobiles (procédure FASTCLUS de SAS, 1988) s'est révélée inefficace. Puisque notre variabilité stationnelle est limitée et comme certaines stations sont extrêmement peu représentées par rapport à d'autres, ces procédures de tri engendrent des divisions sans rapport avec les types de stations décrits par ailleurs.

La clé d'identification des stations forestières, élaborée par Becker *et al.* (1980), repose tout d'abord sur un simple classement topographique : stations de plateaux, de versants et de fonds de vallons. En situation de plateau, le déterminisme stationnel est principalement édaphique. Pour les versants et fonds de vallons il est à la fois édaphique et méso-climatique.

Après avoir trié nos relevés en fonction des caractéristiques topographiques de la placette, il est possible de les ordonner suivant l'importance des groupes écologiques (nombre d'espèces présentes dans le groupe ; valeur indicatrice des espèces du groupe ; coefficient d'abondance-dominance). Le groupe écologique doit cependant être utilisé avec attention. Chaque groupe possède un optimum pour un facteur du milieu donné (voire deux) et une certaine tolérance vis-à-vis de ce facteur. Le passage d'un type de station à un autre ne se fait pas de façon brusque, mais progressivement avec remplacement ou apparition progressive de l'un ou l'autre des groupes écologiques d'espèces. A cette notion d'ensemble flou, se superpose l'action de l'homme qui peut perturber ponctuellement et à court terme, ou modifier à long terme la végétation. La définition de nos types de stations doit donc se faire en recherchant tout d'abord nos relevés les plus typiques d'une des stations décrites dans le catalogue, puis en ordonnant progressivement les autres relevés de façon cohérente autour des types clefs précédemment définis.

La répartition des placettes dans l'espace des axes factoriels 1 et 2 correspond, comme la flore, à une forme triangulaire. A l'extrémité négative de l'axe 1 se situe un pôle calcicole, voire xéro-calcicole. Au centre de l'axe 1, et du côté des valeurs négatives de l'axe 2, se trouve un pôle neutrophile. Enfin, aux extrémités positives des axes 1 et 2, se situe un pôle méso-acidiphile. A partir de ces trois pôles, nous pouvons choisir un certain nombre de relevés "type", les identifier et progresser de proche en proche vers le centre du nuage. La figure 84 présente la disposition de l'ensemble des relevés sur le plan factoriel formé par les axes 1 et 2, ainsi que les types de stations que nous avons déterminés. La figure 85 donne la disposition moyenne de chacun des types de stations que nous avons identifiés.

### 1 - Stations de plateaux

Les stations forestières de plateaux décrites dans le catalogue sont au nombre de huit, depuis les lithosols jusqu'à la hêtraie-chênaie mésohygroacidophile. Entre ces deux stations extrêmes, les groupes écologiques d'espèces sont structurés selon deux gradients : une diminution progressive des espèces calcicoles et une augmentation des espèces acidiphiles ; une amélioration de la nutrition azotée.

| Groupes écologiques | Station 2 | Station 3 | Station 4 | Station 5 | Station 6 | Station 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 11 | 2 | | | | |
| 2 | 14 | 11 | 3 | 2 | 2 | |
| 3 | 30 | 27 | 15 | 16 | 13 | 4 |
| 4 | 21 | 27 | 23 | 25 | 21 | 20 |
| 5 | 5 | 9 | 12 | 16 | 21 | 16 |
| 6 | | | 1 | 9 | 14 | 15 |
| 7 | | | | 1 | 5 | 30 |
| 8 | 5 | 15 | 21 | 19 | 15 | 9 |
| 9 | | 3 | 10 | 3 | 5 | |
| 10 | | | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Nombre de placettes | 1 | 43 | 13 | 9 | 11 | 3 |
| pH | 6,26 | 6,5 | 6,4 | 6,2 | 5,37 | 5,3 |
| Décarbonatation (cm) | 10 | 18 | 20 | 30 | 110 | 137 |
| Indice de réserve utile (mm) | 15 | 27 | 27 | 40 | 100 | 127 |

**Tableau 23** : Pour chaque type de station décrit à partir de nos relevés, la fréquence d'apparition des groupes écologiques est présentée (%) ainsi que le nombre de relevés considérés, le pH de l'horizon A1, la profondeur de décarbonatation et la réserve utile.

La **première station**, caractérisée par des lithosols, est très rare et toujours absente sur les côtes de Moselle.

La **station n°8**, est la station la plus acide que l'on puisse rencontrer sur les plateaux calcaires. Les espèces calcaricoles y sont rares (voire quelques espèces du groupe 3), par contre le groupe des acidophiles est très bien représenté. Le pH de l'horizon $A_1$ est en général inférieur à 5. Sur l'ensemble de nos relevés seulement quatre espèces du groupe 7 ont été relevées sur un groupe qui en comporte dix, et le pH le plus bas que nous ayons mesuré dans l'horizon $A_1$, n'est jamais inférieur à 5. Aucun de nos relevés ne semble donc correspondre à ce type de station, d'ailleurs relativement rare.

Le groupe des espèces neutroacidoclines n'est jamais absent de nos relevés. Son importance est variable, mais sa présence constante indique un début de désaturation de l'humus. Nous avons également toujours pu mettre en évidence en surface une épaisseur variable de matériel décarbonaté et les pH mesurés sur les horizons $A_1$ ne dépassent que très rarement la valeur de 7,5. Ces remarques nous incitent à présumer de l'absence du type de **station n°2** : la hêtraie-chênaie xérophile à seslérie.

A l'extrémité négative de l'axe 1, les espèces des groupes 1, 2, 3, 4, 5 et 8 sont représentées dans les relevés. Parmi ceux-ci, des partitions pourraient être faites car de petites variations affectent la proportion de chacun des groupes d'espèces : le groupe 1, quoique toujours assez faiblement représenté, peut totalement disparaître ; l'importance des groupes 5 et 8 augmente au fur et à mesure que l'on se rapproche du centre de l'axe mais garde toujours des proportions moyennes. Pourtant, les groupes écologiques 3 et 4 sont toujours majoritaires, les groupes 6, 9 et 10 ne sont jamais représentés par plus de une ou deux espèces et le groupe 7 est toujours absent. Le type de sol est en général une rendzine brunifiée. Le pH de l'horizon $A_1$ est égal à 6,5 en moyenne, et le sol semble décarbonaté sur moins de 20 cm (Tableau 23). Ces quarante quatre premières placettes correspondent à la description du type de **station n°3**. On peut toutefois noter qu'à l'extrémité la

plus négative de l'axe 1, se trouve un relevé ayant un caractère bien plus calcicole que les autres (les groupes écologiques 5 et 8 sont extrêmement peu représentés et le groupe 1 l'est par contre très fortement. La réserve utile calculée est de 10 mm et le pH acide de l'horizon A1 (6,26) est typique de celui d'un mor calcique où la matière organique est immobilisée). Dans le plan 1-2 de l'AFC, ce relevé est nettement séparé des autres. Il semble donc appartenir au pôle le plus calcicole du type de station 3, voire au type de station 2.

Vient ensuite un ensemble de placettes où le groupe écologique n°1 a totalement disparu. Les groupes 2 et 3 diminuent fortement et, parallèlement, les groupes 5 et 8 augmentent. Le groupe 6, mais surtout, les espèces neutronitrophiles et hygro-neutronitrophiles apparaissent. Ces placettes semblent appartenir au type de **station n°4** décrit dans le catalogue et sont au nombre de quatorze. Pourtant, le groupe écologique n°9 (espèces neutronitrophiles) n'est jamais "très représenté". Le type de sol est en général un sol brun calcique, mais les paramètres comme le pH varient peu comparativement au type de station précédent (pH de 6,4 en moyenne ; profondeur de décarbonatation proche de 20 cm ; réserve utile de 27 mm ; profondeur de l'horizon C de 48 cm). Il semblerait donc que ces quatorze placettes fassent bien partie du type de station 4 comme le montrent les changements de flore, mais en limitant les milieux échantillonnés, nous n'avons vraisemblablement pas choisi de placettes vraiment typiques de ce type de station.

La station suivante est plus typique. Le pH de l'horizon $A_1$ diminue vers des valeurs proches de 6, la profondeur de décarbonatation et la réserve utile augmentent sensiblement (respectivement 30 cm et 40 mm). Le groupe écologique n°2 régresse fortement et peut même être absent. Les groupes 5 et 6 augmentent et le groupe 7 apparaît ce qui montre un évolution vers le pôle acidiphile du nuage de points. Les espèces des groupes 8, 9 et 10 régressent mais sans toutefois disparaître complètement. Le sol évolue vers la série des bruns eutrophes. Les neuf placettes correspondant à cette description font partie du type de **station 5**.

Enfin aux extrémités positives des axes 1 et 2 se trouvent des relevés où la flore acidiphile devient très nettement majoritaire par rapport à la flore calcicole. Les espèces neutronitroclines et neutronitrophiles diminuent fortement jusqu'à disparaître. Le pH de l'horizon A1 s'approche de 5 et la profondeur de décarbonatation dépasse le mètre. Les sols deviennent des sols bruns lessivés ou même lessivés. Onze relevés font partie du type de **station 6** et trois relevés, au caractère encore plus marqué, sont classés dans le type de **station n°7**.

### 2 - Autres stations : pentes, bas de pentes et fonds de vallons

En supplément des huit stations forestières de plateau, onze types ont été décrits pour caractériser les situations de pentes et de fonds de vallons par Becker *et al.* (1980). La diversité de ces types stationnels est due à des caractéristiques édaphiques, mais ici, les conditions méso-climatiques prennent une grande importance et entraînent une variabilité qui n'existe pas sur les plateaux. Sur le plan édaphique, les pentes et les fonds de vallons se caractérisent par une accumulation plus ou moins grande de matériel colluvionné, lui-même de granulométrie plus ou moins grossière. Les colluvium influencent donc la fertilité stationnelle par le biais de l'épaisseur de sol prospectable par les racines (richesse chimique, profondeur, obstacles à l'enracinement, disponibilité en eau). Sur le plan méso-climatique, il faut prendre en considération l'exposition et l'encaissement. Ces deux contraintes entraînent, soit des climats plus chauds et plus secs que sur les plateaux (cas des versants et hauts de versants exposés au sud), soit des conditions de fraîcheur et d'humidité plus importantes (pentes exposées au nord, nord-ouest, nord-est ou fonds de vallons étroits).

Deux relevés sont situés dans des fonds de vallons très larges. Les conditions d'alimentation hydrique sont très bonnes (réserve utile de 120 et 200 mm), le sol très épais et décarbonaté jusqu'à la profondeur d'un mètre. Ces relevés correspondent au type de **station 18.**

Trois placettes sont situées dans des fonds de vallons étroits. Le pH de l'horizon A1 est plus fort que précédemment et le sol moins épais (réserve utile de 60 mm). Ces relevés correspondent au type de **station 17**.

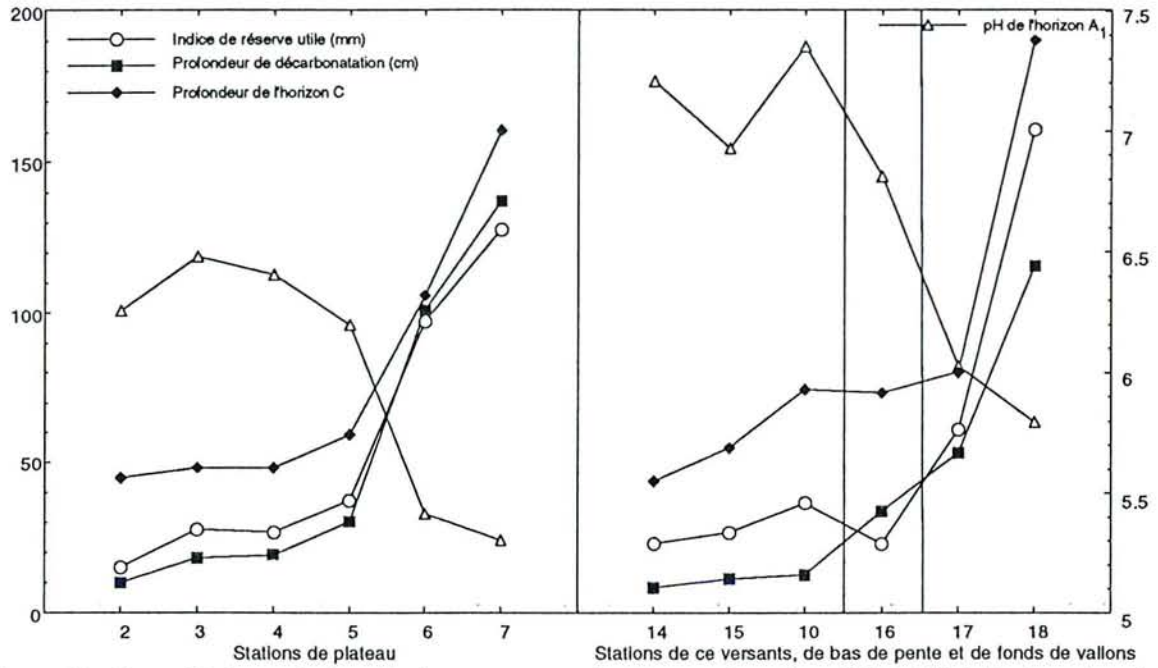



**Figure 87** : Caractéristiques physico-chimiques moyennes des 12 types de stations définis. L'échelle des ordonnées située à gauche du graphique correspond à la profondeur de décarbonatation et à la profondeur de l'horizon C quand elle est lue en cm. Lue en mm, elle correspond à l'échelle des indices de réserve utile. L'échelle des ordonnées située à droite du graphique correspond à l'échelle de pH des horizons A1.

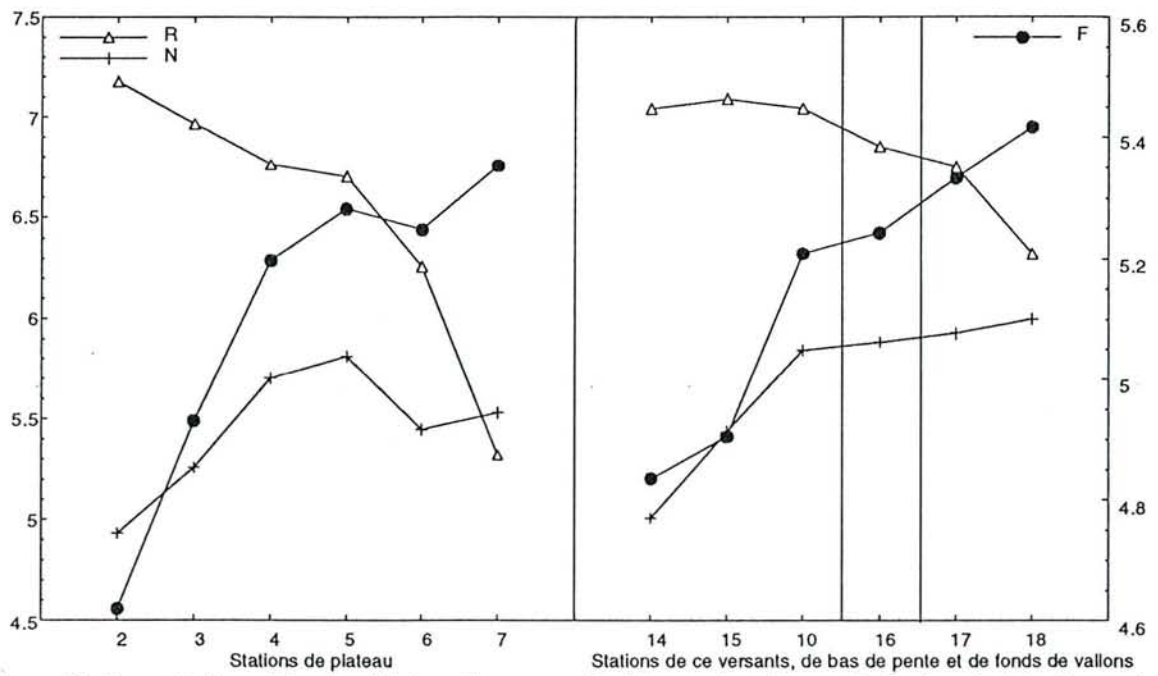



**Figure 88** : Caractéristiques "physico-chimiques" moyennes des 12 types de stations, **estimées** à partir de la flore et des coefficients d'Ellenberg. L'échelle des ordonnées située à gauche du graphique correspond aux coefficients R (caractérisant le pH) et au coefficient N (caractérisant l'azote). L'échelle des ordonnées située à droite du graphique correspond au coefficient F caractérisant l'alimentation hydrique.

Trois relevés sont installés dans des situations de bas de versants exposés au nord et à l'est. Le pH est proche de 7 et la profondeur de décarbonatation peu importante. Les conditions d'alimentation en eau sont assez mauvaises et la réserve utile est estimée à un vingtaine de millimètres. Ces relevés sont classés dans le type de **station 16.**

Trois relevés correspondent à la description précédente, mais ils sont situés sur des versants exposés au nord. Ils correspondent au type de **station n°10.**

Trois relevés sont situés sur des hauts de versants exposés au sud : **station 14.**

Enfin, huit placettes correspondent au type de station de versant : **station n°15.**

### 3 - Caractéristiques physico-chimiques des stations

#### 3.1 - Facteur hydrique et désaturation

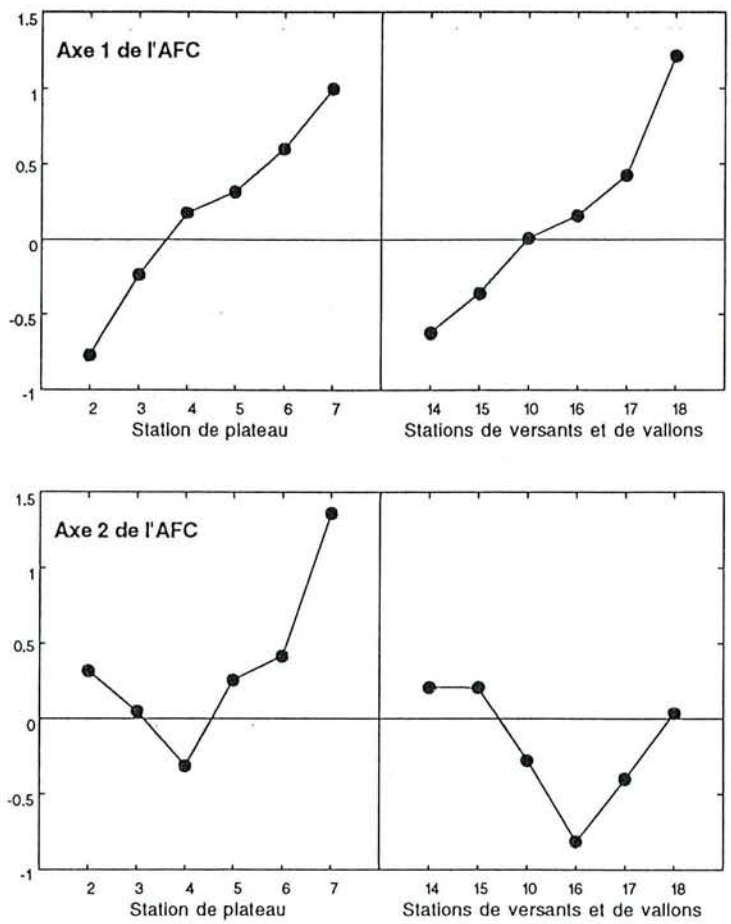



**Figure 86** : Coordonnées moyennes des types stationnels sur les axes 1 (en haut) et 2 (en bas).

Pour chaque placette nous disposons des coefficients d'Ellenberg moyens (cf. § d'introduction de ce chapitre). Ces indices synthétiques sont complétés par quelques mesures et observations physico-chimiques (pH de l'horizon $A_1$, profondeur de décarbonatation, profondeur de l'horizon C, indice de réserve utile). Ces observations, ainsi que les coefficients d'Ellenberg, peuvent être moyennés pour chaque type stationnel défini précédemment.

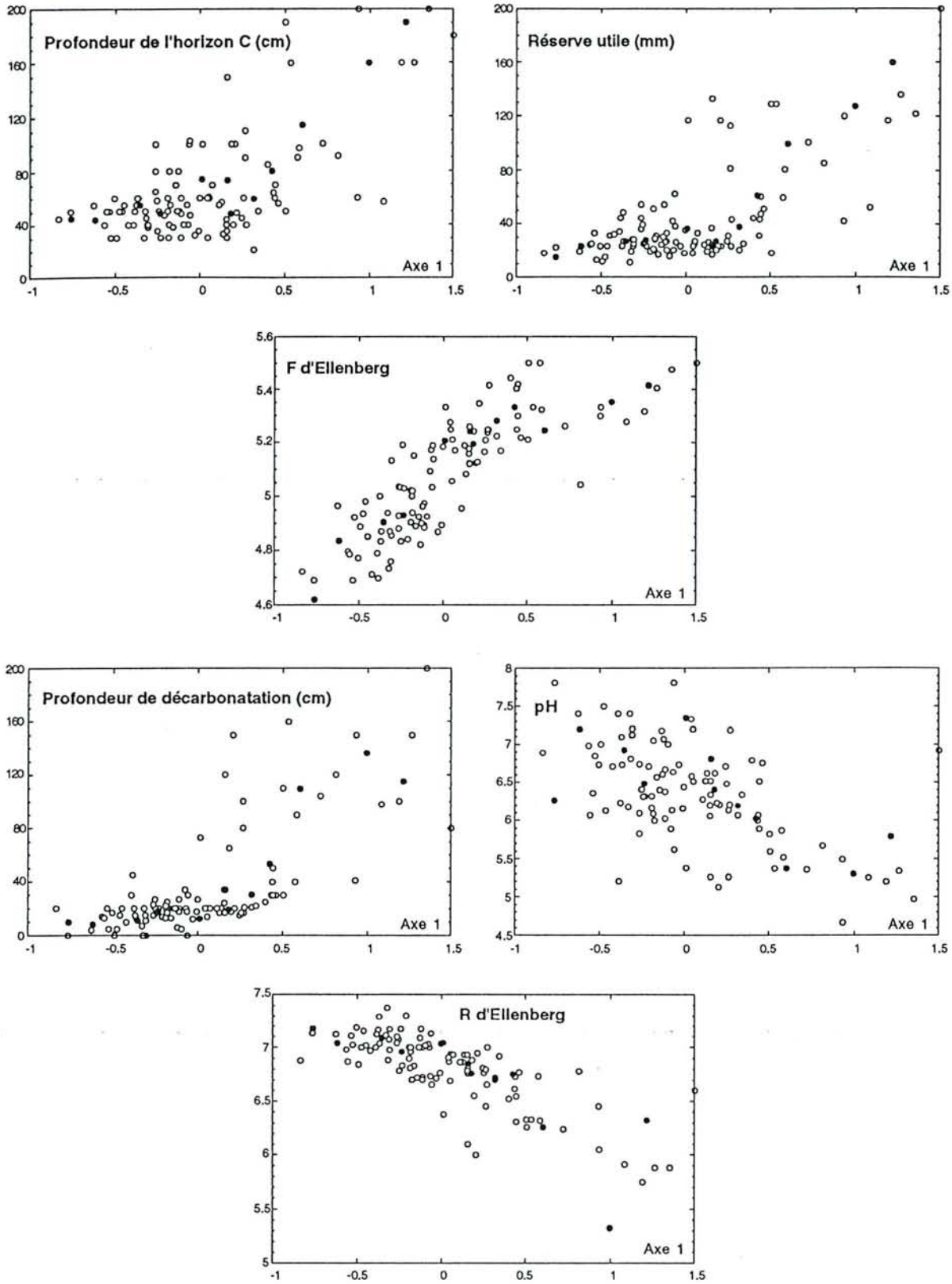



**Figure 89** : Distribution sur le premier axe factoriel des variables physico-chimiques et des coefficients d'Ellenberg moyens caractérisant la disponibilité en eau du sol et le pH de l'horizon A1. Chacune des 102 placettes est figurée par un cercle blanc et chaque type de station par un cercle noir. L'ordre séquentiel des types de stations sur l'axe 1 est : station 2, 14, 15, 3, 10, 16, 4, 5, 17, 6, 7 et 18.

Les différentes stations de plateau, versants, bas de pente et fonds de vallons sont distribuées régulièrement sur les axes factoriels 1 et 2 calculés à partir des relevés floristiques (Figure 86). L'analyse des caractéristiques physico-chimiques et des moyennes des coefficients d'Ellenberg confirme le déterminisme des différents types stationnels et l'interprétation des deux premiers axes factoriels (l'axe 3 n'a pas été étudié ici). Ces résultats sont présentés sur les figures 87 et 88.

L'ordre des stations de plateau est corrélé positivement à une augmentation de la profondeur de décarbonatation et négativement avec la diminution de pH de l'horizon $A_1$. L'augmentation de la profondeur de décarbonatation est intimement liée à une augmentation de la profondeur de l'horizon C et cet épaississement du sol entraîne l'augmentation de la réserve d'eau utile. La séparation des stations de plateau, qui s'opère principalement sur l'axe 1, est donc bien liée d'une part au pH du sol et d'autre part à l'amélioration de l'alimentation hydrique ; ces deux facteurs étant indissociables dans cette position topographique.

Depuis les stations de versants jusqu'aux stations de fonds de vallons, on retrouve les mêmes gradients. Sur les versants, l'absence d'accumulation de matériaux décarbonatés entraîne des pH très forts, bien supérieurs à ceux que l'on peut observer en situation de plateau (stations 10, 14 et 15). Malgré l'apport par gravité d'éléments argileux résiduaires en bas de pente, la recharge permanente en ion calcium de ces colluvions entraîne là encore des pH très forts (station 16). Le pH ne diminue franchement que dans les fonds de vallons, surtout s'ils sont larges (station 18). Comme sur les plateaux, le passage des stations de versants aux fonds de vallons correspond à une augmentation de l'épaisseur de sol, qui est due cette fois à l'augmentation progressive de l'épaisseur de matériel colluvionné. La séparation de ces stations se fait donc, comme en situation de plateau, en fonction de deux facteurs corrélés : la diminution du pH et l'augmentation de la réserve en eau.

Si on compare les caractéristiques physico-chimiques des sols avec les coefficients d'Ellenberg, on s'aperçoit que ces variables sont bien corrélées entre elles. La corrélation entre le coefficient R (caractérisant le pH) est de 0,79 avec la profondeur de décarbonatation ; de 0,69 avec le pH de l'horizon $A_1$ ; de 0,67 avec la réserve utile et de 0,63 avec la profondeur de l'horizon C. La corrélation entre le coefficient F (caractérisant l'alimentation hydrique) est de 0,49 avec l'indice de réserve utile et la profondeur de décarbonatation ; de 0,47 avec la profondeur de l'horizon C et de 0,43 avec le pH de l'horizon $A_1$. Ces résultats semblent démontrer la validité des coefficients d'Ellenberg. Pourtant, même si toutes ces corrélations sont significatives au seuil de un pour mille, elles peuvent paraître faibles, surtout entre le coefficient F et la réserve utile estimée et entre le coefficient R et le pH.

La mise en correspondance des coefficients d'Ellenberg moyens avec les types stationnels (Figure 88) apporte de nouveaux résultats.

En situation de plateau, nous avons remarqué que le passage du type de station 2 au type 7 est corrélé avec une diminution du pH de l'horizon $A_1$. Comme le pH, les valeurs du coefficient R d'Ellenberg diminue, mais de façon plus régulière. En ce qui concerne la disponibilité en eau, les valeurs de réserve utile ainsi que celles du coefficient F augmentent entre ces deux stations extrêmes.

En situation de versant, bas de versant et fond de vallon, on constate également que le coefficient R d'Ellenberg décroît mais de façon moins rapide que le pH, et plus faiblement qu'en situation de plateau. Ceci semblerait montrer qu'à cause d'une recharge permanente des sols en ion calcium notamment (par colluvionnement), la flore garderait un caractère calcicole. En ce qui concerne l'eau du sol, sa disponibilité décroît quand on passe des fonds de vallons (stations 18 et 17) aux bas de pente (station 16) puis aux versants. Sur les versants, le facteur hydrique est également dépendant de l'exposition : en versant nord (station 10) les conditions d'évaporation sont plus faibles, ce qui entraîne des conditions d'alimentation hydrique meilleures qu'en versant sud (station 14). Les pentes exposées entre ces deux points cardinaux ont également un bilan hydrique intermédiaire (station 15). Ce fait a déjà été observé lors de la création du catalogue des stations.

En ce qui concerne la disponibilité en eau d'un sol, il est important de considérer plusieurs points. Entre les stations 2 et 5, la valeur moyenne de la réserve utile augmente, mais relativement faiblement, passant de 15 mm à 40 mm avec pour les stations 3 et 4, une valeur commune proche de 30 mm. L'augmentation de la réserve utile entre nos stations 5 et 7 est ensuite beaucoup plus forte puisque qu'elle est plus que doublée. Le coefficient F d'Ellenberg n'évolue quant à lui pas du tout selon le même schéma : les stations 2 à 5 sont très discriminées alors que les stations 5 à 7 ne présentent pas de grandes différences. D'autre part, les différences entre les stations de pente, bas de pentes et fonds de vallons grâce au coefficient F d'Ellenberg n'étaient pas faciles à observer avec l'utilisation des indices de réserve utile.

On peut comprendre aisément que, puisque la flore herbacée possède un enracinement limité, les besoins en eau puissent être satisfaits à partir d'une certaine épaisseur de sol. Dans ce cas, à partir d'un certain seuil, l'augmentation de la réserve utile, concomitante à l'augmentation de l'épaisseur du sol, ne se traduit plus par de grosses variations dans le cortège floristique : le coefficient F moyen reste stable (cas des stations 5 à 7). Par contre, si les conditions d'alimentation en eau sont limitantes, on observe de grosses différences entre le coefficient F moyen par placette et les caractéristiques physiques du sol. On peut alors émettre deux hypothèses. Premièrement, et contrairement à ce qui a pu être dit (Becker, 1986), la flore herbacée pourrait être dans certains cas un indicateur plus fin que les caractéristiques pédologiques en ce qui concerne la disponibilité en eau d'un sol. Deuxièmement, il existerait effectivement des différences d'ordre pédologique entre les sols des stations 2 à 5 mais leur appréciation serait en partie erronée. Le calcul des indices de réserves utiles est réalisé à partir de l'épaisseur des différents horizons de chaque sol, de la texture estimée sur le terrain, d'un coefficient de rétention et du pourcentage d'éléments grossiers, lui aussi estimé sur le profil pédologique. Cet indice est donc imprécis (erreurs sur la texture et la charge en cailloux principalement ; non prise en considération de la densité apparente de la terre fine (Lévy, 1988) ; non prise en compte de la quantité d'eau contenue dans les cailloux calcaires (Le Tacon, com. pers.)), et ne permet pas de quantifier réellement l'eau disponible dans le sol. Les valeurs que nous avons obtenues ne sont donc que des valeurs relatives, mais elles devraient rester proportionnelles puisque l'opérateur a toujours été le même. Pour limiter les imprécisions sur le calcul des réserves utiles, on pourrait être tenté de ne pas prendre en compte le pourcentage d'éléments grossiers dans le profil et d'utiliser un coefficient de texture unique pour tous les horizons. Ce faisant, le calcul de la réserve utile devient une expression directe de l'épaisseur de sol prospectable par les racines, soit la profondeur de l'horizon C. Or, l'emploi de ce paramètre n'améliore pas la discrimination de nos types de stations 2 à 5.

Si, au lieu de raisonner au niveau stationnel, on considère l'ensemble des placettes, on s'aperçoit que ces remarques restent valides. La figure 89 présente la distribution des paramètres physico-chimiques et des coefficients d'Ellenberg relatifs à la disponibilité en eau du sol et au pH de l'horizon $A_1$ en fonction des coordonnées de chaque placette sur le premier axe factoriel. L'indice de réserve utile et la profondeur de l'horizon C sont corrélés positivement et de façon hautement significative avec cet axe (les coefficients de corrélations respectifs sont de 0,67 et 0,62). La corrélation entre le coefficient F d'Ellenberg et l'axe 1 est cependant bien meilleure puisque l'on atteint la valeur de 0,81. La même remarque peut être faite en ce qui concerne le pH du sol : les coordonnées des placettes sur le premier axe factoriel sont mieux corrélées avec le coefficient R d'Ellenberg qu'avec les valeurs de pH mesurées (-0,77 contre -0,56).

A partir de notre formule de calcul de l'indice de réserve utile, nous avons estimé la disponibilité en eau d'un sol brun lessivé situé en forêt de Champenoux sur le Plateau Lorrain (sept horizons décrits, dont la texture évolue de limoneuse en surface à argileuse à la base du profil). Jusqu'aux profondeurs respectives de 1,40 et 2 mètres, nous estimons une réserve en eau de 131 et 180 mm. D'après Bréda (1994), la réserve en eau de ce sol, mesurée à l'aide d'une sonde à neutrons aux mêmes profondeurs, est de 120 et 180 mm. La quantification de la disponibilité en eau d'un sol semble donc pertinente si le profil considéré est profond et sans éléments grossiers. Nous pouvons présumer que les valeurs de réserve utile que nous avons calculées pour nos sols les plus profonds sont valides. A l'opposé, pour des profils peu épais et très chargés en cailloux, il semble que ce calcul soit, sinon impossible, du moins très difficile à réaliser.

En dernier recours nous avons tenté de transformer les profondeurs de décarbonatation en réserve utile en utilisant la relation mise en évidence entre ces deux facteurs (Catalogue des plateaux calcaires, page 30,

Becker *et al.*, 1980). Cependant, si cette relation nous permet d'accéder à des réserves utiles plus vraisemblables (supérieures ou égales à 100 mm), la discrimination des placettes entre les stations 2 à 5 n'est toujours pas améliorée. Ce résultat était prévisible si l'on se réfère aux observations réalisées avec l'utilisation de la seule profondeur de décarbonatation. Cette profondeur, estimée *in situ* par un test d'effervescence à l'acide chlorhydrique, est en fait insuffisante car trop dépendante de la dimension des particules calcaires. Sur les Côtes de Moselle, des oolithes calcaires d'un diamètre inférieur à 2 mm sont souvent mêlées aux argiles de décarbonatation : dans ce cas, la profondeur de décarbonatation est souvent très faible.

En conclusion, la séparation des stations sur l'axe 1 se fait selon un double gradient de pH et de disponibilité en eau. Contrairement aux hypothèses communément admises la flore serait plus précise que les variables physiques mesurées pour quantifier ces gradients, notamment en ce qui concerne la disponibilité en eau dans des sols très chargés en éléments grossiers.

### 3.2 - Facteur nutrition

Aucune analyse de sol n'ayant été réalisée (taux d'azote et de carbone, taux de saturation, etc.), nous ne disposons que du coefficient N d'Ellenberg pour caractériser le niveau de richesse chimique de nos placettes. La figure 90 présente la distribution du coefficient N moyen en fonction des coordonnées des placettes sur les axes factoriels 1 et 2.

Contrairement au pH et à la disponibilité en eau, le facteur nutrition est mieux expliqué par le plan formé par ces axes que par un axe unique (figure 91). La relation liant les types de stations et la nutrition minérale n'est donc pas linéaire. En situation de plateau, les stations 2 à 5 s'ordonnent selon des valeurs croissantes du coefficient N, puis ces valeurs décroissent pour les stations 6 et 7 où le phénomène de lessivage des sols entraîne une chute du taux de saturation (Becker *et al.*, 1980). Sur les pentes exposées au nord, bas de pentes et fonds de vallons, la nutrition azotée semble optimum.

## V - CONCLUSION

L'analyse de la végétation spontanée et des caractéristiques physico-chimiques des sols nous a permis de mettre en évidence les principaux facteurs écologiques déterminant les types de stations des plateaux calcaires de Lorraine : importance de la nutrition azotée, et surtout de l'alimentation en eau. La seule composition floristique des placettes échantillonnées semble être un très bon indicateur de ces deux principaux facteurs.

Douze types de stations ont pu être séparés mais sur les 102 placettes échantillonnées, la majorité se situe dans les stations de plateau (80 relevés) et principalement dans deux types de stations (station 3, 43 relevés ; station 4, 13 relevés).

La gestion sylvicole n'est pas homogène dans toute la gamme des types de stations (tableau 24). La productivité de chacune d'entre elles n'est évidemment pas identique, et si des régimes d'exploitation ont été conseillés (Becker *et al.*, 1980), les sylviculteurs savent depuis longtemps qu'il est préférable de consacrer les sols les plus profonds à la forêt de production. Si le régime de taillis-sous-futaie prédomine encore sur les stations les moins productives, il est remplacé presque exclusivement par la futaie dans les meilleures stations, où la régénération est la plus facile (Becker *et al.*, 1977).

Dans la suite de ce travail, nous pourrons étudier le comportement du hêtre en fonction des types de stations ou en fonction des principaux facteurs écologiques.

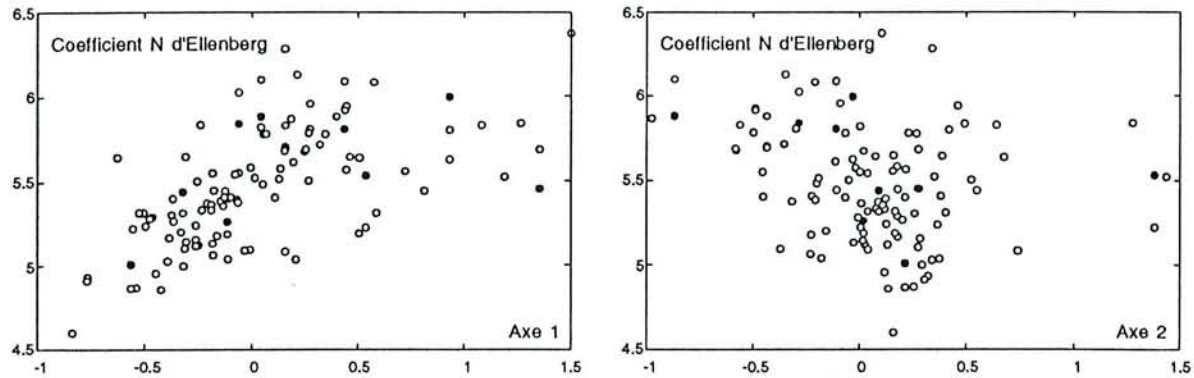



**Figure 90** : Distribution sur les deux premiers axes factoriels du coefficient N d'Ellenberg moyen caractérisant la disponibilité en azote du sol.

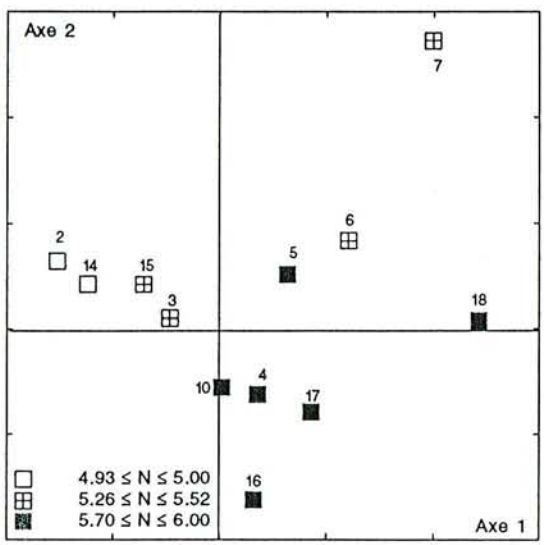



**Figure 91** : Distribution sur le plan factoriel 1-2 des types de stations divisés en trois classes de valeur moyenne du coefficient N d'Ellenberg.

| Topographie | N° | Type de station | n fut | n tsf | n | fut% | tsf% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Plateau | 2 | Hêtraie-chênaie xérophile à Seslérie | - | 1 | 1 | - | 100 |
| | 3 | Hêtraie-chênaie mésoxérophile à Hépatique et Alisier bl. | 16 | 27 | 43 | 37 | 63 |
| | 4 | Hêtraie-chênaie mésophile à Mélique et Aspérule | 10 | 3 | 13 | 77 | 23 |
| | 5 | Hêtraie-chênaie mésophile à Canche cespit. et Millet | 9 | - | 9 | 100 | - |
| | 6 | Hêtraie-chênaie mésoph. à tend. acidoph à fougère m. et f. | 8 | 3 | 11 | 73 | 27 |
| | 7 | Hêtraie-chênaie méso-acidophile à Mélique et Luzule blan. | 3 | - | 3 | 100 | - |
| Versants | 10 | Hêtraie de vers. nord à Tilleul à grd feuilles et Erable | 2 | 1 | 3 | 67 | 33 |
| | 14 | Hêtraie-chênaie thermoxérophile de vers. sud à Seslérie | 3 | 1 | 4 | 75 | 25 |
| | 15 | Hêtraie-chênaie mésoxérophile de versant | 4 | 3 | 7 | 57 | 43 |
| Bas de versants | 16 | Hêtraie-chênaie mésophile calcaricole de bas de pente | 3 | - | 3 | 100 | - |
| et | 17 | Frênaie-érablaies de fonds de vallons étroits | 3 | - | 3 | 100 | - |
| fonds de vallons | 18 | Chênaie péd. charmaie de fonds de vallons larges | 2 | - | 2 | 100 | - |

**Tableau 24** : Bilan des types de stations rencontrés. Pour chaque type de stations **n** relevés sont répertoriés, soit **n fut** placettes de futaie et **n tsf** placettes de taillis-sous-futaie, ce qui représente pour les deux types de gestion et pour un même type stationnel une fréquence de **fut%** et de **tsf%**.

Chapitre VI

# CROISSANCE ET FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX

## I - INTRODUCTION

Le niveau de croissance d'un végétal résulte de l'interaction entre ses potentialités génétiques et l'ensemble des contraintes exercées par les facteurs environnementaux. A grande échelle, les facteurs climatiques, topographiques, pédologiques, historiques, etc., conditionnent la répartition géographique des espèces. A l'intérieur d'une aire de répartition, qui englobe la zone de tolérance d'une espèce au-delà de laquelle elle ne peut plus se maintenir, existent des variations dans les conditions environnementales qui déterminent une certaine fertilité, donc pour le forestier, une certaine productivité.

Puisque l'on peut définir une station forestière comme une unité homogène dans ses conditions physiques et biologiques, on peut espérer, pour une essence donnée, une même sylviculture et un type de station, une productivité comprise entre des limites connues (Delpech *et al.*, 1985).

Les relations existant entre la croissance et les facteurs environnementaux peuvent être abordées selon deux échelles de résolution en utilisant deux types de descripteurs :

- la croissance peut être étudiée soit au niveau stationnel, conformément à la définition précédente ; soit de façon plus analytique, en utilisant la variabilité existant à l'intérieur de chaque type de station, c'est-à-dire en utilisant les gradients écologiques mis en évidence par l'étude phyto-écologique ;

- on peut utiliser un ensemble d'indices caractérisant la croissance de façon ponctuelle (cas des indices de hauteur), ou étudier à long terme l'évolution de la croissance radiale.

## II - METHODES

### 1 - Généralités

Parmi l'ensemble des critères dendrométriques utilisables pour quantifier la productivité d'un peuplement, les sylviculteurs retiennent couramment la hauteur dominante. La hauteur dominante d'un peuplement correspond à la hauteur moyenne des cent plus gros arbres à l'hectare. En pratique elle est calculée à partir de la hauteur de chacun des n - 1 arbres dominants sur une placette de n ares si $n \leq 50$ et à partir des hauteurs des n dominants si la placette a une surface $n > 50$ ares (Pardé & Bouchon, 1988). La hauteur dominante est le reflet de l'espèce, de l'âge du peuplement, de la fertilité stationnelle, d'un type de sylviculture appliquée, etc., et elle est peu sensible à la densité à un moment donné puisque, juste après une éclaircie (qui se fait en général par le bas), les arbres dominants sont toujours sur pied. Les hauteurs dominantes servent de points d'entrée dans les tables de production. Si on dispose d'une table de production, utilisable dans une région donnée, pour une essence et une sylviculture données, il est possible de les convertir en un accroissement en volume.

Le classement des stations d'après l'indice de fertilité est efficace pour les futaies pures et équiennes. Dans ce cas, la hauteur dominante (donc l'accroissement en volume) ne dépend que des conditions de milieu (Becker & Le Goff, 1988). Becker (1978) et Becker *et al.* (1980) ont utilisé les tables de Schober établies

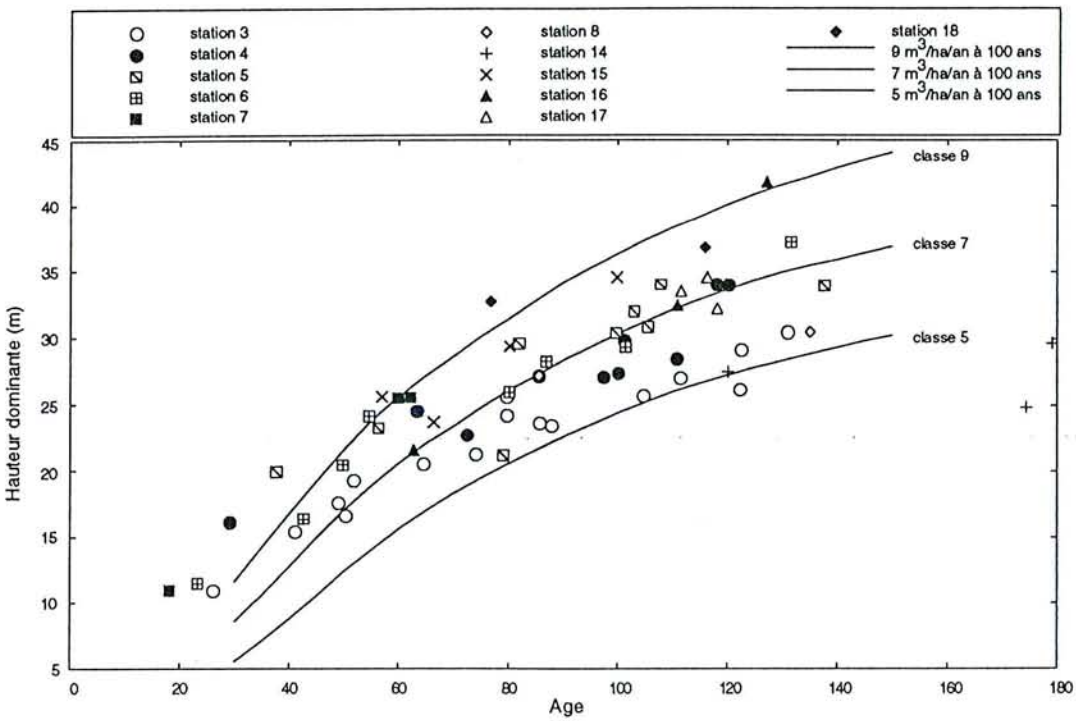



**Figure 92** : Hauteur dominante des placettes de futaie en fonction de leur âge moyen et classes de productivité définies par Schober (1972, *in* Le Goff, 1981).

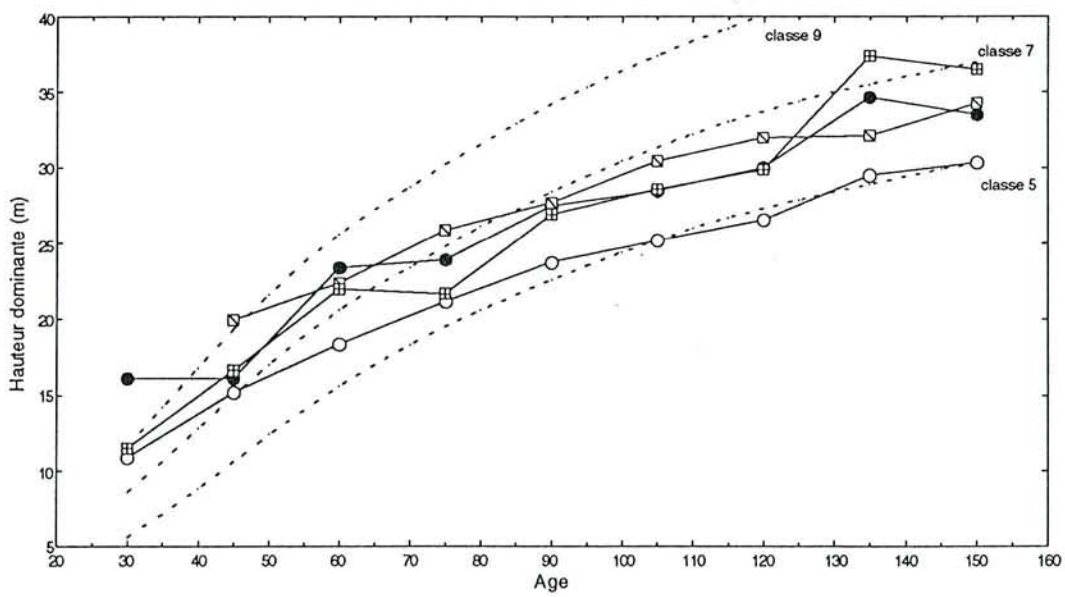



**Figure 93** : Hauteur dominante des arbres de futaie par classes d'âges de 15 ans pour les types de station 3, 4, 5 et 6, et classes de productivité définies par Schober (1972, *in* Le Goff, 1981).

pour le nord-ouest de l'Allemagne pour estimer la production du hêtre en fonction des types de stations. Les tables de production de Schober (1972) ont été validées par Le Goff (1974) dans le quart nord-est de la France ; elle sont donc utilisables sur les plateaux calcaires de Lorraine. Dans notre étude, il est alors possible de comparer la hauteur dominante de nos placettes de futaie à la hauteur dominante classée selon trois indices de fertilité (Schober, 1972 ; *in* Le Goff, 1981), (Figure 92).

D'après la figure 92, on observe que les hauteurs dominantes moyennes des placettes augmentent quand on passe du type de station 3 au type de station 4. Le même classement avait été réalisé par Becker *et al.* (1980) à propos des productivités. En ce qui concerne les stations de pentes, bas de pentes et fonds de vallons, nous ne disposons pas d'assez de points pour classer les stations. Si ce classement général n'apporte que quelques informations illustratives, on peut cependant remarquer que les placettes d'un même type de station n'appartiennent pas forcément à la même classe de productivité. Les placettes d'arbres jeunes correspondent à une productivité plus élevée que les placettes de vieux arbres. Cette remarque est particulièrement évidente pour les types de station 3, 4, 5 et 6 où nous disposons d'un nombre suffisant de placettes. Si on trace l'évolution de la hauteur dominante par classes d'âges de 15 ans, pour chacune des stations 3, 4, 5 et 6 en utilisant l'ensemble des arbres disponibles (Figure 93), on constate là encore que les arbres jeunes poussent mieux que les arbres anciens. Ces résultats rappellent ceux de Kenk *et al.* (1991), Keller (1992) ou Eriksson & Johansson (1993) qui ont comparé l'évolution de la croissance en hauteur de générations successives d'épicéa sur un même site et ont constaté une meilleure productivité lors de la seconde révolution. Dans le cas particulier de notre étude, ces résultats sont cependant à considérer avec prudence. L'échantillonnage réalisé ne correspond pas à celui qui devrait être entrepris pour une étude station/production. La représentativité des arbres dominants n'est pas parfaite. Les arbres que nous avons échantillonnés font partie des arbres dominants de la placette d'observation. La notion de placette peut être rapprochée en extrême limite de la notion de peuplement : nous aurions alors mesuré une hauteur dominante "biologique", ou hauteur moyenne des arbres dominant le peuplement. Quand on s'adresse aux tables de production, la définition de la hauteur dominante prend au contraire une définition "mathématique". La hauteur dominante de la table de production de Schober est définie comme la hauteur des 20% plus grosses tiges à l'hectare. Nos placettes étant de taille variable, et le nombre d'arbres échantillonés constant, les hauteurs dominantes mesurées ne correspondent pas totalement à la définition des sylviculteurs et peuvent de ce fait être sur- ou sous-estimées. La seconde source d'erreur vient du modèle de sylviculture appliqué. Pour nos placettes de futaie, nous ne connaissons ni l'intensité, ni la fréquence, ni la nature des éclaircies. La hauteur dominante moyenne de nos placettes de futaie est donc mal estimée et de ce fait il est préférable de ne pas convertir ces hauteurs en accroissements.

Dans le cas particulier des taillis-sous-futaie, la hauteur des arbres dominants est sans rapport avec celle définie par les tables de production. Les arbres de taillis-sous-futaie sont, à âge égal et sur type de station identique, plus petits que les arbres de futaie. Cette remarque a déjà été faite à propos du chêne et du hêtre sur les plateaux calcaires (Le Tacon & Nys, 1970 ; Becker, 1978). Même si des indices de productivité ont pu être donnés pour des taillis-sous-futaie de chêne dans la région centre (Le Goff, 1984), ils n'existent pas pour le hêtre sur les plateaux calcaires lorrains.

### 2 - Indices de croissance

Les variables dendrométriques individuelles constituent, comme les largeurs de cernes, un ensemble de paramètres influencés par les facteurs environnementaux, la sylviculture, etc., mais qui dépendent aussi de l'âge des arbres. Pour étudier les relations existant entre la croissance et les facteurs stationnels, nous devons donc construire des indices particuliers, aptes à caractériser la croissance mais sans rapport avec l'âge et si possible comparables entre la futaie et le taillis-sous-futaie.

Tout paramètre dendrométrique (par exemple la hauteur) peut être représenté en fonction de l'âge actuel des arbres. Afin de limiter la variance à chaque âge, une moyenne du paramètre considéré peut être calculée pour chaque âge actuel disponible. Le nuage de points obtenu est ajusté par un modèle mathématique et l'indice

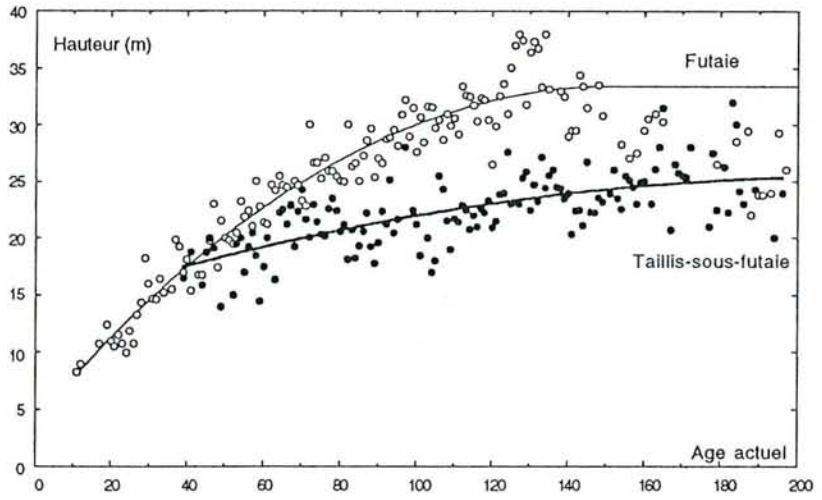



**Figure 94** : Ajustement des hauteurs brutes en fonction de l'âge pour chaque traitement sylvicole.

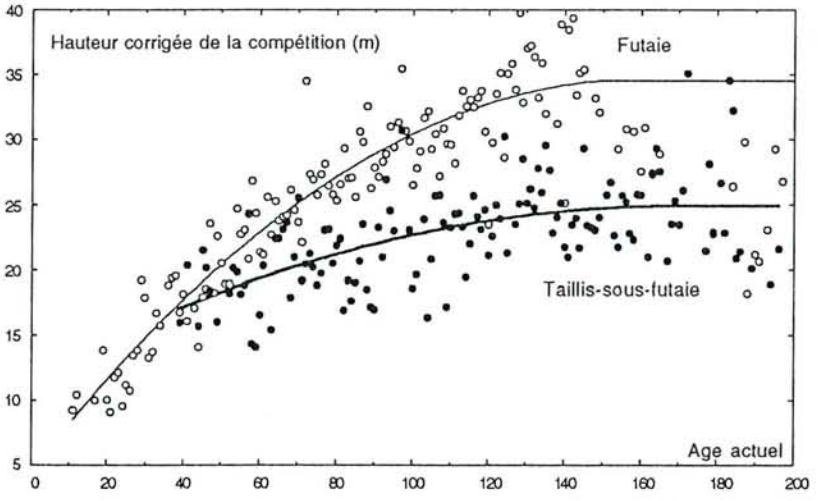



**Figure 95** : Ajustement des hauteurs corrigées des effets de la compétition en fonction de l'âge pour chaque traitement sylvicole.

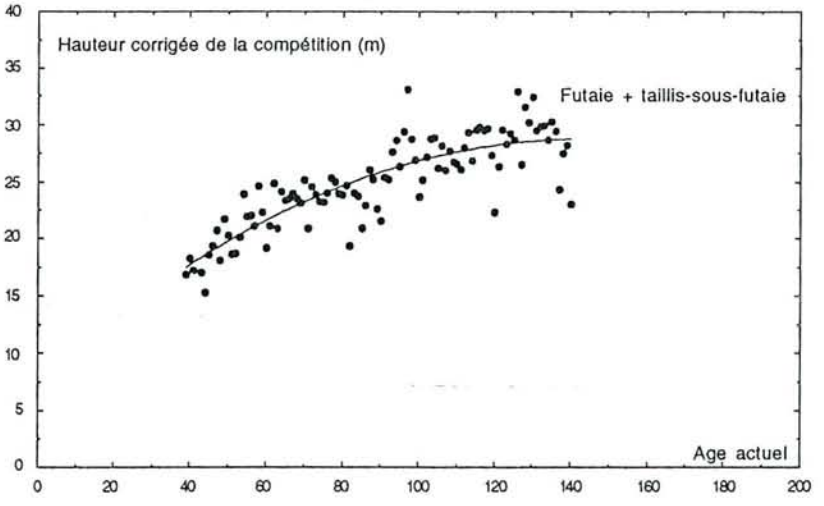



**Figure 96** : Ajustement des hauteurs corrigées des effets de la compétition par un coefficient commun aux arbres de futaie et de taillis-sous-futaie.

du paramètre est le rapport, exprimé en pourcentage, de la valeur observée à l'âge *a* par la valeur de référence donnée par le modèle au même âge *a*. Ce mode d'ajustement et de calcul d'indices a déjà été présenté dans le paragraphe 6 du chapitre IV (Essai de prise en compte de la concurrence passée, page 78).

Pour des variables comme le volume du houppier, sa surface de projection au sol, etc., (cf. chap. II), un ajustement est réalisé pour chaque type de traitement sylvicole. Pour la hauteur des arbres ou leur surface terrière, plusieurs ajustements sont réalisés. La hauteur ou la surface terrière peuvent être transformées en indices de façon directe (Figure 94 : exemple de l'ajustement des hauteurs brutes). Ces hauteurs ou surfaces terrières brutes peuvent également êtres corrigées des effets de la compétition en utilisant les coefficients Ch et Cs (Chap. IV, § 6, page 83). Cette correction peut être réalisée soit en fonction de la compétition moyenne à l'intérieur de chaque type de peuplement (Figure 95), soit en fonction de la compétition moyenne entre les deux types de peuplements (Figure 96). Ces corrections sont équivalentes à celles réalisées sur les surfaces de cernes.

Pour caractériser ponctuellement la croissance de chaque arbre nous disposons donc *in fine* de trois ***indices de hauteur*** et de trois ***indices de surface terrière***. Nous disposons également d'un ensemble de paramètres décrivant le houppier : ***indice de longueur relative du houppier*** (encore appelé pourcentage de houppier), ***indice de volume du houppier***, ***indice de surface du houppier***, ***indice de surface de projection du houppier au sol.*** A partir de ces indices estimés de façon individuelle, une moyenne peut être calculée pour chacune des 102 placettes. Ces paramètres, synthétisant ponctuellement la croissance, sont ensuite étudiés en fonction des facteurs environnementaux.

Au niveau de la placette, certains paramètres sylvicoles peuvent également être indicés en fonction de l'âge moyen des arbres échantillonnés : ***indice de surface terrière du peuplement***, ***indice d'éloignement du plus proche voisin***.

D'autres variables, non corrélées à l'âge, sont enfin utilisées comme la ***concurrence en cime*** ou le ***nombre de souches***.

### 3 - Facteurs environnementaux

Les facteurs environnementaux ont été présentés et analysés dans le chapitre "phytoécologie". Ils sont utilisés ici en temps que variables explicatives de la croissance. Ce sont des variables en classes comme le type de station, ou des variables continues comme les coordonnées des placettes le long des axes factoriels, la profondeur de décarbonatation, les coefficients d'Ellenberg moyens par placette, etc.

### 4 - Méthodes d'analyse

A partir de ces différents indices, la croissance (croissance radiale et croissance en hauteur) au niveau de l'arbre ou des peuplements, peut être étudiée en fonction des variables explicatives environnementales. Plusieurs méthodes sont utilisées pour traiter ces données :

- l'analyse de variance et les méthodes de comparaison de moyennes sont utilisées pour analyser les différences de croissance entre les types de stations ;

- le calcul de corrélations permet de tester les liaisons entre toutes les variables, soit explicatives soit à expliquer ;

- la méthode des régressions progressives pas à pas permet d'extraire du lot des variables potentiellement explicatives les facteurs les plus déterminants pour la croissance.

# III - RESULTATS

## 1 - Croissance en hauteur

### 1.1 - Croissance en hauteur et type de station

L'analyse statistique de la croissance en hauteur en fonction des types de stations n'est pas pertinente puisque notre échantillon est très déséquilibré, surtout en ce qui concerne les placettes de taillis-sous-futaie. Si l'analyse de variance des différents indices montre un effet significatif du type de station, la comparaison des moyennes par un test de Bonferroni ne permet pas de les séparer de façon significative. Pourtant ces stations ont été reconnues par ailleurs très différentes du point de vue de la productivité (Becker *et al.*, 1980).

Bien que les indices de hauteur ne soient pas reconnus ici comme significativement différents d'une station à l'autre, ils peuvent être classés conformément aux résultats de Becker *et al.* tant en futaie qu'en taillis-sous-futaie (Figures 97 et 98). En situation de plateau, on retrouve une augmentation progressive de la productivité depuis le type de station 3 jusqu'au type de station 7 pour les placettes de futaies ou depuis le type de station 2 jusqu'au type de station 6 pour les placettes de taillis-sous-futaie. En situation de versant ou de fonds de vallons, deux situations extrêmes sont en accord avec les résultats de Becker *et al.* Les futaies et taillis-sous-futaie de hêtres situés sur les versants exposés au sud font partie des peuplements les moins

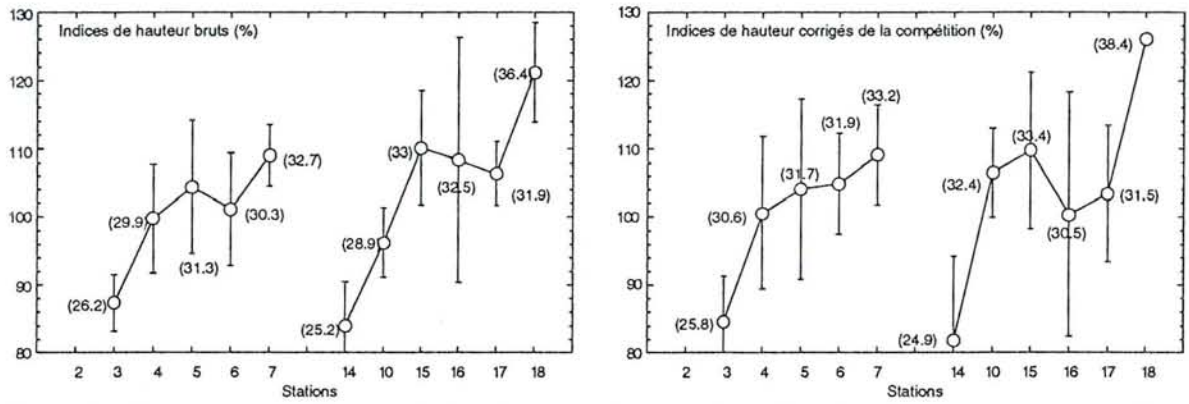



**Figure 97** : Moyennes et écarts types des indices de hauteur des arbres de **futaie** en fonction des types de stations. Les valeurs entre parenthèses correspondent aux hauteurs (m) recalculées pour un âge de référence de 100 ans. Pour les indices bruts et les indices corrigés des effets de la compétition, l'indice 100% correspond respectivement à une hauteur à 100 ans de 33 et de 33,4 mètres.

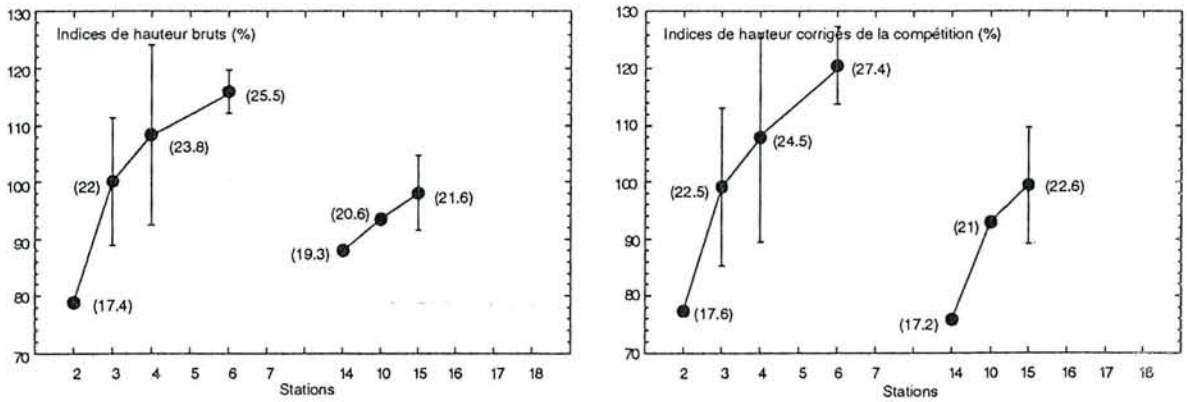



**Figure 98** : Moyennes et écarts types des indices de hauteur des arbres de **taillis-sous-futaie** en fonction des types de stations. Les valeurs entre parenthèses correspondent aux hauteurs (m) recalculées pour un âge de référence de 100 ans. Pour les indices bruts et les indices corrigés des effets de la compétition, l'indice 100% correspond respectivement à une hauteur à 100 ans de 22 et de 22,7 mètres.

productifs. A l'opposé, les futaies de fonds de vallons larges semblent être les plus productives. Les autres types de stations (10, 15, 16, 17) sont trop faiblement représentés pour que l'on accorde une importance particulière à leurs productivité estimées. D'après le catalogue des plateaux calcaires, elles s'échelonnent entre celle du type de station 4 et celle du type de station 7.

En situation de plateau, nous avons montré dans l'étude phytoécologique que le régime hydrique s'améliore nettement quand on passe du type de station 2 au type de station 7. Nous constatons maintenant que les indices de hauteur, caractérisant la fertilité stationnelle, augmentent dans le même sens. Malgré les déficiences de notre plan d'échantillonnage, il semble donc que le comportement du hêtre puisse s'expliquer essentiellement par les possibilités d'alimentation en eau du sol.

### 1.2 - Croissance en hauteur et caractéristiques stationnelles

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons étudié les relations existant entre les indices de hauteur et les caractéristiques stationnelles. Nous rappelons que ces caractéristiques sont, soit des variables physico-chimiques mesurées à partir des données pédologiques (profondeur de l'horizon C, profondeur de décarbonatation, profondeur d'enracinement, épaisseur de l'horizon $A_1$, pH, pourcentage de pierrosité, indice de réserve utile), soit des variables intégrées à partir de la composition floristique des placettes (indices d'Ellenberg caractérisant le pH, l'eau disponible dans le sol, la nutrition minérale, la continentalité, la luminosité, la température). En complément de ces variables, nous avons conservé, en tant que variables explicatives, les coordonnées des placettes sur les deux premiers axes factoriels. Nous rappellons que ces axes ont une bonne signification biologique et qu'ils sont suffisants pour expliquer la variabilité des types de stations.

**-- Placettes de futaie --**

L'analyse des corrélations brutes entre les indices de hauteur disponibles et les caractéristiques stationnelles nous permet de faire trois remarques :

- les indices de hauteur sont corrélés très significativement à la position des placettes le long de l'axe 1 (corrélation de 0,57 pour les indices de hauteur bruts et de 0,59 pour les indices de hauteur corrigés des effets de la compétition). La corrélation des indices avec la position des placettes le long de l'axe 2 n'est pas significative ;

- parmi les variables pédologiques, la profondeur de l'horizon C est la variable la mieux corrélée avec les indices de hauteur (corrélation de 0,49 avec les indices de hauteur brute et de 0,48 avec les indices de hauteur corrigés des effets de la compétition). L'indice de réserve utile et la profondeur de décarbonatation sont également corrélés de façon significative aux indices de hauteur (0,43 et 0,47 pour la réserve ; 0,38 et 0,42 pour la décarbonatation). Pour toutes les autres variables, les corrélations ont des valeurs inférieures à 0,30 et ne sont plus significatives au seuil de 5% ;

- les coefficients d'Ellenberg caractérisant la disponibilité en eau du sol (F), la nutrition azotée (N) ou le pH (R) sont très bien corrélés aux indices de hauteur contrairement aux autres indices d'Ellenberg (respectivement, 0,50 ; 0,55 et -0,39 pour les indices de hauteur bruts).

Si on ne conserve que les 45 placettes de futaie correspondant aux stations de plateau, les corrélations entre, d'une part les indices de hauteur et, d'autre part, l'axe 1 de l'AFC ou les coefficients d'Ellenberg F, R et N, sont très nettement augmentées (Figure 99 a à d ; coefficient de 0,69 entre l'axe 1 et les indices de hauteur bruts ; 0,66 avec F ; 0,60 avec R et 0,54 avec N). Par contre, les corrélations entre indices de hauteur et caractéristiques pédologiques sont diminuées.

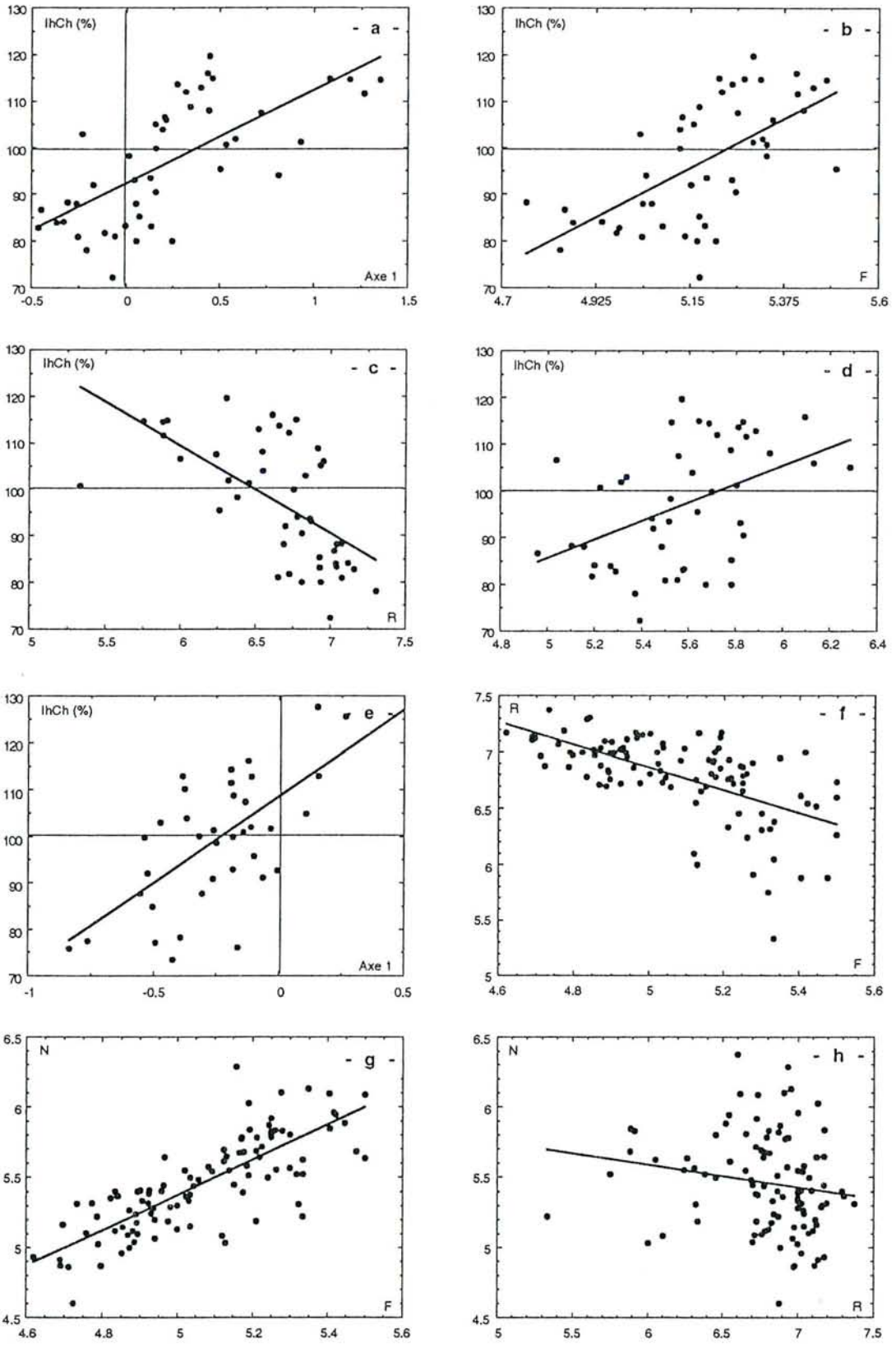



**Figure 99** : Meilleures corrélations entre les indices de hauteur moyens par placette et les variables environnementales.

- **a** - corrélation entre les hauteurs des arbres de futaie de plateau, dégagées des effets de la compétition, et la position des placettes le long de l'axe 1 ;
- **b, c, d** - corrélations entre les hauteurs des arbres de futaie de plateau, dégagées des effets de la compétition et les coefficients F, R et N d'Ellenberg ;
- **e** - corrélation entre les hauteurs dégagées des effets de la compétition des arbres de taillis-sous-futaie et la position des placettes le long de l'axe 1 ;
- **f, g, h** - corrélations entre les trois coefficients d'Ellenberg moyens pour l'ensemble des placettes de futaie et de taillis-sous-futaie.

La variation des indices de hauteur moyens de chaque placette peut être expliquée en utilisant les seize variables stationnelles disponibles et les méthodes de régression progressive pas à pas. Le premier modèle construit (modèle 1, tableau 25) explique 48% de la variance des indices de hauteur bruts des placettes de futaie situées sur plateau. Il fait intervenir uniquement la position des placettes le long de l'axe 1 de l'AFC. Si on supprime l'axe 1 du lot de variables potentiellement explicatives on obtient un second modèle qui intègre les coefficients R et N d'Ellenberg et permet d'expliquer 61% de la variance des indices de hauteur (modèle 2, tableau 26). En étudiant l'ordre d'entrée des variables dans le second modèle, on constate que le coefficient F d'Ellenberg est, en l'absence de l'axe 1, la variable la mieux corrélée avec les indices de hauteur. L'entrée successive des variables R et N rend ensuite le coefficient F inutile : le coefficient F est très bien corrélé aux coefficients R et N, mais ces deux derniers ne sont pas corrélés entre eux (Figure 99 f, g, h). Quand les indices de hauteur corrigés des effets de la compétition sont utilisés à la place des indices de hauteur bruts, les modèles sont identiques. Le pourcentage de variance expliquée est toutefois un peu plus faible : 47% avec le seul axe 1 et 54% avec les coefficients R et N.

Si l'ensemble des placettes de futaie de hêtre est conservé, les modèles construits sont moins explicatifs. Le meilleur modèle est obtenu avec les indices de hauteur bruts : il explique 47% de la variance totale des points. Dans ce modèle, l'axe 1 est la première variable à être intégrée. Le coefficient N, puis la profondeur de l'horizon C viennent ensuite et l'axe 1 sort du modèle.

**-- Placettes de taillis-sous-futaie --**

Les corrélations brutes entre les indices de hauteur et les caractéristiques stationnelles sont semblables à celles observées dans le cas des arbres de futaie. Les corrélations sont également meilleures avec les indices corrigés des effets de la compétition qu'avec les indices bruts. Les indices de hauteur sont fortement corrélés aux coordonnées des placettes sur le premier axe factoriel (0,64 pour les indices bruts et 0,67 pour les indices corrigés des effets de la compétition (Figure 99 - e)) et au coefficient F d'Ellenberg (0,63 et 0,68). Les autres variables les mieux corrélées sont la profondeur de décarbonatation (0,48 et 0,49), le pH (-0,46 et -0,51), l'indice de réserve utile (0,46 pour les deux séries d'indices), le coefficient N d'Ellenberg (0,46 et 0,56). Le coefficient R d'Ellenberg n'est par contre pas corrélé significativement aux indices de hauteur des arbres de taillis-sous-futaie (-0,25 et -0,26).

Les placettes de taillis-sous-futaie étant majoritairement situées sur plateau, la partition des placettes comme dans le cas de la futaie est inutile : les modèles de régression pas à pas restent identiques.

Le meilleur modèle construit à partir des indices de hauteur bruts fait ressortir les variables F et pH. Ce modèle explique 49% de la variance. L'apparition de la variable pH dans ce modèle, contrairement au coefficient R dans le cas de la futaie, s'explique simplement puisque dans le cas des taillis-sous-futaie, les indices de hauteur sont mieux corrélés au pH du sol (-0,46) qu'au coefficient R (-0,25).

La modélisation des indices corrigés des effets de la compétition permet d'obtenir un meilleur modèle, contrairement à ce que nous avons observé en futaie (Modèle 3, Tableau 27). Comme dans le modèle précédent, les variables F et pH sont utilisées mais la variable N entre également dans le modèle ; 60% de la variance des indices de hauteur peut alors être expliquée. Malgré l'obtention d'un fort $r^2$, l'intérêt de ce modèle est toutefois limité car les variables F, N et pH sont significativement corrélées entre elles.

**-- Ensemble des placettes de futaie et de taillis-sous-futaie --**

Sur un même type de station, le type de sylviculture entraîne des différences de hauteur non négligeables entre des arbres de même âge. Pour le type de station 3, la différence de hauteur entre les arbres de futaie et de taillis-sous-futaie âgés de 100 à 120 ans est proche de cinq mètres. Il semble donc impossible de comparer directement les performances atteintes par ces deux types de peuplement (Le Goff, 1984 ; Becker, 1992).

➡ **Modèle 1** : IH = 15,80*axe1 + 93,55

**Résumé des étapes de la régression progressive pas à pas**

| Etapes | Variables entrées | Variables sorties | $r^2$ partiel | $r^2$ du modèle | F | prob > F |
|---|---|---|---|---|---|---|
| n°1 | axe 1 | | 47,78% | 47,78% | 40,27 | 0,0001 |

**Analyse de variance**

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | prob > F | $r^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Régression | 1 | 2272,096 | 40,27 | 0.0001 | 47,78% |
| Erreur | 44 | 56,424 | | | |

**Tableau 25** : Modélisation des indices de hauteur bruts des placettes de futaie en situation de plateau.

➡ **Modèle 2** : IH = 17,74*N - 13,80*R + 90,11

**Résumé des étapes de la régression progressive pas à pas**

| Etapes | Variables entrées | Variables sorties | $r^2$ partiel | $r^2$ du modèle | F | prob > F |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | F | | 44,07% | 44,07% | 34,676 | 0,0001 |
| 2 | R | | 5,17% | 49,24 | 4,3775 | 0,0424 |
| 3 | N | | 12,15% | 61,39% | 13,214 | 0,0008 |
| 4 | | F | 0,16% | 61,22% | 0,179 | 0,6744 |

**Analyse de variance**

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | prob > F | $r^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Régression | 2 | 1455,545 | 33,948 | 0.0001 | 61,22% |
| Erreur | 43 | 42,876 | | | |

**Tableau 26** : Modélisation des indices de hauteur bruts des placettes de futaie en situation de plateau. La variable "axe 1" a été retirée de la liste des variables potentiellement explicatives.

➡ **Modèle 3** : IHCh = 36,356*F - 10,396*pH + 22,997*N - 131,067

**Résumé des étapes de la régression progressive pas à pas**

| Etapes | Variables entrées | Variables sorties | $r^2$ partiel | $r^2$ du modèle | F | prob > F |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | F | | 44,74% | 44,07% | 29,144 | 0,0001 |
| 2 | pH | | 9,53% | 54,27% | 7,294 | 0,0106 |
| 3 | N | | 6,22% | 60,49% | 5,359 | 0,0268 |

**Analyse de variance**

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | prob > F | $r^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Régression | 3 | 1734,017 | 17,355 | 0.0001 | 60,49% |
| Erreur | 34 | 99,915 | | | |

**Tableau 27** : Modélisation des indices moyens de croissance en hauteur des placettes de taillis-sous-futaie.

➡ **Modèle 4** : IHCh total = 166,77 - 10,72*pH + 28,135*axe1

**Résumé des étapes de la régression progressive pas à pas**

| Etapes | Variables entrées | Variables sorties | $r^2$ partiel | $r^2$ du modèle | F | prob > F |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | axe1 | | 28,07% | 28,07% | 19,094 | 0,0001 |
| 2 | pH | | 10,42% | 38,49% | 8,467 | 0,0054 |

**Analyse de variance**

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | prob > F | $r^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Régression | 2 | 1827,949 | 15,643 | 0.0001 | 38,49% |
| Erreur | 50 | 116,855 | | | |

**Tableau 28** : Modélisation des indices moyens de croissance en hauteur des placettes de futaie et de taillis-sous-futaie.

➡ **Modèle 5** : IHCh = 16,55*N - 15,78*R + 0,25*ISPh + 85,62

**Résumé des étapes de la régression progressive pas à pas**

| Etapes | Variables entrées | Variables sorties | $r^2$ partiel | $r^2$ du modèle | F | prob > F |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ISPh | | 40,03% | 40,03% | 28,032 | 0,0001 |
| 2 | R | | 26,08% | 66,10 | 31,543 | 0,0001 |
| 3 | N | | 12,15% | 78,25% | 22,342 | 0,0001 |

**Analyse de variance**

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | prob > F | $r^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Régression | 3 | 1937,957 | 47,975 | 0.0001 | 78,25% |
| Erreur | 40 | 40,395 | | | |

**Tableau 29** : Modélisation des indices moyens de croissance en hauteur corrigés des effets de la compétition des placettes de futaie en situation de plateau.

➡ **Modèle 6** : IHCh = 13,626*N + 0,127*proC + 0,311*ISPh - 17,221

**Résumé des étapes de la régression progressive pas à pas**

| Etapes | Variables entrées | Variables sorties | $r^2$ partiel | $r^2$ du modèle | F | prob > F |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ISPh | | 46,59% | 46,59% | 51,45 | 0,0001 |
| 2 | N | | 15,54% | 62,13% | 23,80 | 0,0001 |
| 3 | proC | | 9,04% | 71,17% | 17,87 | 0,0001 |

**Analyse de variance**

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | prob > F | $r^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Régression | 3 | 2869,140 | 46,899 | 0.0001 | 71,17% |
| Erreur | 57 | 61,177 | | | |

**Tableau 30** : Modélisation des indices moyens de croissance en hauteur corrigés des effets de la compétition de l'ensemble des placettes de futaie.

➡ **Modèle 7** : IHCh = 53,482*F + 0,329*ISPh - 195,576

**Résumé des étapes de la régression progressive pas à pas**

| Etapes | Variables entrées | Variables sorties | $r^2$ partiel | $r^2$ du modèle | F | prob > F |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ISPh | | 53,74% | 53,74% | 41,822 | 0,0001 |
| 2 | F | | 22,29% | 76,03 | 32,55 | 0,0001 |

**Analyse de variance**

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | prob > F | $r^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Régression | 2 | 3269,035 | 55,512 | 0.0001 | 76,03% |
| Erreur | 35 | 58,888 | | | |

**Tableau 31** : Modélisation des indices moyens de croissance en hauteur corrigés des effets de la compétition de l'ensemble des placettes de taillis-sous-futaie.

La construction d'indices de croissance en hauteur corrigés par un indice de compétition moyen entre les peuplements de futaie et de taillis-sous-futaie permet pourtant cette comparaison. L'analyse de variance montre alors qu'il existe un effet stationnel mais pas d'effet sylvicole entre ces indices de hauteur particuliers. Ceci confirme indirectement la pertinence du processus de correction de la compétition établi par Becker (1992). L'explication conjointe de la productivité des deux types de peuplement à l'aide des paramètres stationnels peut alors être tentée.

Pour réaliser cette analyse, les stations 3 et 4 sont conservées : ce sont les seules stations où les futaies et les taillis-sous-futaies de hêtres sont représentés ensemble et en nombre suffisant. L'application des méthodes de régression pas à pas permet de mettre en place un modèle expliquant 38% de la variance totale des indices de hauteur. Ce modèle utilise les coordonnées des placettes sur l'axe 1 et le pH en tant que variables explicatives (Modèle 4, Tableau 28). Comme dans le cas précédent du taillis-sous-futaie, ce modèle est imparfait car l'axe 1 est corrélé avec le pH de l'horizon $A_1$.

### 1.3 - Croissance en hauteur et autres caractéristiques dendrométriques

L'analyse des coefficients de corrélation entre les indices de croissance en hauteur et les autres indices dendrométriques met en évidence des liaisons significatives entre ces variables. Le volume du houppier, sa surface (son enveloppe) ou sa surface de projection au sol sont bien corrélés aux indices de hauteur bruts (respectivement 0,42 ; 0,47 et 0,37 dans le cas des arbres de futaie et 0,76 ; 0,84 et 0,60 dans le cas des arbres de taillis-sous-futaie). L'utilisation des indices de hauteur dégagés des effets de la compétition permet d'atteindre des coefficients plus élevés (0,66 ; 0,69 et 0,68 en futaie et 0,84 ; 0,87 et 0,73 en taillis-sous-futaie). La longueur relative du houppier n'est quant à elle jamais corrélée de façon significative avec la hauteur.

Il existe d'autre part des liaisons significatives entre la surface du houppier et les caractéristiques environnementales, notamment avec l'axe 1 (0,23 pour la futaie et 0,49 pour le taillis-sous-futaie), la profondeur de l'horizon C (0,31 dans le cas de la futaie), la profondeur de décarbonatation (0,27 dans le cas de la futaie et 0,31 dans le cas du taillis-sous-futaie). Des corrélations voisines sont observées avec les mêmes variables et le volume du houppier. Tous ces coefficients de corrélation sont toutefois inférieurs à ceux observés avec les indices de hauteur. Ils peuvent même être non significatifs comme dans le cas des corrélations avec les variables F, R et N. La surface de projection au sol du houppier est bien corrélée à la croissance en hauteur mais non corrélée avec les facteurs environnementaux dans le cas de la futaie et corrélée significativement avec le pH (-0,34), l'axe 1 (0,34) et N (0,42) dans le cas du taillis-sous-futaie.

Les paramètres décrivant la taille du houppier sont *a priori* directement liés à la gestion sylvicole. En peuplement dense, les houppiers sont plus étriqués qu'en peuplement ouvert. Toutes stations confondues, les arbres de futaie âgés de 120 à 130 ans atteignent une hauteur de 30 m et ont un houppier d'approximativement 600 $m^3$. En taillis-sous-futaie, les arbres pris dans la même classe d'âge sont plus petits (21 m) mais ont un houppier deux fois plus volumineux. La moyenne des dix plus gros houppiers mesurés est de 2400 $m^3$ en futaie et de 5000 $m^3$ en taillis-sous-futaie. Le volume et la surface du houppier apparaissent de surcroît comme des caractères influencés par la fertilité stationnelle alors que la surface de projection du houppier au sol semble plus dégagée de cette liaison.

Si on tient compte de cet indice dans le calcul des régressions progressives pas à pas, de nouveaux modèles de croissance en hauteur peuvent être construits. Dans le cas des futaies de plateaux, le modèle obtenu à partir des indices bruts de croissance en hauteur n'est pas modifié ; par contre, pour les indices de croissance en hauteur dégagés des effets de la compétition, on obtient un modèle expliquant 78% de la variance (modèle 5, tableau 29) alors qu'auparavant le modèle correspondant n'expliquait que 54% de cette variance. Ce modèle est identique à celui précédemment exposé mais avec comme variable explicative supplémentaire l'indice de surface de projection du houppier.

Si on considère l'ensemble des placettes de futaie, l'explication des indices de hauteur bruts ou dégagés des effets de la compétition est également améliorée. Pour les indices de hauteur bruts, le modèle explique 53% de la variance ; 71% avec les indices corrigés des effets de la compétition (modèle 6, tableau 30). Comme dans le cas des futaies de plateaux, les variables environnementales sont identiques à celles des modèles précédents.

Dans le cas du taillis-sous-futaie, le modèle calculé pour les indices de hauteur dégagés de la compétition est comme précédemment meilleur que celui calculé pour les indices de hauteur bruts. Comme dans le cas de la futaie la part de variance expliquée est augmentée par l'utilisation de l'indice de projection : elle passe à 76% contre 60% auparavant. Toutefois, contrairement aux modèles élaborés pour la futaie, les variables environnementales ne sont pas identiques dans les deux cas. Précédemment, les variables F, N et pH étaient inclues dans le modèle. Seule la variable F est maintenant conservée au côté de l'indice de projection (modèle 7, tableau 31).

## 2 - Croissance radiale

### 2.1 - Indices de surface terrière

Comme la croissance en hauteur, la croissance radiale d'un arbre dépend des caractéristiques physico-chimiques de la station. Cependant, la surface terrière d'une tige intègre beaucoup plus que la hauteur les phénomènes liés à la compétition dans les peuplements. Le diamètre n'est donc en général pas utilisé par les sylviculteurs pour construire des indices de productivité ; c'est à la croissance en hauteur qu'il est fait appel le plus souvent (Day *et al.*, 1960 ; Décourt, 1973).

**-- Cas des indices bruts --**

L'analyse des corrélations entre les indices de surface terrière, les paramètres environnementaux et les descripteurs du houppier confirme cette remarque (Tableau 32). De manière générale, les corrélations entre surface terrière et variables environnementales sont significatives mais inférieures à celles obtenues avec les indices de hauteur. Par contre, les corrélations avec les paramètres décrivant le houppier sont bien plus fortes que celles que nous avons obtenues auparavant. Si les caractéristiques sylvicoles jouent un rôle non négligeable sur la croissance en hauteur, elles prennent dans le cas de la croissance radiale une importance particulière.

| | Futaie | | Taillis-sous-futaie | |
|---|---|---|---|---|
| | IH | IG | IH | IG |
| réserve utile | **0,43** | 0,39 | **0,45** | 0,37 |
| profondeur de décarbonatation | **0,38** | 0,34 | **0,48** | 0,43 |
| profondeur de l'horizon C | **0,49** | 0,34 | **0,38** | NS |
| pH | **-0,21** | NS | **-0,46** | -0,46 |
| axe 1 | **0,57** | 0,46 | **0,61** | 0,60 |
| F | **0,50** | 0,38 | **0,63** | 0,59 |
| R | **-0,39** | -0,37 | NS | NS |
| N | **0,55** | 0,27 | 0,46 | **0,55** |
| longueur relative du houppier | NS | NS | NS | NS |
| volume du houppier | 0,42 | **0,76** | 0,76 | **0,80** |
| surface du houppier | 0,47 | **0,75** | **0,84** | 0,78 |
| surface de projection du houppier | 0,37 | **0,84** | 0,60 | **0,77** |

**Tableau 32** : Comparaison des coefficients de corrélation obtenus entre, d'une part, les indices de hauteur (IH) et de surface terrière (IG) et, d'autre part, les caractéristiques environnementales et les descripteurs du houppier. (NS = corrélation non significative au seuil de 5%).

Si on applique aux indices de surface terrière les méthodes de régression progressive comme nous l'avons fait pour les indices de hauteur, les modèles obtenus prennent en compte les mêmes paramètres explicatifs mais la qualité des modèles est nettement diminuée. Ces modèles ne seront donc pas présentés.

**-- Cas des indices corrigés des effets de la compétition --**

L'utilisation des indices de surface terrière dégagés des effets de la compétition permet de diminuer l'influence des paramètres décrivant la taille des houppiers. Dans ce cas, les corrélations entre surface terrière, facteurs environnementaux et variables du houppier sont identiques à celles obtenues avec les indices de hauteur dégagés des effets de la compétition. La modélisation de ces indices de surface terrière est cependant inutile car ils sont extrêmement corrélés aux indices de hauteur (effet de la méthode de calcul des indices corrigés), (Figure 100) et les modèles sont donc identiques .

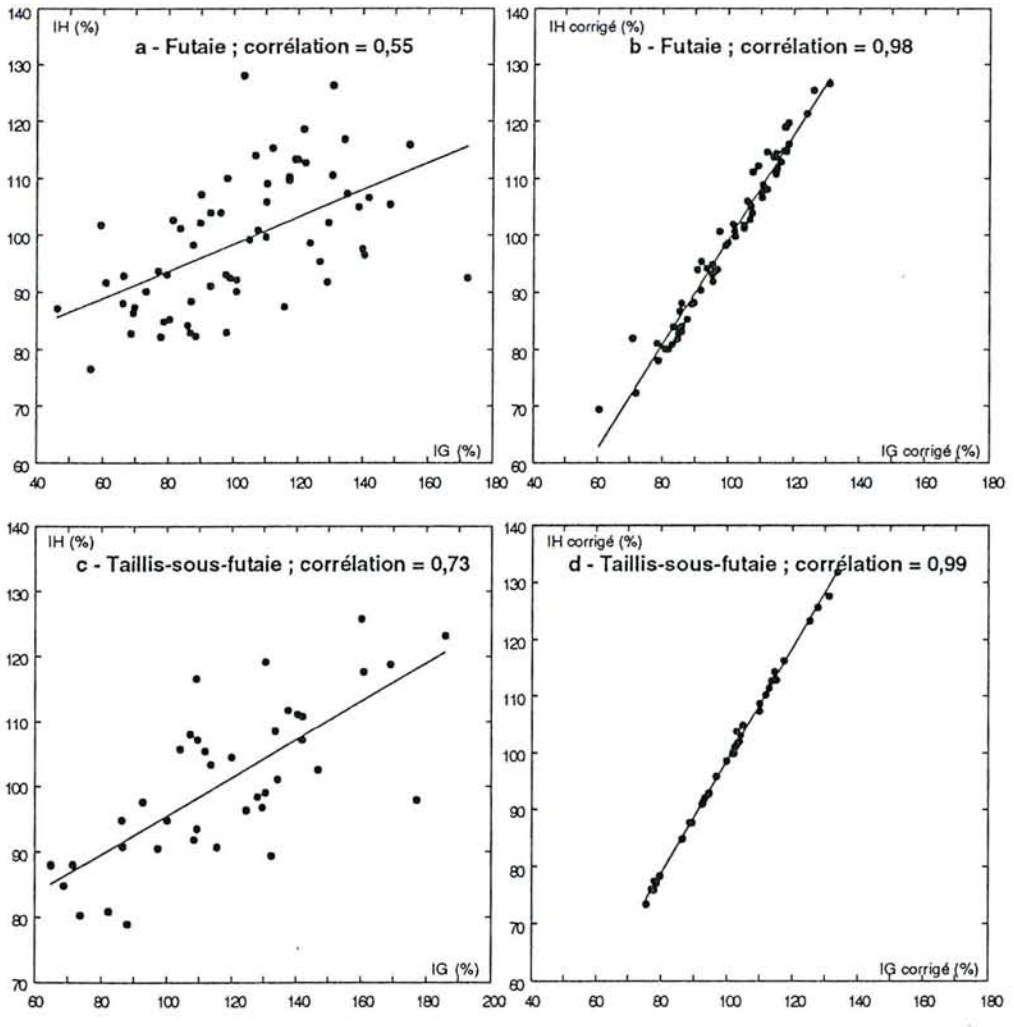



**Figure 100** : Corrélation entre les indices de hauteur bruts (IH) et les indices de surface terrière bruts (IS) pour les placettes de futaie (a) et de taillis-sous-futaie (c). Corrélation entre ces indices quand la compétition est prise en compte (IH corrigé et IG corrigé), (b et d).

## 2.2 - Stratification

### 2.2.1 - Généralités

Si l'analyse ponctuelle de la croissance radiale par l'étude des indices de surface terrière n'apporte pas de résultats différents par rapport à ceux obtenus avec les indices de hauteur, l'étude de l'évolution des accroissements annuels en fonction du temps et en fonction des paramètres environnementaux peut permettre une approche dynamique des contraintes de croissance subies par les arbres.

Les courbes retraçant l'évolution moyenne des accroissements au cours du temps (courbes présentées dans le chapitre consacré à l'étude des tendances à long terme) intègrent de façon moyenne, pour chaque système de gestion, l'ensemble des paramètres stationnels et sylvicoles rencontrés. Les contraintes principales étant maintenant connues, il est possible de stratifier l'échantillon initial en autant de sous-ensembles définis à partir des valeurs numériques de chacune de ces contraintes. La construction de courbes stratifiées implique d'avoir, pour chaque classe créée, un nombre suffisant et homogène d'arbres pour que les courbes de références partielles restent valides. Dans le cas des variables en classe (comme le type de station), les strates visiblement sous-représentées ont été éliminées. Dans les cas des variables continues on cherche de surcroît à créer des classes entraînant des réponses statistiquement différentes dans la croissance radiale. Afin de comparer les courbes de croissance, les moyennes sont évaluées, à chaque date, par un test t.

Pour toute étude dendroécologique, la stratification de l'échantillon global entraîne la construction d'une multiplicité de courbes. Dans le cas de notre étude, il aurait été préférable de présenter les résultats des stratifications en fonction des résultats obtenus lors de l'étude des tendances à long terme (prise en compte ou non des cernes de moins de 30 ans, des corrections de la compétition, etc.). La sous-représentation de certains types de stations devrait également entraîner, surtout dans le cas de la futaie, des différenciations supplémentaires. L'ensemble de ces cas particuliers couplé à la dualité des systèmes de gestion ne pourrait être présenté ici de façon simple. Nous avons donc choisi de limiter les cas étudiés pour ne conserver que les plus pertinents. Les courbes d'indices de croissance sont calculées par la méthode de simple pondération en utilisant les indices bruts (non dégagés des effets de la compétition). Les courbes concernant les arbres de futaie sont calculées à partir des placettes situées sur plateau et prennent en compte l'ensemble des cernes disponibles. Les courbes concernant le taillis-sous-futaie ne différencient pas les stations de plateaux ou de versants et ne prennent en compte que les cernes ayant un âge cambial supérieur à 30 ans. Si certains graphiques ne correspondent pas à ce schéma, les explications seront données ultérieurement dans le texte.

### 2.2.2 - Stratification en fonction des paramètres dendrométriques

L'influence de six paramètres dendrométriques, sur la croissance radiale, est analysée. Le volume du houppier (Figure 102), sa surface et la surface de sa projection au sol (Figure 101) apparaissent, comme dans le cas des indices de hauteur ou des indices de surface terrière, des paramètres très déterminants pour la croissance radiale. Le niveau de croissance général est meilleur si les arbres ont un houppier bien développé, tant en futaie qu'en taillis-sous-futaie. Le nombre de feuilles est en relation avec le volume ou la surface du houppier ; ces deux paramètres peuvent être corrélés directement à la quantité de photosynthétats produits.

Le niveau de croissance peut donc s'expliquer d'après le volume de feuilles, ce volume étant lui même en partie lié à la densité du peuplement. La surface de projection du houppier au sol serait quant à elle plus directement liée à la densité des peuplements : l'arbre colonisant, avec ses rameaux, un espace plus ou moins vaste déterminé par la distance qui le sépare de ses voisins dans toutes les directions.

Il est intéressant par ailleurs de s'attarder sur la divergence des faisceaux de courbes, calculés pour la futaie ou le taillis-sous-futaie à partir du volume des houppiers ou de leurs projections au sol. Dans les deux traitements sylvicoles et pour les deux séries d'indices, les courbes se différencient très tôt (dates anciennes).

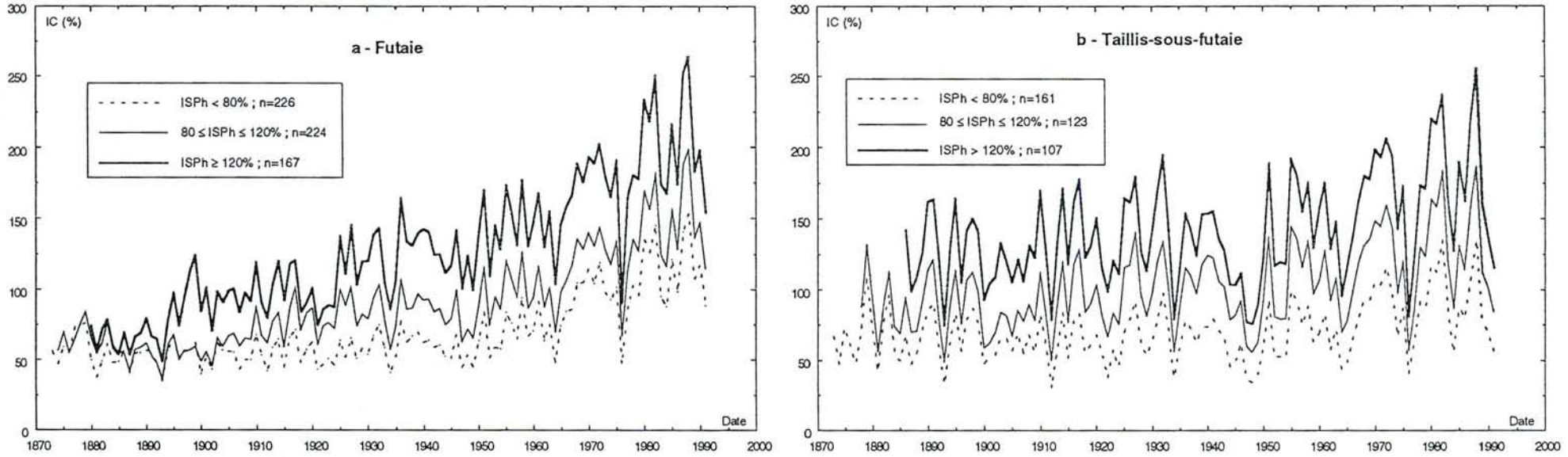



**Figure 101**: Evolution de la croissance radiale (IC%) des arbres de futaie (a) et de taillis-sous-futaie (b) selon différentes classes d'indices de surface de projection du houppier au sol (ISPh).

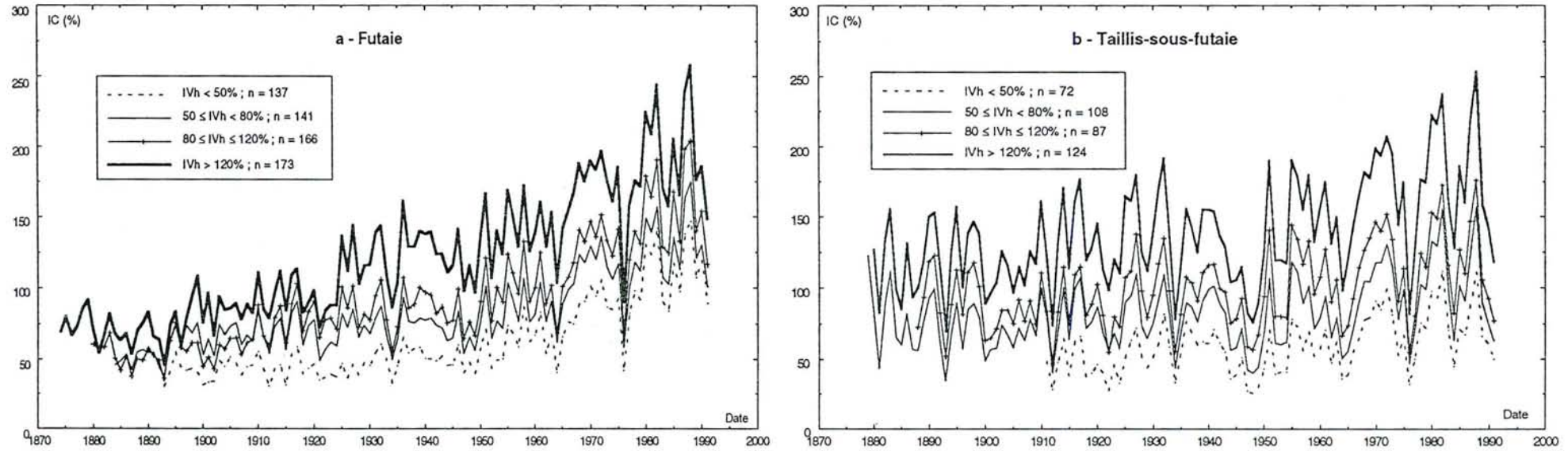
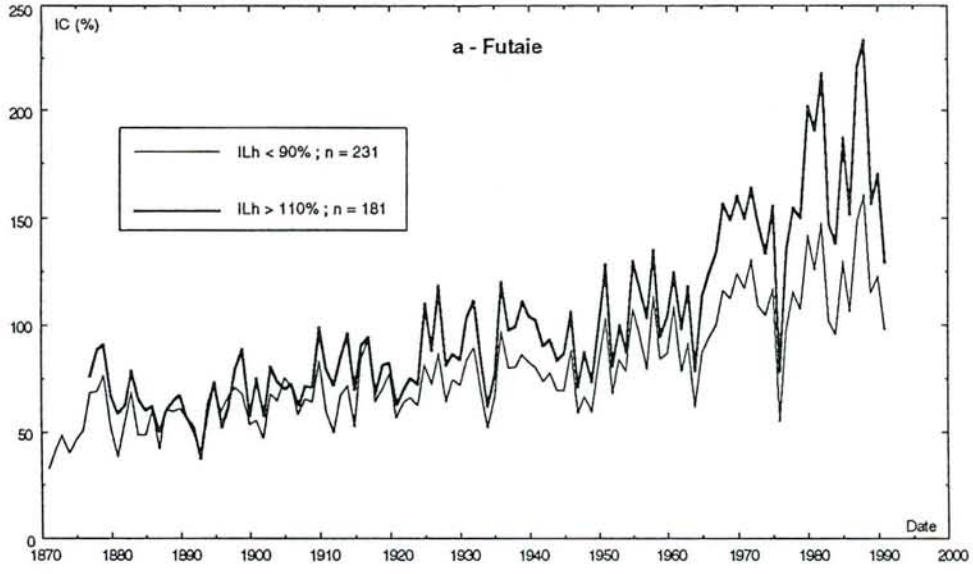



**Figure 102**: Evolution de la croissance radiale (IC%) des arbres de futaie (a) et de taillis-sous-futaie (b) selon différentes classes d'indices de volume du houppier (IVh).



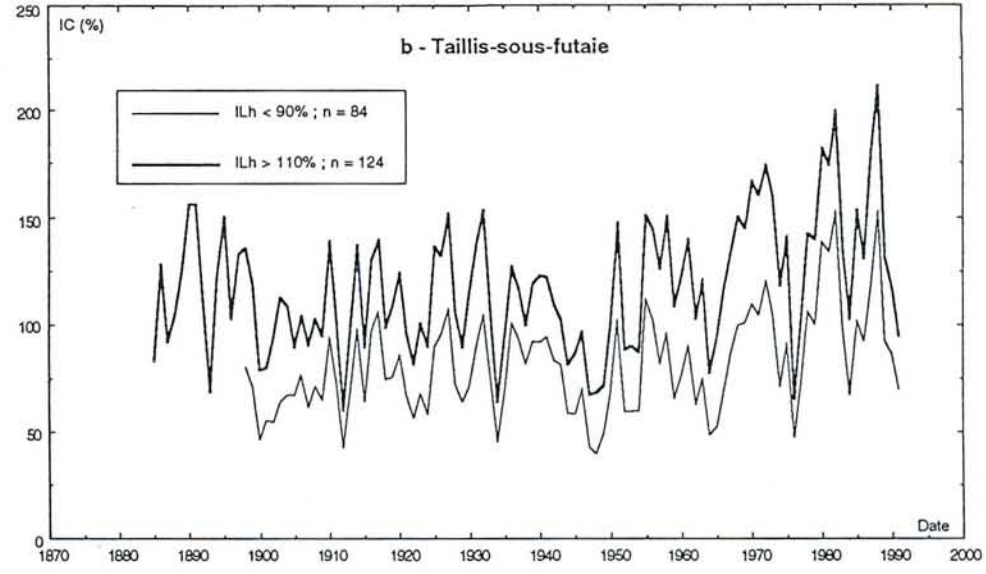




**Figure 103**: Evolution de la croissance radiale (IC%) des arbres de futaie (a) et de taillis-sous-futaie (b) selon différentes classes d'indices de longueur relative du houppier (ILh). Pour chaque traitement sylvicole, la courbe correspondant à la strate 90-110% n'est pas représentée car elle n'est pas significativement différente des autres strates.

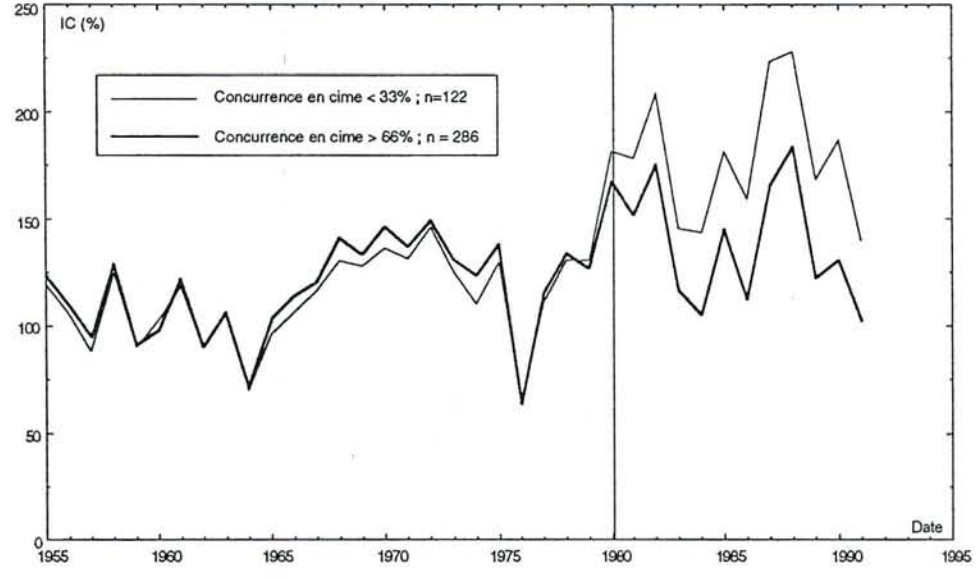



**Figure 104** : Evolution de la croissance radiale des arbres de futaie selon l'intensité de la concurrence en cime (ou pourcentage de contact des houppiers). Les deux courbes représentées sont significativement différentes à partir de 1980 (inclus).

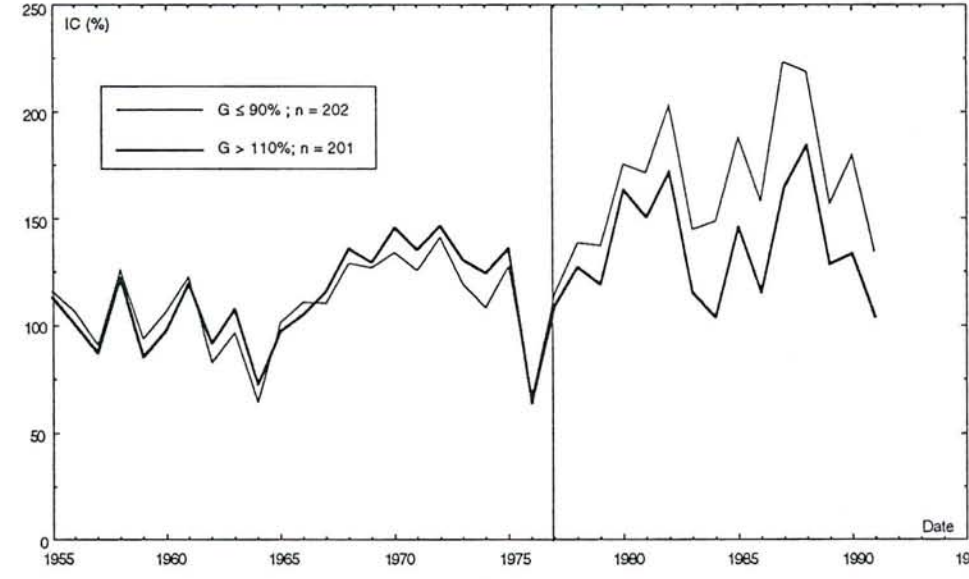



**Figure 105** : Evolution de la croissance radiale des arbres de futaie selon l'indice de surface terrière des peuplements (G). La courbe correspondant à la strate 90-110% n'est pas représentée car non significativement différente des deux autres subdivisions. Les deux courbes représentées sont significativement différentes à partir de 1977 (inclus).

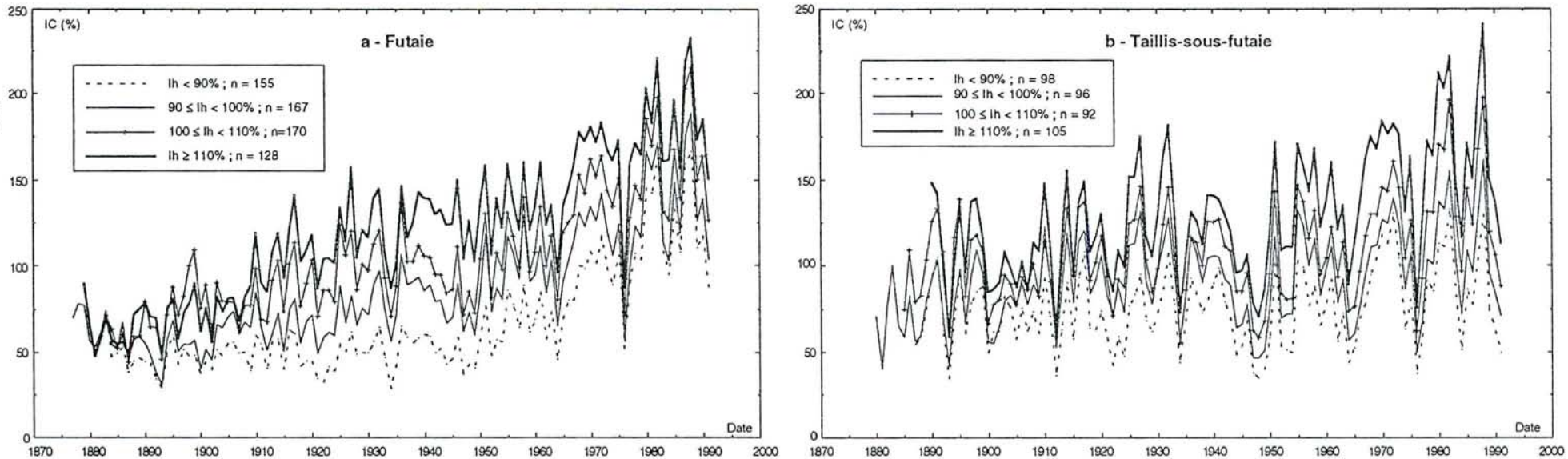



**Figure 106**: Evolution de la croissance radiale (IC%) des arbres de futaie (a) et de taillis-sous-futaie (b) selon différentes classes d'indices de hauteur bruts (Ih).

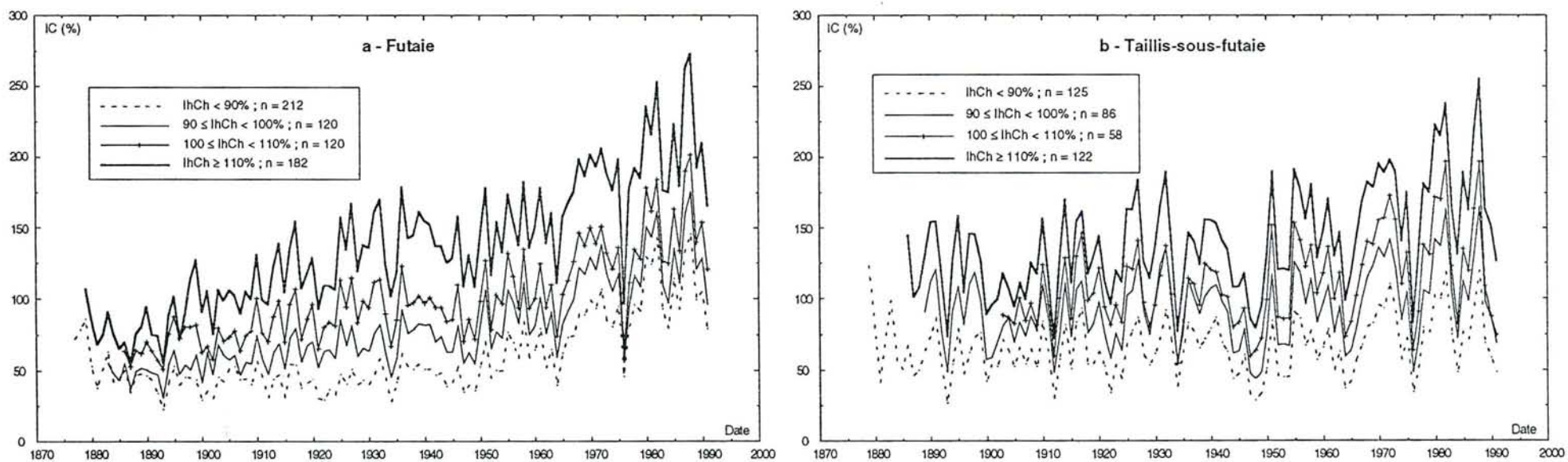



**Figure 107**: Evolution de la croissance radiale (IC%) des arbres de futaie (a) et de taillis-sous-futaie (b) selon différentes classes d'indices de hauteur corrigés des effets de la compétition (IhCh).

Les arbres possédant actuellement un gros et large houppier ont un niveau de croissance supérieur aux autres depuis au moins un siècle. Les possibilités d'expansion du houppier semblent donc être fixées rapidement dans la vie des arbres. Cette remarque jouerait alors en faveur de la théorie de stabilité des statuts sociaux (Delvaux, 1966, 1967, 1971, *in* Dreyfus, 1988) : les arbres les plus dominants actuellement (qui correspondent aux arbres ayant un houppier très développé) auraient toujours été dominants. Avec le temps, un arbre ne pourrait qu'affirmer de plus en plus son statut social ou, au pire, régresser. Les mouvements sociaux de type progressif seraient très rares (Delvaux, 1975, 1981, *in* Dhôte, 1990).

Bien que la contrainte liée à la compétition des houppiers soit bien moindre en taillis-sous-futaie qu'en futaie, on peut différencier des niveaux de croissance dans ces peuplements en fonction des paramètres décrivant le houppier. Pourtant, entre les deux traitements sylvicoles, les indices de projection du houppier au sol ne sont pas comparables. La strate correspondant à un indice de surface de projection inférieur à 80% (ISPh < 80%) est associée en moyenne, pour des arbres âgés de 100 à 130 ans, à des houppiers de 377 $m^3$ pour une surface au sol de 50 $m^2$ en futaie et à des houppiers de 656 $m^3$ pour une surface au sol de 84 $m^2$ en taillis-sous-futaie. La strate ISPh > 120% correspond, pour des arbres de même âge et respectivement en futaie et en taillis-sous-futaie, à des houppiers de 1243 $m^3$ et 2000 $m^3$ pour des surfaces au sol de 133 $m^2$ et 221 $m^2$ .

Le volume et l'étalement des houppiers des arbres de taillis-sous-futaie seraient gouvernés, pour une large part, par les conditions de nutrition minérale et d'alimentation en eau. Cette remarque est corroborée par le fait qu'en taillis-sous-futaie, il n'existe pas de relations entre la croissance radiale d'une part, et d'autre part la concurrence en cime ou la surface terrière du peuplement. A l'opposé, en futaie, on peut différencier les arbres poussant dans des peuplements plus ou moins denses par rapport à la "normale" ou plus ou moins ouverts, ce qui ce traduit par une zone de contact plus ou moins grande entre les houppiers (Figure 104) ou une surface terrière du peuplement plus ou moins importante (Figure 105). L'appréciation de la surface terrière ou de la concurrence entre les houppiers donne une image actuelle de la structure des peuplements. Les valeurs recueillies ne sont pas transposables sur un grand nombre d'années ; pourtant, les notations que nous avons effectuées permettent de montrer des comportements significativement différents sur une période de 10 ans.

Selon Daniels *et al.* (1986), la longueur relative du houppier (ou pourcentage de houppier ; "crown ratio") est une variable bien corrélée avec la croissance en diamètre (r=0,77 pour n=6490) ou en surface (r=0,48) du *Pinus taeda* L. Bert (1992) montre une bonne corrélation entre la longueur relative de houppier et la croissance en hauteur et peut stratifier efficacement un échantillon de 986 sapins à l'aide de cet indice. Dans notre étude, l'indice de longueur du houppier n'est corrélé ni à la croissance en hauteur ni à la surface terrière de façon significative. La stratification de notre échantillon initial ne permet de séparer que deux classes extrêmes par rapport à la "normale" (Figure 103). Cette mesure, reconnue par Daniels *et al.* (*op.cit.*) comme un intégrateur des effets de la compétition et du potentiel photosynthétique de l'arbre, semble, dans notre cas, moins pertinente que la taille du houppier ou que sa projection au sol pour évaluer le niveau de croissance des hêtres.

Enfin, puisqu'il existe une corrélation significative entre les indices de hauteur et les indices de surface terrière des arbres, il est possible de stratifier chaque courbe de référence globale en fonction de ces mêmes indices de hauteur. Si la stratification permet d'obtenir des faisceaux de courbes bien séparées en utilisant les indices de hauteur bruts, (Figure 106), l'emploi des indices de hauteur dégagés des effets de la compétition donne de meilleurs résultats (Figure 107). La création de classes à partir des indices de hauteur permet uniquement de séparer les arbres plus petits ou plus grands par rapport à la moyenne de l'échantillon total. L'utilisation des indices de hauteur dégagés des effets de la compétition permet de faire une distinction entre, par exemple, des arbres qui ont un mauvais niveau de croissance général (faible hauteur et petit diamètre) et des arbres qui ont un bon niveau de croissance radiale et une croissance en hauteur médiocre parce qu'ils proviennent de peuplements relativement clairs (arbres "trapus", de faible hauteur et de gros diamètre).

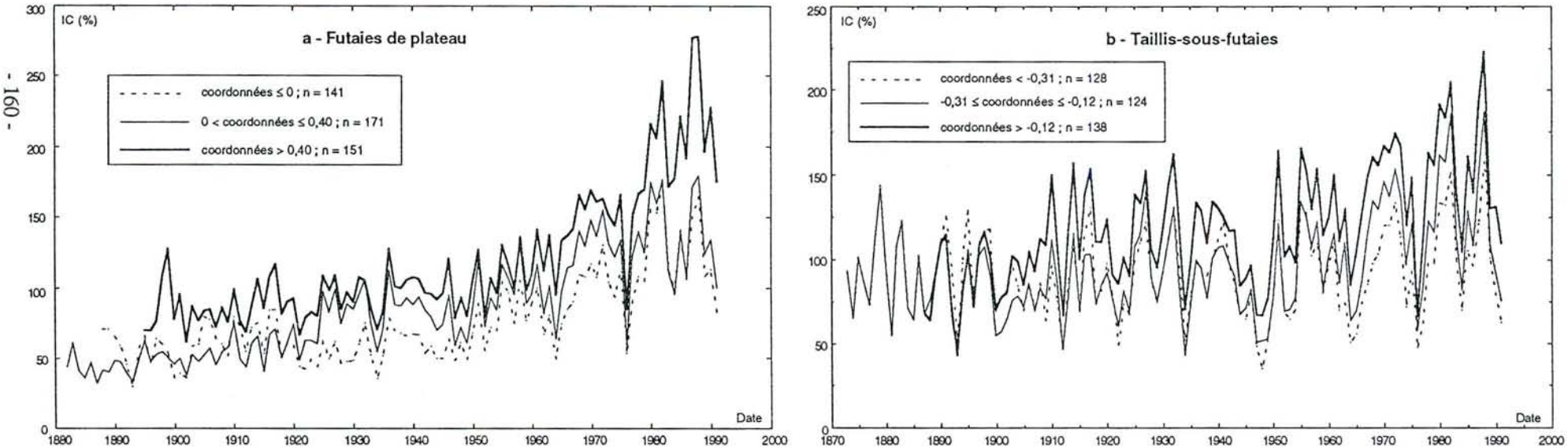



**Figure 108** : Evolution de la croissance radiale (IC%) des arbres de futaie (a) et de taillis-sous-futaie (b) selon la position des placettes le long du premier axe factoriel.

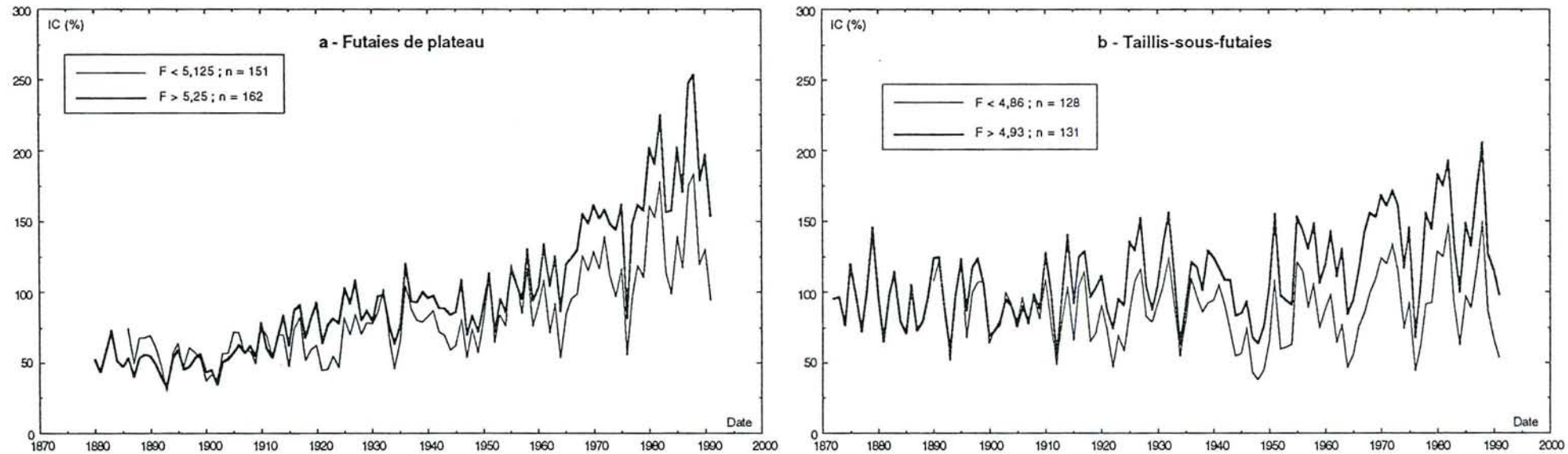
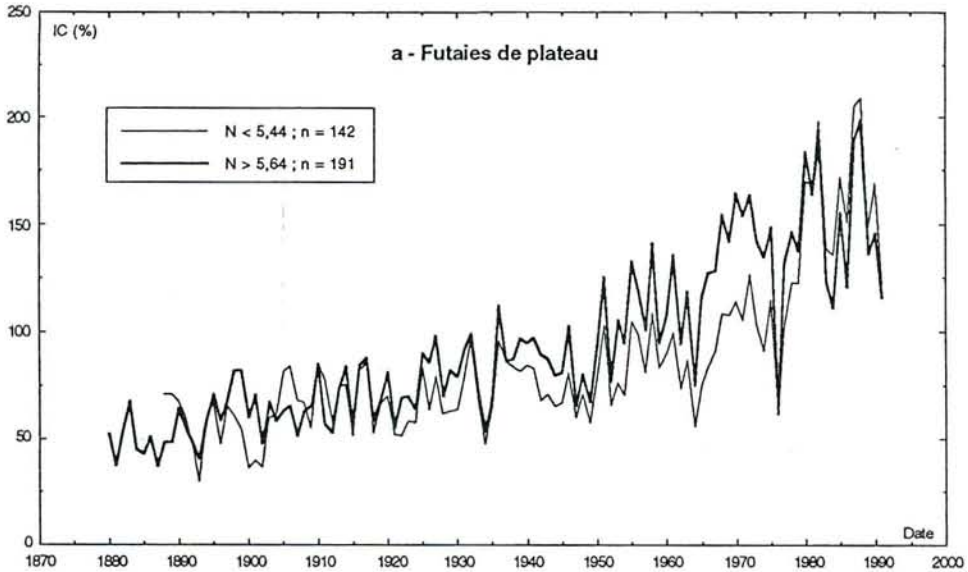



**Figure 109** : Evolution de la croissance radiale (IC%) des arbres de futaie (a) et de taillis-sous-futaie (b) selon le coefficient F d'Ellenberg moyen par placette. Seules les deux classes extrêmes, sur les trois réalisées, sont représentées.



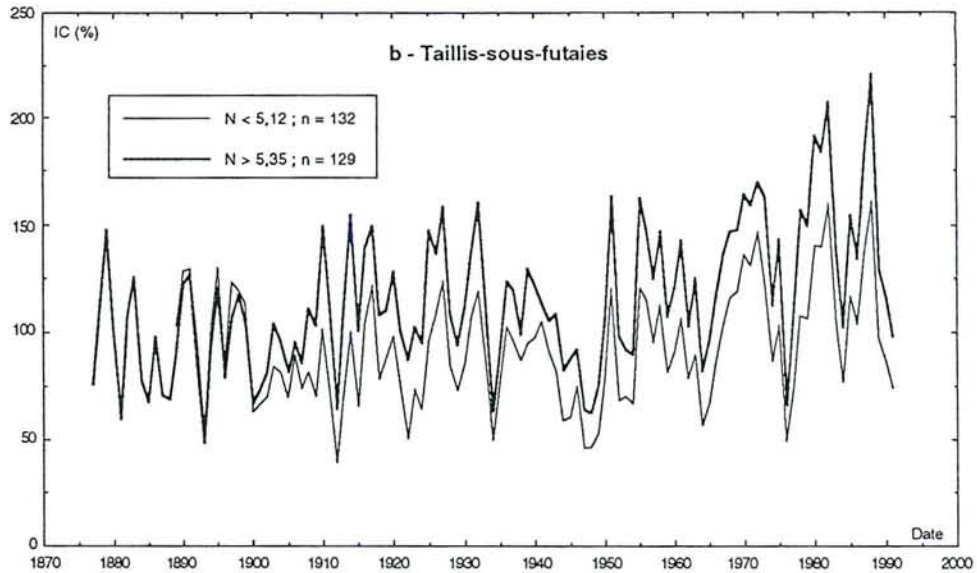




**Figure 110** : Evolution de la croissance radiale (IC%) des arbres de futaie (a) et de taillis-sous-futaie (b) selon le coefficient N d'Ellenberg moyen par placette. Seules les deux classes extrêmes, sur les trois réalisées, sont représentées.

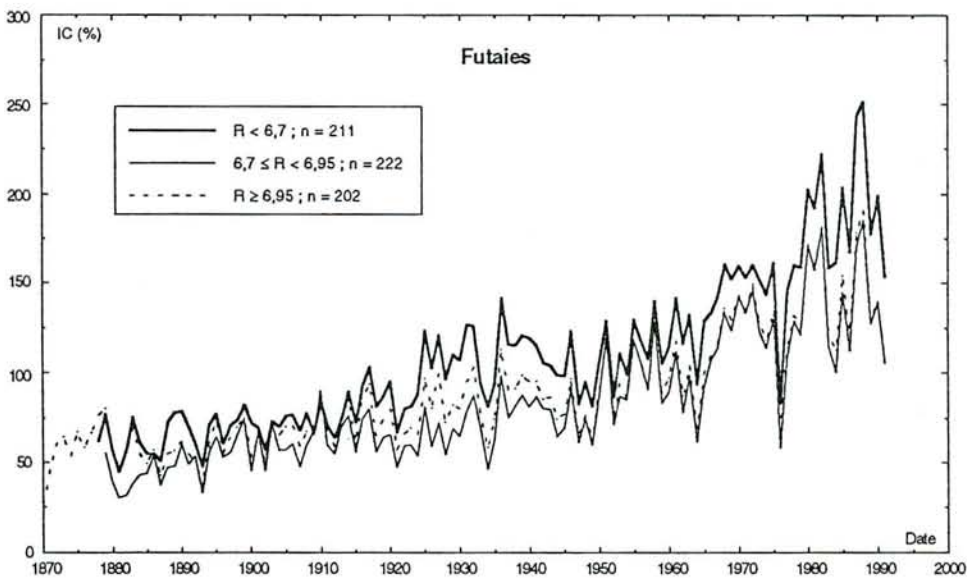



**Figure 111** : Evolution de la croissance radiale (IC%) des arbres de futaie selon le coefficient R d'Ellenberg moyen par placette.

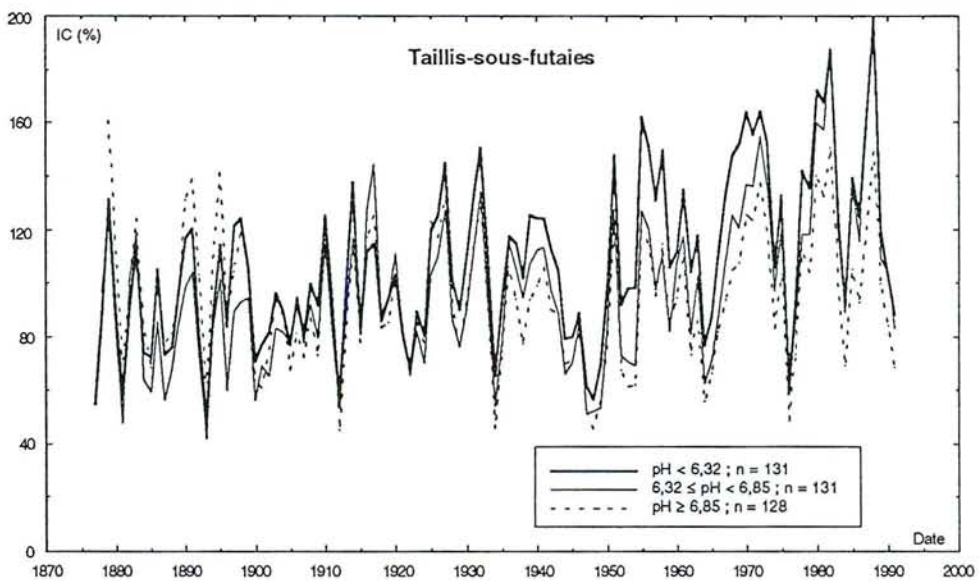



**Figure 112** : Evolution de la croissance radiale des arbres de taillis-sous-futaie (IC%) selon le pH de l'horizon $A_1$

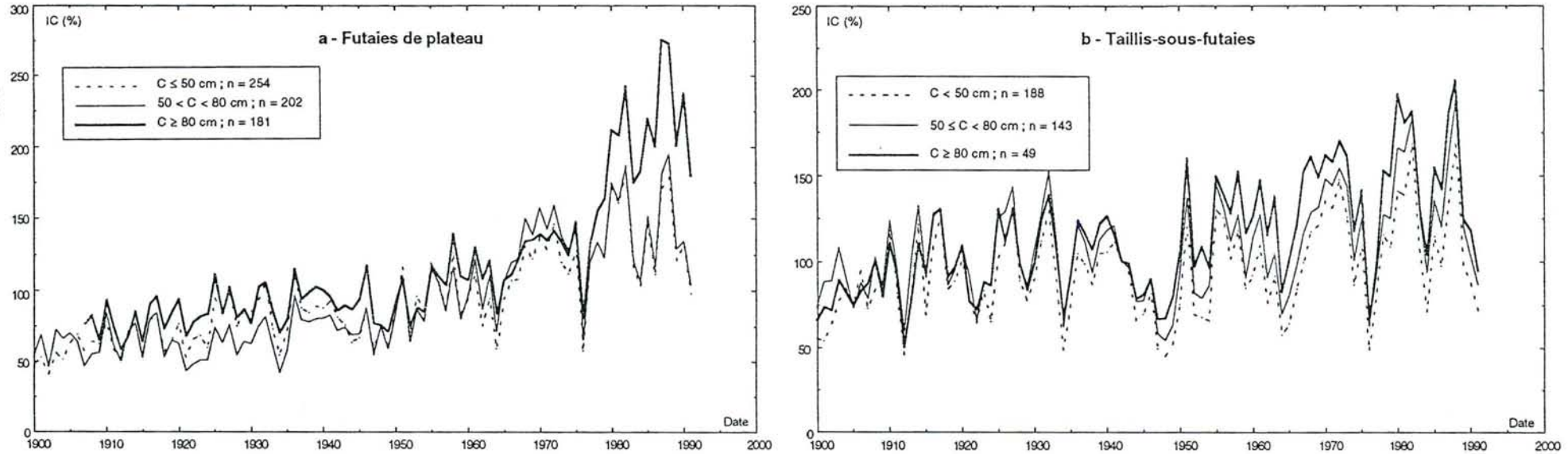



**Figure 113** : Evolution de la croissance radiale (IC%) des arbres de futaie (a) et de taillis-sous-futaie (b) selon la profondeur de l'horizon C.

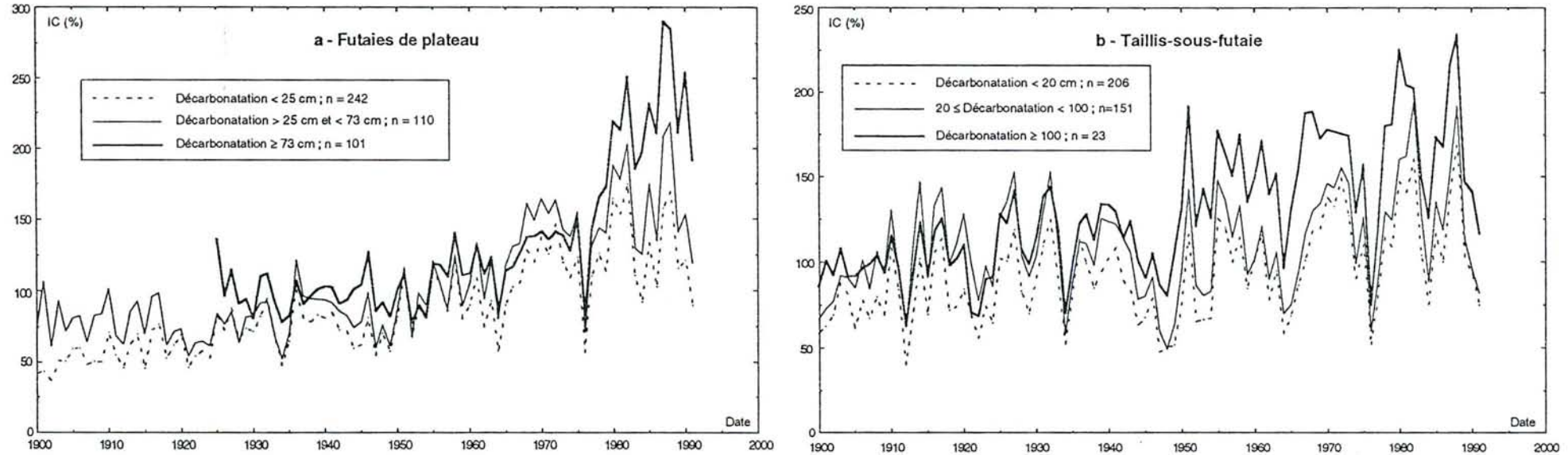



**Figure 114** : Evolution de la croissance radiale (IC%) des arbres de futaie (a) et de taillis-sous-futaie (b) selon la profondeur de décarbonatation.

### 2.2.3 - Stratification en fonction des paramètres physico-chimiques

Comme nous l'avons fait dans le paragraphe précédent, les courbes de référence globales peuvent être stratifiées en fonction des caractéristiques physiso-chimiques de chaque placette. Les paramètres déterminants pour la croissance, qui ont été mis en évidence lors de l'étude des indices de hauteur ou de surface terrière, se sont révélés intéressants pour différencier des comportements dans la croissance radiale des arbres.

La croissance radiale des futaies de plateau est bien corrélée aux coordonnées des placettes le long du premier axe factoriel (Figure 108 - a). La stratification de la courbe de référence des arbres de taillis-sous-futaie selon le même critère donne de moins bons résultats (Figure 108 - b). Ceci peut s'expliquer par la plus faible variablité des types stationnels rencontrés en taillis-sous-futaie. Ce point sera développé un peu plus loin. Cependant, même si les courbes ne se différencient pas de façon significative, elles s'ordonnent régulièrement. Les arbres qui possèdent le niveau de croissance le plus bas proviennent des placettes aux coordonnées les plus négatives sur l'axe 1. Ces placettes correspondent au pôle le plus sec défini par l'AFC. A l'opposé, du côté positif de l'axe, soit du côté des placettes les mieux alimentées en eau, on trouve les arbres qui ont les meilleurs niveaux de croissance.

Si on stratifie notre échantillon global à partir des facteurs écologiques qui ont déterminé l'édification de l'axe 1 lors de l'analyse phytoécologique, la différenciation des indices de croissance aboutit toujours à la séparation des placettes les plus sèches des placettes les plus fraîches. Les placettes les plus sèches sont caractérisées par de faibles valeurs pour le coefficient F d'Ellenberg (Figure 109) ou de fortes valeurs pour le coefficient R (Figure 111), ce qui correspond à des stations où le pH est élevé (Figure 112) du fait de la faible profondeur de décarbonatation (Figure 114). La profondeur de décarbonatation est elle-même en rapport avec la proximité de la roche mère calcaire (Figure 113). Le niveau de croissance radiale est également en relation avec le coefficient N d'Ellenberg (Figure 110). Cependant, même si la décarbonatation de l'humus permet une minéralisation plus active, elle coïncide avec une augmentation de la réserve utile. Il est donc impossible de séparer l'effet fertilisant de l'azote de l'amélioration des conditions d'alimentation hydrique. Les courbes de la figure 110 ne peuvent être interprétées uniquement en terme de nutrition.

L'étude des indices individuels de surface terrière a montré qu'ils étaient mieux corrélés aux variables dendrométriques qu'aux paramètres écologiques. La même remarque peut être faite en ce qui concerne les indices de croissance radiale. Si la stratification des courbes de référence en fonction des paramètres physico-chimiques des placettes est possible, les courbes obtenues se différencient moins bien que lors de la stratification en fonction des données dendrométriques. A l'inverse de la croissance en hauteur, la croissance radiale semble plus affectée par la structure des peuplements que par les variations stationnelles et l'utilisation d'indices de croissance dégagés des effets de la compétition n'améliore pas sensiblement les résultats. Cette remarque doit cependant être modérée. La faiblesse relative de la variabilité des indices de croissance radiale en fonction des caractéristiques du milieu est probablement due au fort déséquilibre existant dans la représentation des types de stations. S'il existe une grande amplitude dans les paramètres écologiques, topographiques, altitudinaux, etc., les techniques de stratification permettent de séparer très clairement plusieurs niveaux de croissance radiale à l'intérieur d'un échantillon représentatif d'arbres (Bert, 1992 ; Lebourgeois, 1995).

### 2.2.4 - Stratification en fonction des types de stations

L'analyse de la croissance radiale en fonction des types de stations donne, comme dans le cas des indices de hauteur, des résultats très partiels. Pour les stations représentées par moins de quatre placettes, soit une quarantaine d'arbres, il n'est pas possible de tracer un dendrogramme moyen statistiquement fiable. Pour ces placettes, la spécificité stationnelle est gommée par le bruit de fond correspondant aux perturbations locales de la croissance radiale (densité du peuplement, etc.). La figure 115 présente donc uniquement les courbes de croissance des arbres de futaie calculées à partir des stations 3, 4, 5 et 6. Pour le taillis-sous-futaie, le type de

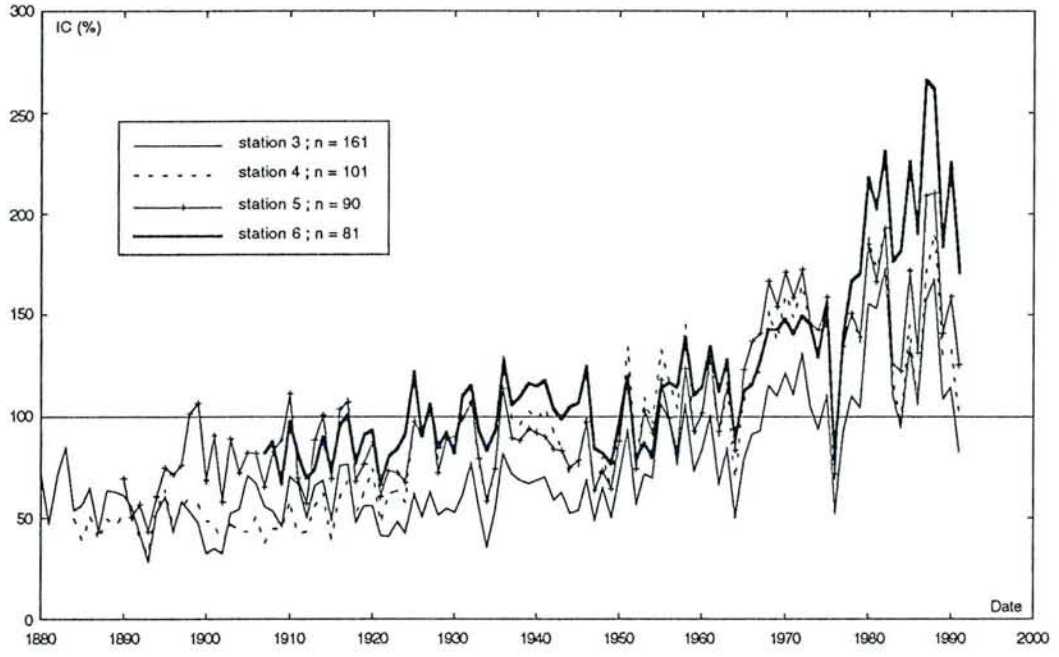



**Figure 115** : Evolution de la croissance radiale pour les arbres de futaie sur les stations de plateau.

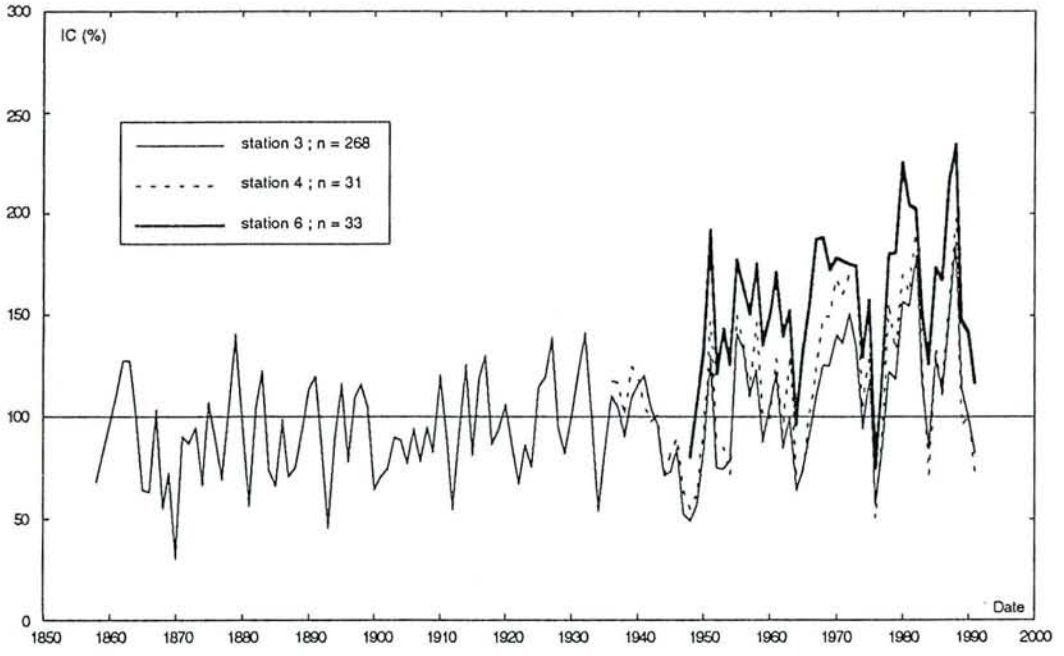



**Figure 116** : Evolution de la croissance radiale pour les arbres de taillis-sous-futaie sur les stations de plateau.

station n°3 est le seul à être convenablement représenté (Figure 116), mais les courbes correspondant aux stations 4 et 6 ont été tracées à titre d'information.

Pour les deux traitements sylvicoles, les résultats sont comparables. A la station n°3, la mieux représentée en terme d'effectif, correspond le niveau de croissance radiale le plus bas. Le passage successif aux types de station 4, 5 et 6 s'accompagne d'une amélioration du niveau de croissance. Cette amélioration est provoquée principalement, comme nous l'ont montré les variables physico-chimiques, par une augmentation de la disponibilité en eau dans les sols.

### 2.3 - Analyse de la tendance à long terme de la croissance radiale en fonction des paramètres environnementaux

Les types de stations n'étant pas représentés de façon homogène, il est difficile d'évaluer pour chacun d'eux l'intensité de la tendance à long terme. Cette opération est cependant possible pour quelques types de stations. Pour les arbres de futaie, les stations 3 et 4 sont conservées et les stations 5 et 6 regroupées dans un ensemble unique. En taillis-sous-futaie, seul le type de station 3 est considéré. A partir de ces sous-ensembles, il est alors possible de comparer la tendance à long terme :

- entre les deux types de gestion sylvicole et pour un même type de station ;
- entre plusieurs stations et pour une même gestion sylvicole.

Les valeurs de tendance à long terme, calculées à partir des indices de croissance bruts ou à partir des indices corrigés des effets de la compétition, ne sont pas significativement différentes pour un même type de station. Seules les courbes calculées à partir des indices bruts sont donc présentées.

#### 2.3.1 - Tendance à long terme en futaie et types de stations

Pour les arbres traités en futaie régulière et sur une période de temps comparable (depuis 1884), il existe une tendance à long terme positive et significative pour tous les sous-ensembles stationnels. La tendance à long terme la plus forte est observée pour le regroupement des stations 5 et 6 (+267% ; figure 118). Le type de station 3 montre la tendance la plus faible (+156% ; figure 117) et le type de station 4 a une situation intermédiaire (+218%).

#### 2.3.2 - Tendance à long terme en futaie et en taillis-sous-futaie pour un même type de station ou pour une même gamme de paramètres environnementaux

Les résultats que nous avons présentés, concernant la différence d'amplitude de la tendance à long terme de la croissance radiale entre les arbres de futaie et de taillis-sous-futaie, ne sont pas modifiés par la réduction des types stationnels considérés dans l'analyse (Figure 119) : en futaie, la tendance est plus forte qu'en taillis-sous-futaie. Entre 1906 et 1991, on observe une augmentation relative de la croissance radiale de +101% en futaie et de +40% en taillis-sous-futaie (+64% depuis 1865).

Plutôt que de comparer les accroissements radiaux d'arbres issus d'un même type de station, on peut choisir de ne conserver que ceux qui ont poussé dans une fourchette de conditions environnementales la plus étroite possible. Cette méthode permet alors de s'affranchir de la variabilité existant à l'intérieur de chaque type de station. Quarante quatre placettes peuvent ainsi être choisies parmi celles qui ont été classées dans les types de stations 3 et 4. Le tableau 33 donne quelques caractéristiques écologiques et physico-chimiques moyennes pour les placettes choisies. La figure 120 montre la répartition des placettes sélectionnées sur le plan formé par les axes factoriels 1 et 2. Les courbes de croissance moyennes calculées à partir des arbres sélectionnés peuvent alors être comparées deux à deux pour estimer les effets de la sylviculture.

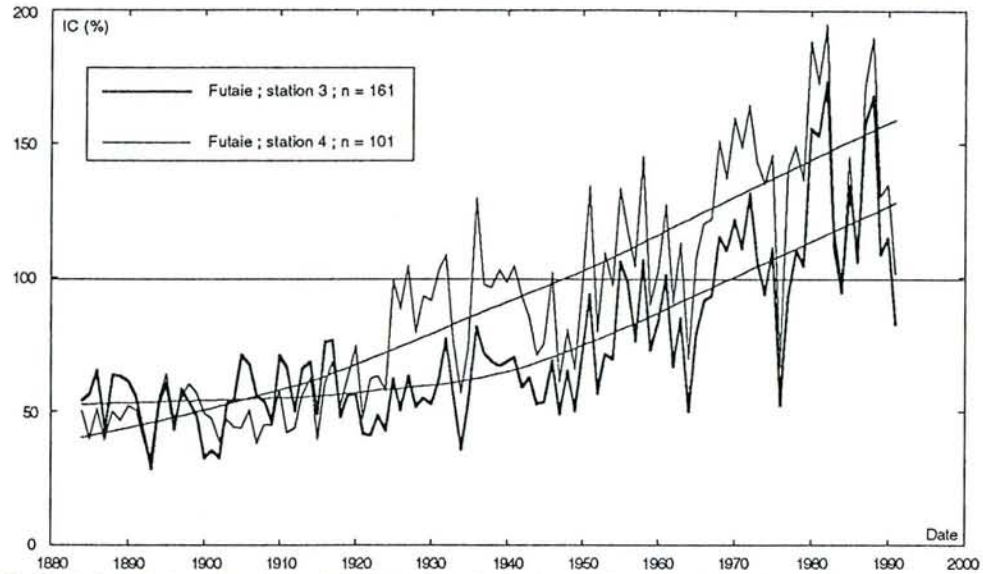



**Figure 117** : Evolution de la croissance radiale des arbres de futaie pour les types de stations n°3 et n°4.

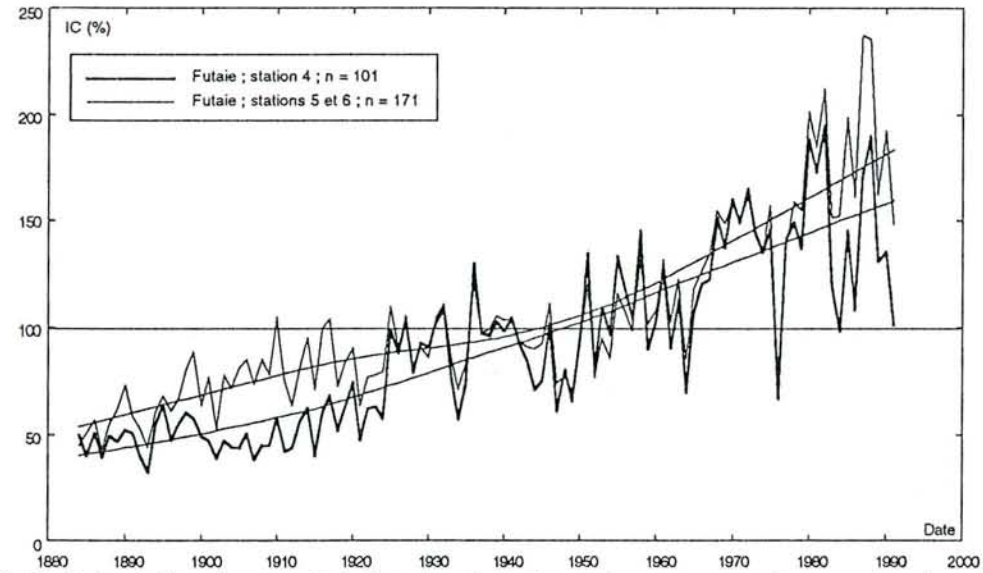



**Figure 118** : Evolution de la croissance radiale des arbres de futaie pour le regroupement des types de stations n°5 et n°6. Comparaison avec l'évolution de la croissance pour le type de station n°4.

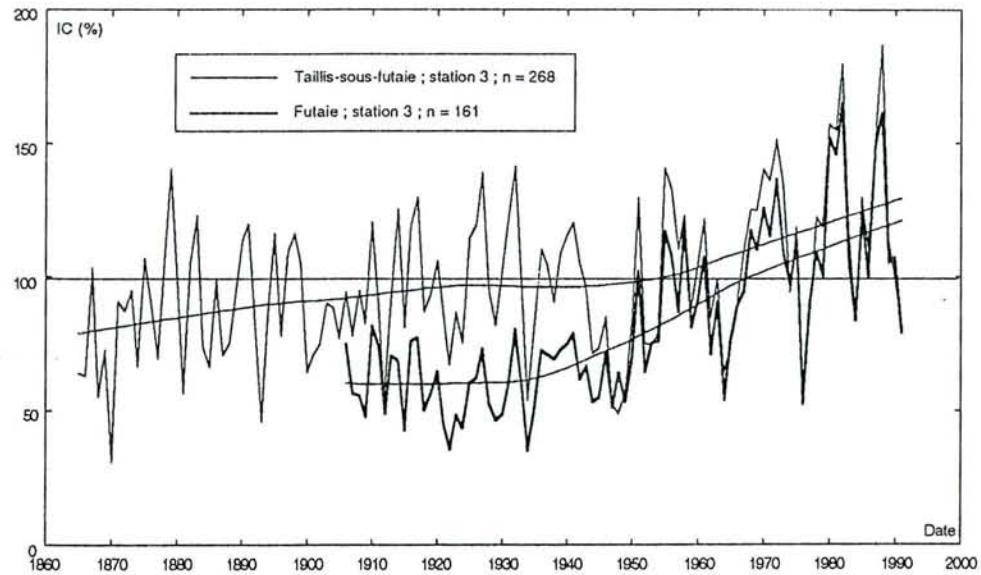



**Figure 119** : Evolution de la croissance radiale des arbres de futaie et de taillis-sous-futaie pour les types de stations n°3.

| | Futaie | Taillis-sous-futaie | Valeurs minimum et maximum relevées dans les stations 3 et 4 | |
|---|---|---|---|---|
| Nombre de placettes | 18 | 26 | - | - |
| Nombre d'arbres | 181 | 258 | - | - |
| Indice de réserve utile (mm) | 25 | 31 | 11 | 62 |
| Profondeur de décarbonatation (cm) | 19 | 19 | 0 | 45 |
| pH | 6,4 | 6,5 | 5,2 | 7,4 |
| Profondeur de l'horizon C (cm) | 49 | 50 | 21 | 100 |
| Profondeur d'enracinement (cm) | 59 | 65 | 30 | 110 |
| Coordonnées sur l'axe 1 | -0,16 | -0,19 | -0,80 | 0,4 |
| Coefficient F d'Ellenberg | 5,03 | 4,90 | 4,62 | 5,44 |
| Coefficient R d'Ellenberg | 6,95 | 6,93 | 6,52 | 7,30 |
| Coefficient N d'Ellenberg | 5,40 | 5,23 | 4,86 | 6,13 |

**Tableau 33** : Caractéristiques écologiques et physico-chimiques moyennes des placettes choisies en futaie et en taillis-sous-futaie parmi celles inventoriées dans les types de stations 3 et 4.

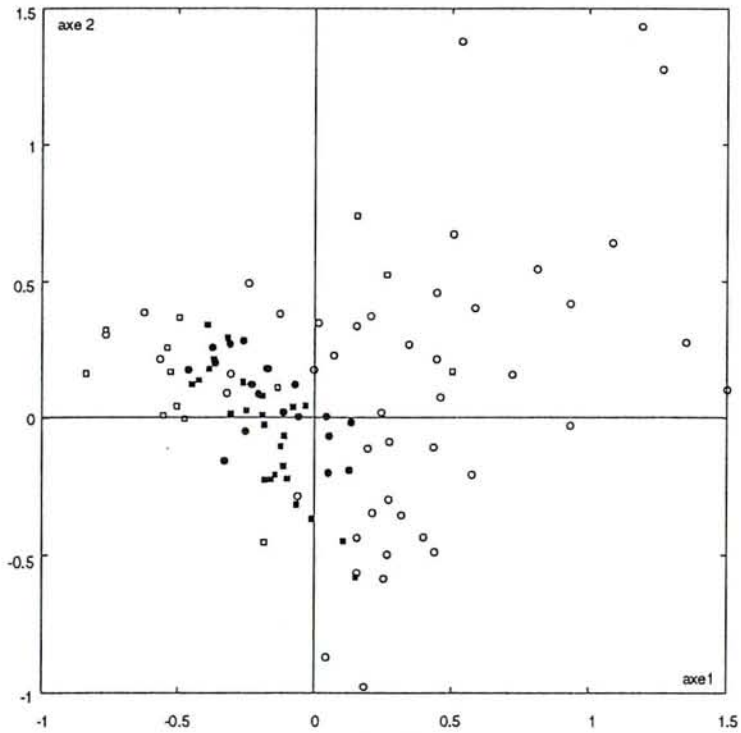



**Figure 120** : Position, sur le plan 1-2 de l'AFC, des placettes de futaies (cercles noirs) et de taillis-sous-futaies (carrés noirs) choisies comme sous-échantillon au sein de l'ensemble des placettes échantillonnées

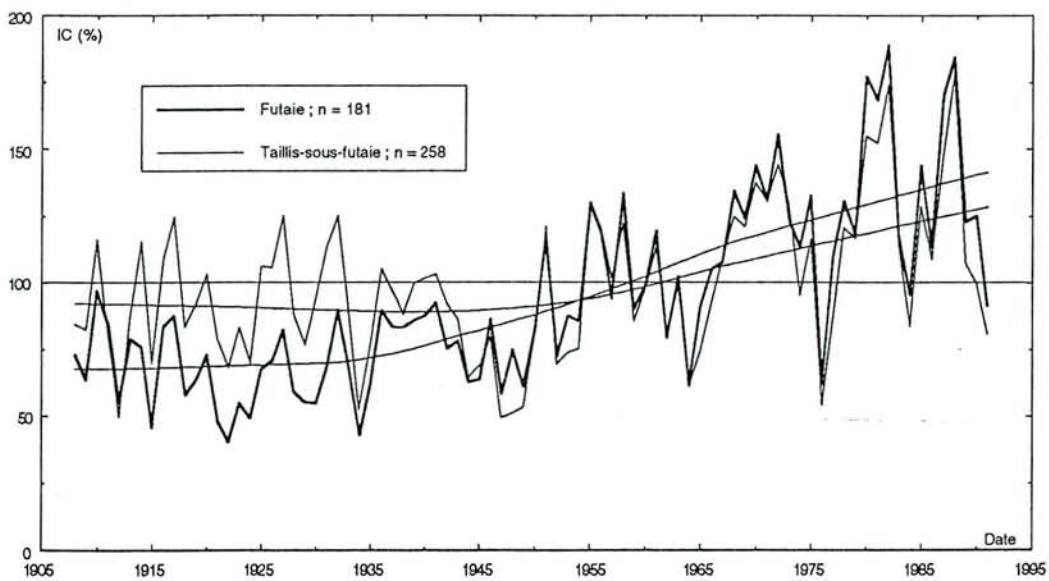



**Figure 121** : Evolution de la croissance radiale des arbres de futaie et de taillis-sous-futaie sélectionnés à partir des conditions environnementales des placettes. Les cernes de moins de 30 ans ne sont pas pris en compte.

En restreignant la fourchette des variables environnementales, le sous-échantillon formé dans les taillis-sous-futaie intègre 66% des arbres de l'échantillon initial. En futaie, au contraire, la variabilité stationnelle est plus grande et les arbres sélectionnés ne représentent que 29% de l'échantillon initial. Dans le cas des futaies, les arbres choisis proviennent des placettes les moins productives alors que dans le cas du taillis-sous-futaie ces placettes correspondent aux meilleurs sites que nous avons pu échantillonner. Pour ces deux raisons, la courbe de croissance des arbres de futaie recalculée ici est inférieure à la courbe générale initiale et la tendance à long terme est moins forte. La courbe concernant les arbres de taillis-sous-futaie est légèrement supérieure à la courbe de référence initiale et la valeur de la tendance à long terme est inchangée.

La comparaison des courbes de croissance obtenues pour la futaie et le taillis-sous-futaie est présentée sur la figure 121. Chacune des deux courbes ne prend en compte que les cernes d'un âge cambial supérieur à 30 ans. L'exclusion de ces cernes entraîne une réduction de la tendance en futaie comme nous l'avons montré par ailleurs, et une réduction de la période de temps étudiée. Sur la période 1908 - 1991, et pour les seuls arbres de futaie sélectionnés, l'augmentation relative de la croissance radiale est de +156%. Sans les cernes de moins de 30 ans, l'augmentation n'est plus que de +107%. Cette valeur reste quand même supérieure à celle calculée pour les arbres de taillis-sous-futaie : +88%.

## III - CONCLUSION

Malgré un fort déséquilibre dans la représentation des types de stations pour chacun des traitements sylvicoles étudiés, il est possible de mettre en évidence les facteurs les plus déterminants pour la croissance en hauteur ou la croissance radiale des hêtres sur les plateaux calcaires de Lorraine, et les résultats obtenus à propos de la croissance en hauteur peuvent être transposés à la croissance radiale.

L'analyse des indices de hauteur dégagés des effets de l'âge, soit à l'échelle stationnelle, soit à l'échelle de la placette, montre que l'alimentation en eau est le facteur principal de différenciation de la croissance en hauteur. Ce résultat a déjà été obtenu lors de précédentes études, dans la même région naturelle (Becker *et al.*, 1977 ; Becker *et al.*, 1978 ; Becker, 1979 ; Becker *et al.*, 1980). A l'image de la croissance en hauteur, la croissance radiale est nettement favorisée par l'amélioration de la disponibilité en eau. Le Tacon & Nys (1970) ont montré que le hêtre est indifférent à la présence de calcaire dans le sol puisque les hauteurs maximales ont été observées, lors de leur étude, sur des sols bruns calcaires colluviaux et des rendzines colluviales. Ces sols sont à la fois très carbonatés et très bien alimentés en eau. A l'opposé, les plus faibles hauteurs ont été observées sur des rendzines de plateau, sols également très carbonatés mais pauvres en eau. En l'absence d'analyse chimique, il ne nous est pas possible de corréler la croissance avec le niveau de nutrition mais d'autres études ont montré que le hêtre est assez indifférent aux propriétés chimiques du sol (Lepoutre & Tessier du Cros, 1979). Il peut s'adapter à des milieux aux pH très différents. Cette possibilité semble être en liaison avec sa capacité à s'associer à des champignons symbiotiques adaptés à des pH variés ou à des types d'alimentation azotée différents (type ammoniacal ou nitrique) (Le Tacon, 1981 ; Le Tacon *et al.*, 1989).

L'amélioration de la croissance avec celle du bilan hydrique est évidente, aussi bien au niveau stationnel (principalement pour les stations de plateaux qui sont les mieux représentées dans notre échantillonnage), que lorsque l'on s'intéresse aux caractéristiques écologiques générales de chaque placette. L'augmentation dans le sol de la réserve d'eau utile à la croissance se fait parallèlement à l'évolution des caractéristiques édaphiques, elles-mêmes liées principalement aux phénomènes de décarbonatation et de lessivage. Les sols les plus secs sont les sols les moins profonds. Parallèlement, les sols les moins profonds sont les plus carbonatés (en situation de plateau). La quantité d'eau disponible dans un sol est donc étroitement corrélée à la profondeur de l'horizon C, mais aussi au pH des horizons superficiels ou à la profondeur de décarbonatation. La corrélation observée entre la croissance en hauteur et les types de stations correspond donc principalement, en situation de plateau, à une corrélation avec les types génétiques de sols. En station 3, les sols sont principalement des rendzines brunifiées ; en station 7 ce sont des sols lessivés. Entre ces extrêmes on trouve les sols bruns calciques (station 4), bruns eutrophes (station 6) et bruns lessivés (station 7).

La notion de "type de sol" est cependant insuffisante pour caractériser les différences de croissance en hauteur observées entre chaque placette. A l'intérieur de chaque type de station il existe une variabilité non aléatoire de la croissance en hauteur et cette variabilité peut être corrélée à des mesures physiques plus fines : profondeur de l'horizon C, profondeur de décarbonatation, indice de réserve utile, pH. Pourtant, ces mesures sont moins efficaces que la flore pour estimer de façon objective la quantité d'eau potentiellement disponible sur une placette. Les indices d'Ellenberg apparaissent comme des outils pertinents pour mettre en évidence des influences qui seraient apparues comme moins évidentes avec les critères habituellement utilisés. En situation de plateau, l'augmentation de la réserve utile peut être mise en évidence avec le coefficient F d'Ellenberg. Ce facteur est alors étroitement corrélé aux coefficients R (caractérisant le pH) et N (caractérisant le niveau de nutrition azotée). L'amélioration de la disponibilité en eau se fait parallèlement à une diminution du pH du sol (donc du coefficient R), et, en l'absence de sols très acides, la décarbonatation des horizons superficiels s'accompagne d'une activité croissante des humus (donc d'une augmentation du coefficient N). Le seul coefficient F ou l'association des coefficients R et N (tous deux non corrélés entre eux) peut permettre d'expliquer de façon convenable la variabilité des indices de hauteur, surtout dans le cas des placettes de futaie où nous disposons d'une variabilité environnementale supérieure à celle existant en taillis-sous-futaie. Dans les situations de pente ou de fond de vallon, ces trois facteurs ne sont plus si étroitement corrélés. Dans les colluvium épais et fins, la réserve utile peut augmenter très fortement mais la recharge permanente en ions calcium notamment permet l'installation d'espèces calcicoles qui s'accomoderaient par ailleurs de réserves en eau plus faibles (faible coefficient F d'Ellenberg). Toutes stations confondues, il est donc plus difficile d'expliquer la croissance en hauteur à l'aide des seuls coefficients d'Ellenberg. Cette conclusion ne peut cependant pas être définitive étant donné la sous-représentation de ces situations topograpiques particulières. Il semblerait alors intéressant d'étudier plus précisément les rapports entre la végétation et les propriétés des sols (profondeur de décarbonatation, réserve utile, etc.) dans une large variabilité stationnelle pour évaluer la pertinence des coefficients d'Ellenberg dans des situations où il est difficile de calculer une réserve en eau disponible (sol très caillouteux, peu profond, sur dalles calcaires fissurées, etc.).

Comme la croissance en hauteur, la croissance radiale est dépendante de la quantité d'eau disponible dans le sol. Malgré la variabilité réduite des conditions environnementales rencontrées par rapport à celles existant dans l'ensemble des types de stations décrits sur les plateaux calcaires, il est possible de différencier les accroissements radiaux moyens des arbres en fonction des variables liées à la disponibilité en eau (profondeur de l'horizon C, profondeur de décarbonatation, pH, coefficients d'Ellenberg). Cette constatation est particulièrement intéressante dans le cas des taillis-sous-futaies. Bien qu'ils aient été essentiellement rencontrés dans le type de station 3, il est possible de différencier le niveau de croissance radiale des arbres en fonction de paramètres explicatifs plus précis. Ceci montre bien que la croissance radiale peut être analysée très finement en fonction des conditions de milieux et que si ces variations de croissance font partie d'un bruit de fond indésirable par rapport à l'objectif poursuivi (étude des tendances à long terme, étude dendroclimatique, etc.), il est nécessaire d'échantillonner un grand nombre d'arbres dans de nombreuses placettes. Il n'est toutefois pas question de remettre en cause la validité des typologies. Les unités stationnelles restent le meilleur moyen pour estimer les potentialités forestières au niveau d'une région naturelle. Dans notre étude, si chaque station avait été représentée par un nombre d'arbres conséquent, les différences de productivité seraient sans doute apparues très clairement comme dans le cas d'autres études dendroécologiques où l'aspect stationnel a été plus particulièrement étudié (Bert, 1993 ; Lebourgeois, 1995).

La croissance radiale est également très liée à l'architecture des arbres. Si les peuplements sont très denses ou si les houppiers sont peu développés, la croissance radiale est affectée. Dans le cas des futaies, on peut penser que la sylviculture joue un rôle important dans la dynamique de la croissance radiale. Si la surface terrière des peuplements est relativement faible, les couronnes peuvent se développer correctement, ce qui entraîne l'augmentation de la masse foliaire (Aussenac & Valette, 1982). Becker (1989 a et b) et Bert (1992) ont d'ailleurs mis en évidence que des arbres ayant un houppier mal développé, en raison des pratiques sylvicoles, présentaient, d'une part, un niveau de croissance radial médiocre et que, d'autre part, ces arbres résistaient moins bien à des contraintes climatiques extrêmes comme une forte sécheresse.

La sylviculture ne peut cependant expliquer à elle seule l'état de développement des houppiers. En taillis-sous-futaie, la liaison entre le volume du houppier et la croissance radiale est évidente. Pourtant, contrairement à la futaie, il n'existe aucune corrélation entre la surface terrière des peuplements de taillis-sous-futaie et la croissance radiale. Les cimes ne sont d'ailleurs jamais en contact dans la majorité des cas : 83% des arbres de taillis-sous-futaie échantillonnés ont une concurrence en cime inférieure ou égale à 30%, et 38% des arbres poussent de façon totalement libre. Le développement des houppiers des arbres de taillis-sous-futaie semble donc principalement lié aux conditions de milieu. Cette relation doit aussi exister en futaie mais elle est plus ou moins masquée par la sylviculture. Les corrélations entre les facteurs environnementaux et les paramètres de taille du houppier sont d'ailleurs bien plus faibles chez les arbres de futaie que chez les arbres de taillis-sous-futaie.

L'analyse à long terme de la croissance radiale à partir d'arbres choisis en fonction des gammes de conditions environnementales tend à conforter et préciser les résultats que nous avons présentés auparavant. Pour chaque type de station représenté par un nombre suffisant d'arbres, une évolution positive de la croissance radiale est mise en évidence depuis la fin du siècle dernier. Dans les peuplements de futaie, l'amplitude de la tendance à long terme est liée à la fertilité stationnelle. Si on admet l'existence d'au moins un facteur environnemental favorisant en partie la croissance à long terme, il semblerait que l'action de celui-ci soit d'autant plus bénéfique que le type de station est, au départ, plus productif. En taillis-sous-futaie, à cause d'une plus grande homogénéité dans les conditions stationnelles, il n'est pas possible de mettre en évidence le même phénomène.

L'analyse de la dynamique de la croissance radiale pour une gamme de paramètres environnementaux réduite et commune aux arbres de futaie et de taillis-sous-futaie montre que les résultats apportés par l'étude globale de l'échantillon initial restent valides. La tendance à long terme positive de la croissance radiale existe quel que soit le type de gestion sylvicole, et la tendance, observable depuis le début du siècle, peut être fractionnée en deux parties indépendamment de la sylviculture. Les surfaces de cernes ont évolué positivement et régulièrement depuis le début du siècle, voire le milieu du siècle dernier, jusqu'aux années 1950. Après cette date, l'amplitude de la tendance a augmenté fortement. La réduction de la gamme des paramètres environnementaux n'entraîne pas de modification de la tendance pour les arbres de taillis-sous-futaie car ceux-ci ont été échantillonnés dès le départ dans des conditions très homogènes. Par contre, pour les arbres de futaie, qui couvrent un ensemble de placettes très variables au point de vue stationnel, la réduction de la gamme des paramètres environnementaux se traduit par une baisse de l'intensité de la tendance à long terme. Il semblerait donc que la différence observée précédemment dans l'évolution de la croissance radiale des arbres de futaie et de taillis-sous-futaie, surtout avant 1950, soit en partie due à un effet stationnel. Pourtant malgré la prise en compte de ce facteur stationnel la tendance à long terme de la croissance radiale des arbres de futaie reste supérieure à celle des arbres de taillis-sous-futaie.

# Chapitre VII

# CROISSANCE ET FACTEURS CLIMATIQUES

## I - INTRODUCTION

Les variations à haute et moyenne fréquence des largeurs ou des surfaces de cernes peuvent être corrélées aux variations stochastiques des facteurs climatiques susceptibles d'agir sur la croissance. Il est possible de construire une relation statistique entre les largeurs de cernes et les variables climatiques. Cette relation statistique peut être utilisée soit pour mettre en évidence les principales contraintes qu'exerce le climat sur la croissance (approche explicative), (Serre, 1976 ; Becker, 1989b ; Tessier, 1989), soit pour reconstruire l'évolution du climat en fonction des enregistrements annuels contenus dans les cernes (approche déductive), (Fritts, 1976 ; Schweingruber *et al.*,1978 ; Hughes *et al.*, 1982). Pour modéliser la réponse des arbres au climat, on peut tout d'abord supposer l'existence d'une relation linéaire simple développée *a priori* ou déduite par des analyses de corrélations (Schluman, 1956 *in* Fritts, 1987 ; Fritts, 1976). Une autre méthode plus élaborée utilise une approche multivariable, l'analyse en composantes principales, pour construire ce qui est appelé une *fonction de réponse* (Fritts, 1971 ; Fritts, 1974).

Pour traiter nos données, l'analyse des corrélations entre les variables et les méthodes de régressions multiples sont employées. Cette approche ne nous permet pas de reconstruire au mieux les variations stochastiques des surfaces de cernes à l'aide de modèles complexes, mais elle nous permet de mettre en évidence les variables climatiques les plus déterminantes pour la croissance radiale.

Pour étudier l'influence des facteurs climatiques sur la croissance, il est nécessaire de posséder une chronologie maîtresse représentant au mieux le signal climatique enregistré par la population d'arbres échantillonnés (Tessier, 1986).

Il est également indispensable d'obtenir des enregistrements climatiques complets et homogènes sur une période la plus longue possible afin de préparer un ensemble de prédicteurs pertinents.

## II - MATERIEL ET METHODES

### 1 - Données climatiques

L'ensemble des données climatiques de base provient de la station météorologique de Nancy - Essey. Cette unique station suffit pour analyser les relations entre la croissance radiale et les conditions climatiques car l'ensemble des arbres échantillonnés provient d'une région naturelle soumise à un même macroclimat. Les variations aléatoires du climat interviennent à une échelle spatiale qui les rend communes à tous les individus d'une même région (Tessier, 1986), et les résultats des analyses statistiques sont indépendants des valeurs absolues prises par les variables climatiques entre les stations météorologiques (Bert, 1992).

#### 1.2 - Pluies et températures

Les précipitations et les températures mensuelles sont disponibles sur la période 1881-1991. Entre ces deux dates la température annuelle moyenne est de 9,68°C et les précipitations annuelles de 738 mm.

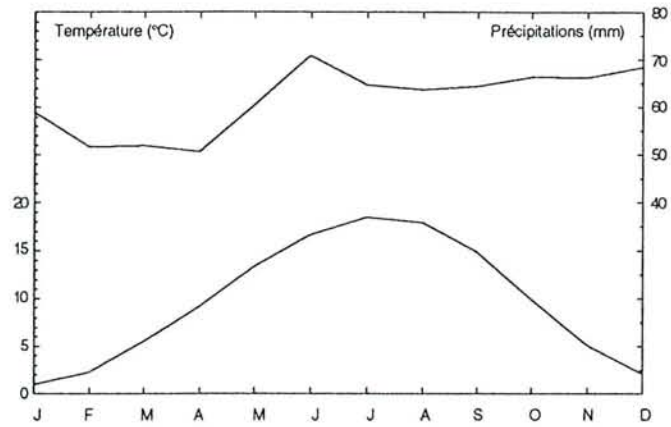



**Figure 122** : Diagramme ombrothermique de Gaussen pour la station météorologique de Nancy-Essey. La somme des précipitations et les températures mensuelles sont calculées à partir des données de 1881 à 1991.

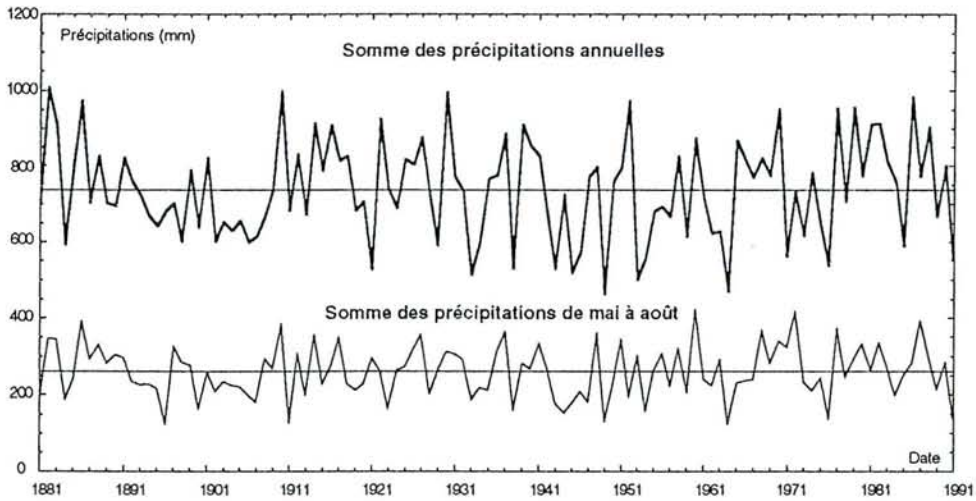



**Figure 123** : Evolution des précipitations annuelles et de la somme des précipitations des mois de mai, juin, juillet et août entre 1881 et 1991 par rapport à leurs moyennes (respectivement 738 mm et 260 mm).

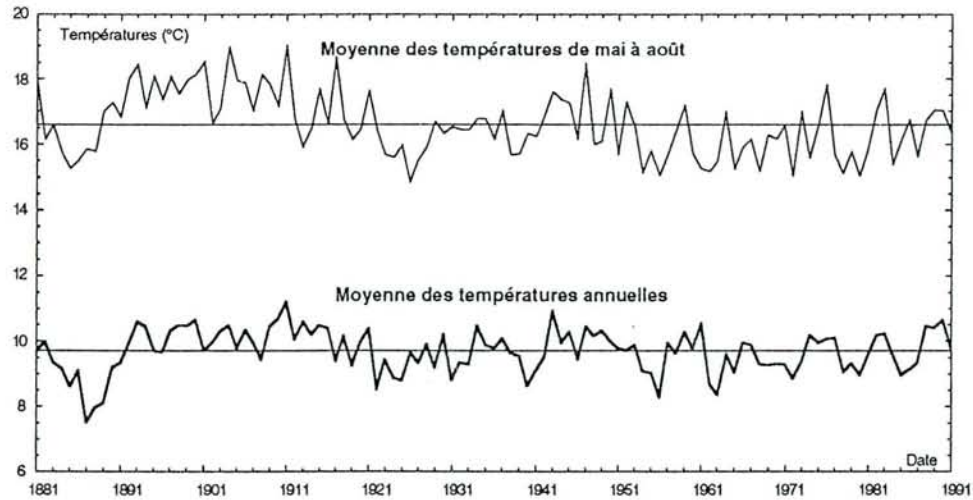



**Figure 124** : Evolution des températures annuelles et de la moyenne des températures des mois de mai, juin, juillet et août entre 1881 et 1991 par rapport à leurs moyennes (respectivement 9,68°C et 16,6°C).

L'année la plus froide a été 1887 avec une température de 7,51°C et l'année la plus chaude a été 1911 avec une température de 11,19°C. Les records de sécheresse et d'humidité ont été enregistrés respectivement en 1949 et 1882 avec des précipitations annuelles de 462 et 1007 mm. Pendant l'année, les températures mensuelles sont relativement basses et les pluies, abondantes, sont bien réparties (Figure 122). Dans le cas du hêtre, la répartition mensuelle des pluies est d'ailleurs beaucoup plus importante que la pluviométrie annuelle totale pour juger de la qualité de l'approvisionnement en eau (Becker, 1981b). De façon générale, l'établissement de diagrammes ombrothermiques montre que pour les localités à hêtre il n'y a pas de période sèche (P(mm) < 2.T(°C)), (Becker, 1981b ; Gutiérrez, 1988).

Entre 1881 et 1991, les moyennes des précipitations et des températures évoluent dans le temps si elles sont calculées sur des périodes de trente ans comme les "normales" de la Météorologie Nationale. Pourtant, si on considère l'évolution des précipitations et des températures à partir de l'ensemble des données disponibles, aucune tendance à long terme dans les variables climatiques ne peut être décelée. Il n'existe pas de relation significative entre la date et les températures ou les précipitations annuelles, ni entre la date et les températures ou les précipitations de la période végétative (Figures 123 et 124).

### 1.2 - Evapotranspiration potentielle et bilan hydrique selon Thornthwaite

L'évapotranspiration représentant la totalité de l'eau évaporée par une surface humide, on peut considérer que si l'eau n'est pas un facteur limitant, l'évaporation est fonction de l'énergie reçue et de l'état de l'atmosphère (humidité, vent, ...), donc des conditions climatiques locales. Thornthwaite a appelé évapotranspiration potentielle (ETP) la quantité maximum d'eau évaporée dans des conditions climatiques données. Un couvert végétal étendu, couvrant bien le sol et abondamment pourvu en eau a une transpiration que l'on peut considérer comme égale à l'évapotranspiration potentielle. La nature du couvert végétal et du sol n'influence pas, en principe, la valeur de l'évapotranspiration potentielle (Chamayou, 1990).

L'ETP est caractéristique d'un climat donné et plus spécialement de l'énergie qui est disponible. Pour calculer cette grandeur, Thornthwaite (1948) propose la formule suivante :

$$ETP_m = 16 \times \left( \frac{10 \cdot \overline{T}_m}{I} \right)^a \times F(dj)$$

avec :

$ETP_m$ = évapotranspiration potentielle du mois m (mm/mois);

$\overline{T}_m$ = température moyenne de l'air du mois m (°C) ;

$I = \sum_{1}^{12} \left( \overline{T}/_{50} \right)^{1,514}$ = indice thermique annuel correspondant à la somme des douze indices thermiques mensuels i calculés sur des valeurs normales (moyennes climatiques) de T ;

$a = 5,75.10^{-7} \cdot I^3 - 7,71.10^{-5} \cdot I^2 + 1,79.10^{-2} \cdot I + 0,492$ ;

$F(dj)$ = terme correctif traduisant approximativement l'influence du rayonnement solaire (soit à peu près le rapport de la durée mensuelle du jour à la durée moyenne annuelle du jour, elle même peu différente de 12h).

Si les valeurs de l'ETP (demande climatique) sont supérieures à la quantité d'eau disponible (précipitations), des périodes de sécheresse apparaissent (Figure 125). Une variable synthétique peut être calculée comme la différence entre les précipitations et les ETP mensuelles, c'est le bilan hydrique potentiel (P - ETP) ou le déficit hydrique potentiel (ETP - P). Cette variable permet de quantifier les crises mensuelles susceptibles de limiter la croissance.

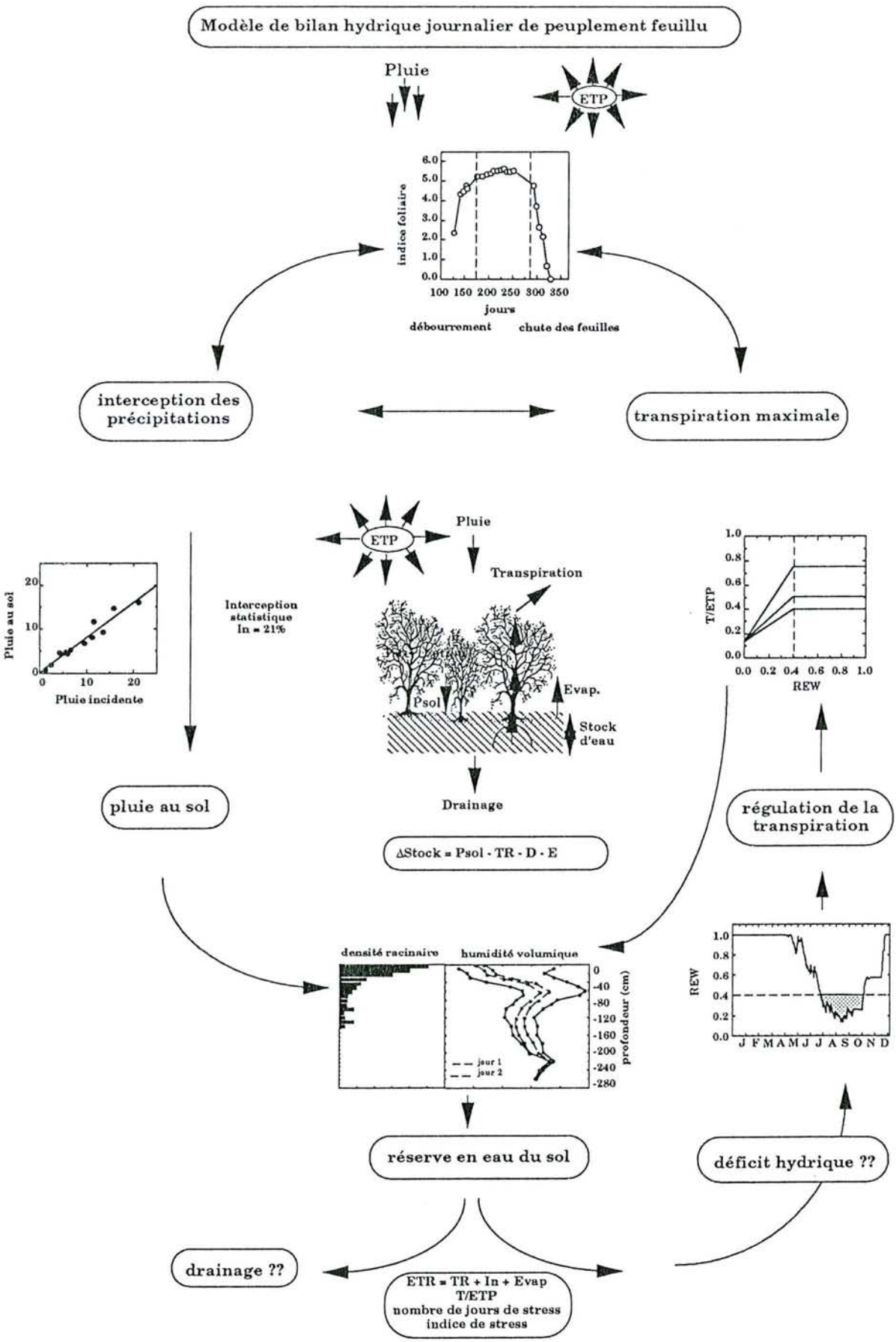



**Figure 126** : Schéma général du modèle de bilan hydrique journalier de peuplement feuillu (d'après Bréda, 1994).

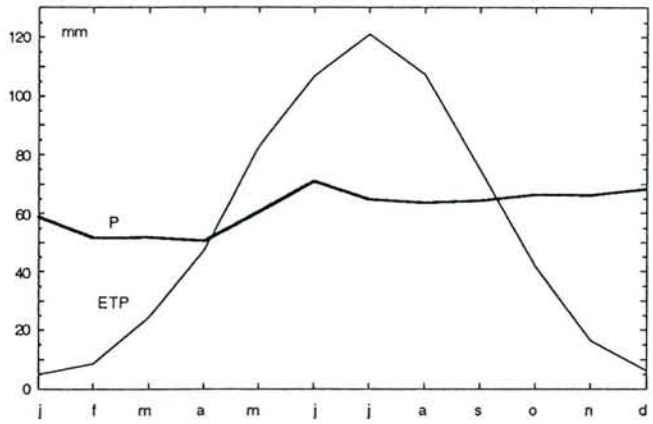



**Figure 125** : Climagramme des bilans hydriques mensuels de Thornthwaite. Le cumul des précipitations et des ETP mensuelles est calculé à partir des données de 1881 à 1991.

La formule utilisée par Thornthwaite fait partie des formules empiriques et essentiellement "thermiques" pour calculer l'ETP. Elle ne correspond qu'à une approximation qui peut être en désaccord avec la réalité en raison, par exemple, de la non prise en compte des effets du vent, du déficit de saturation de l'air et de la liaison assez variable entre température et rayonnement.

De la même façon, le bilan hydrique potentiel peut seulement être considéré comme une approximation à cause d'une part, de la validité relative de l'ETP et d'autre part, en raison de la non prise en compte de la réserve utile des sols.

Pour analyser plus finement les rapports existant entre la croissance radiale et le climat, il est alors préférable de se rapprocher des processus physiologiques. Dans cette optique, les résultats d'un modèle de bilan hydrique ont été utilisés.

### 1.3 - Modèle de bilan hydrique (Bréda, 1994 ; Granier, travaux en cours)

De façon générale, la croissance d'un végétal est souvent limitée par la disponibilité en eau au niveau du sol. Dans le cas du hêtre, l'influence néfaste des sécheresses estivales est connue. Henry (1894, 1895, 1898) observait déjà une importante réduction de la croissance radiale des hêtres lorrains lors des sécheresses de 1892 et 1893. Pour analyser finement l'état hydrique d'un sol, un modèle climatique de bilan hydrique forestier est actuellement développé. Il devrait fournir un outil opérationnel prenant en compte le comportement écophysiologique caractéristique de l'essence forestière choisie et les caractéristiques du sol..

Les variations de la réserve hydrique du sol résultent du bilan des flux d'eau entrants et sortants. Si on désire connaître l'état hydrique d'un sol à un moment donné, ces flux doivent être connus précisément à un pas de temps assez fin pour que des épisodes de déficits hydriques courts, mais suffisants pour affecter le fonctionnement hydrique du peuplement, ne soient pas masqués. Le modèle de bilan hydrique gère donc les flux d'eau de façon journalière en utilisant des paramètres d'une part climatiques et, d'autre part, des caractéristiques du peuplement forestier, de la station et de la phénologie de l'espèce étudiée. Les résultats finaux du modèle peuvent être présentés sous forme de cumuls mensuels, saisonniers ou annuels.

Les données climatiques journalières proviennent de la station météorologique de Nancy - Essey. Ce sont : le rayonnement global, la température moyenne, la vitesse du vent, le déficit de saturation de l'air, les précipitations. Ces données sont disponibles sur la période 1950-1991.

Les données caractéristiques du peuplement et de la station qui interviennent sur le bilan hydrique sont : la phénologie de l'espèce étudiée et l'indice foliaire qui agissent de façon indirecte dans le modèle par leurs conséquences sur l'interception des pluies et la transpiration, la réserve utile du sol, un coefficient d'évaporation du sol (exprimé en pourcentage de l'ETP), une interception moyenne des précipitations et un coefficient de transpiration (T/ETP) en condition d'alimentation hydrique non limitante et à indice foliaire maximal (= transpiration maximale).

L'ETP est calculée d'après la formulation de Penman (Choisnel *et al.*, 1992).

Le fonctionnement du modèle de bilan hydrique est le suivant (Figure 126). A l'occasion d'une pluie, une partie de l'eau est interceptée par la surface du couvert (troncs + branches + feuillage du peuplement s'il est en place). L'interception est fonction de la date de débourrement et de l'indice foliaire. L'eau atteignant le sol (pluie incidente diminuée de l'interception) recharge la réserve hydrique du sol. Si la limite de saturation est atteinte, l'eau excédentaire est "drainée" : elle n'est plus prise en compte par le modèle. Le sol fonctionne comme un réservoir unique comprenant toute la profondeur enracinée. La transpiration journalière est calculée comme une fonction de l'ETP tant que la fraction disponible de la réserve hydrique du sol (REW ou Relative Extractable Water) est supérieure ou égale à 40% de la réserve utile. Quand la REW passe en dessous de ce seuil, c'est-à-dire en période de déficit hydrique (Granier, 1987 ; Bréda *et al.*, 1995), le rapport T/ETP décroît linéairement jusqu'à zéro. Si l'interception n'est pas nulle, c'est-à-dire si le couvert est mouillé, une perte de transpiration par interception est déduite de la transpiration calculée comme décrit précédemment.

Le modèle est itératif : au jour zéro, la réserve est maximale. La réserve hydrique du sol au jour j est calculée à partir de la réserve du jour précédent à laquelle sont ajoutées les précipitations au sol. L'évaporation du sol et la transpiration sont ensuite soustraites. L'ETR est calculée comme étant la somme de la transpiration, de l'interception et de l'évaporation du sol. Différents indices de stress sont alors calculés :

- le rapport T/ETP ;
- le nombre de jours de stress, c'est-à-dire le nombre de jours pendant lesquels la réserve hydrique du sol a été inférieure à 40% de la réserve utile et donc pendant lesquels la transpiration est affectée ;
- le déficit de réserve cumulé, c'est-à-dire la somme des écarts journaliers entre REW et le seuil de 40% REW, variable synthétique sans unité.

Pour notre étude, les indices de stress, et notamment le déficit de réserve, sont calculés à partir de dix hypothèses initiales de réserve utile (de 20 en 20 mm jusqu'à 200).

## 2 - Données dendrochronologiques

### 2.1 - Standardisation

Comme nous l'avons dit dans le chapitre III, une séquence de cernes contient différentes informations interprétables à des pas de temps variables. Contrairement à l'étude des tendances à long terme de la croissance radiale, seuls les signaux à haute fréquence nous intéressent ici. Pour tenter de modéliser les variations de croissance à court et moyen terme, le signal à basse fréquence doit être éliminé.

Afin d'obtenir une chronologie maîtresse où le rapport signal à étudier/bruit de fond indésirable soit le plus grand possible, de nouvelles séries d'indices de croissance sont calculées. La standardisation des séries chronologiques est cette fois réalisée arbre par arbre (suppression des tendances de croissance à long terme liées à l'âge et à la date). Comme nous disposons de 1025 chronologies, il n'est raisonnablement pas possible de modéliser individuellement chacun des dendrochronogrammes. Une routine d'ajustements automatiques a donc été appliquée à partir de la procédure "REG" du logiciel d'analyses statistiques S.A.S (SAS, 1988). L'âge des arbres étant variable, la forme de l'équation retenue ne peut être classique. Les fonctions de

croissance (Gutiérrez, 1988, 1991 ; Biondi, 1993), ou l'utilisation de moyennes mobiles (Biondi, 1993) ne sont souvent pas adaptées. Plusieurs fonctions polynomiales ont alors été testées pour ajuster l'évolution des surfaces terrières annuelles en fonction du temps, depuis la simple régression linéaire jusqu'au polynôme de sixième ordre.

Les ajustements linéaires ou les polynômes de second ordre ne sont pas suffisants pour réduire la variance d'origine non climatique dans toutes les chronologies. A l'opposé, l'utilisation de polynômes d'ordre élevé ne semble pas améliorer les modélisations de façon sensible. L'emploi de ces polynômes n'est d'ailleurs pas recommandé (Grissino-Mayer *et al.*, 1989 ; Cook *et al.*, 1990). Nous n'avons donc conservé que les indices calculés à partir d'ajustements polynomiaux d'ordre 3.

Pour les deux séries d'ajustement, concernant les arbres de futaie et de taillis-sous-futaie, la modélisation de la surface des jeunes cernes n'est quelquefois pas satisfaisante, surtout dans le cas des arbres de taillis-sous-futaie (cernes trop fins, saut de croissance après une éclaircie dans le jeune âge, valeurs négatives prédites par le modèle, ...). Nous avons donc choisi d'éliminer les cernes de moins de 30 ans, tant en futaie qu'en taillis-sous-futaie.

A partir des séries d'indices, il est alors possible de construire une chronologie maîtresse où sont privilégiées les fluctuations aléatoires de haute fréquence (Fritts, 1976).

En supplément des chronologies prenant en compte le cerne complet, d'autres sont constituées à partir des surfaces de bois initial et de bois final selon le même principe.

### 2.2 - Prise en compte des arrière-effets

Selon certains auteurs, le niveau de croissance radiale de l'année n dépend fortement du niveau de croissance de l'année n-1, voire n-2 ou n-3 (Fritts, 1976 ; Tessier, 1986, 1989 ; Biondi, 1993). Dans notre cas, l'autocorrélation entre les cernes successifs apparaît, soit avec les surfaces de cernes brutes, soit avec les données standardisées. D'autres auteurs comme Becker (1989b) ont également montré que le niveau de croissance de l'année n peut dépendre d'arrière-effets climatiques, remontant, selon l'espèce, jusqu'à six années en arrière. Ces deux types d'effets, agissant sur les accroissements radiaux, peuvent être présentés ainsi (Figure 127) :

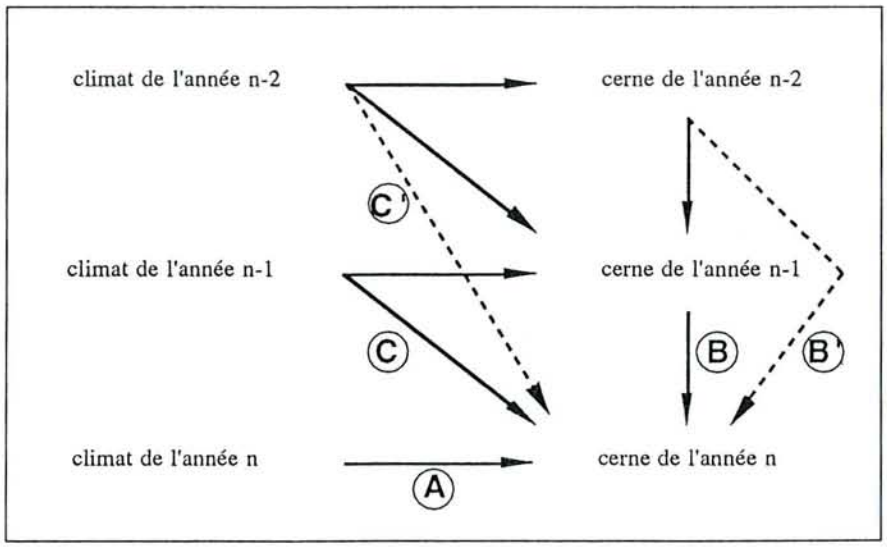



**Figure 127** : Autocorrélation de l'épaisseur des cernes et arrière-effets climatiques sur l'accroissement radial.

- le cerne de l'année n est soumis à l'action directe du climat lors de sa formation (relation A) ;

- l'accroissement de l'année n est également dépendant du volume de bois produit l'année n-1 (relation B). Le cerne de l'année n-1 peut-être interprété en terme de volume de stockage pour des substances de réserve ou en tant que surface conductrice. Les relations entre cernes successifs ne sont pas forcément équivalentes entre les espèces. Dans le cas du hêtre, espèce sans aubier distinct, le volume de stockage dans le tronc doit dépendre assez peu du volume du dernier cerne produit. Dans le cas des chênes au contraire, où l'aubier est nettement limité à quelques uns des cernes les plus extérieurs, le volume de stockage représenté par le dernier cerne doit avoir plus d'importance. En ce qui concerne la conductivité hydraulique, on sait que les vaisseaux du hêtre formés l'année n-1 sont fonctionnels dès le printemps alors que le chêne doit tout d'abord reconstituer son système conducteur avant de débourrer car ses gros vaisseaux ont été embolisés pendant l'hiver (Cochard, *non publié*; Muller, 1993). Chez le chêne, le cerne de l'année n doit donc dépendre plus fortement du cerne de l'année n-1 que chez le hêtre ;

- l'accroissement de l'année n dépend également du climat de l'année n-1 (relation C). Cette action différée du climat se traduit par la possibilité que l'arbre a eu de se constituer un plus ou moins gros stock de réserves, d'avoir eu une bonne croissance racinaire ou un bon développement des rameaux ... ;

- l'action différée du climat peut également se faire sentir sur plusieurs années en arrière (relation C') comme dans le cas de sécheresses particulièrement sévères. L'autocorrélation de l'épaisseur des cernes peut également être significative sur plusieurs années (relation B').

Les relations complexes existant entre le cerne et les évènements antécédents rendent difficile l'analyse de la seule action du climat sur la croissance radiale. On pourrait chercher à expliquer la croissance radiale en conservant à la fois les variables climatiques et dendrométriques de plusieurs années successives. Ce faisant, on aboutirait rapidement à la construction de modèles complexes et instables. Pour expliquer le niveau de croissance de l'année n, on superpose les variables climatiques et l'accroissement des années n-1, n-2, etc., mais ces facteurs sont très corrélés entre eux. Pour étudier l'action du climat, nous avons donc décidé de choisir *a priori* un modèle en limitant les facteurs explicatifs.

La première solution est de considérer que l'influence de l'autocorrélation entre les cernes n'est pas primordiale. Les séries d'indices peuvent alors être analysées avec les variables climatiques des années n, n-1, n-2, etc.

On peut considérer par ailleurs que l'autocorrélation entre les cernes peut : 1) estomper les corrélations existant entre les indices de croissance de l'année n et les variables climatiques et, 2) entraîner l'apparition accidentelle dans les modèles de variables climatiques difficilement interprétables d'un point de vue biologique. Puisque le cerne de l'année dépend du ou des cernes précédants, on peut considérer comme prédéterminée une partie de la croissance. L'autocorrélation entre les cernes peut être éliminée par un processus autorégressif (Box & Jenkins, 1970 ; Guiot *et al.*, 1982 ; Guiot, 1984, 1986 ; Tessier, 1986 ; Gandolfo & Tessier, 1994). La partie résiduelle obtenue par soustraction de la partie modélisée à l'indice initial, correspond alors aux variations aléatoires du climat :

$$C_t = aC_{t-1} + bC_{t-2} + ... + zC_{t-n} + R$$

avec :

$C_t$, la surface du cerne au temps t :
$C_{t-1}$ à $C_{t-n}$, les surfaces de cernes des années t-1 à t-n ;
a, b, ..., z, les coefficients d'autocorrélation ;
R, le résidus aléatoire essentiellement d'origine climatique.

A partir des surfaces de cernes standardisées de notre échantillon, les arrière-effets sont pris en compte jusqu'à l'année n-3. Pour les arbres de futaie comme pour les arbres de taillis-sous-futaie, le cerne de l'année n est très fortement corrélé au cerne de l'année n-1. Les corrélations sont significatives au seuil de 5% pour 70% des chronologies de futaies et pour 81% des chronologies de taillis-sous-futaie. Le nombre de chronologies où le cerne de l'année n - 2 participe à la prédétermination du cerne de l'année n est très faible dans les deux types de gestion sylvicole et le nombre de chronologies où intervient le cerne de l'année n-3 est quasiment nul (Tableau 34). Les autocorrélations significatives mises en évidence sont toujours positives avec l'année n-1 et en grande majorité avec l'année n-2. Dans ce dernier cas, il apparaît cependant quelques corrélations négatives.

| | Futaie | | | Taillis-sous-futaie | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | n - 1 | n - 2 | n - 3 | n - 1 | n - 2 | n - 3 |
| S | 443 (70%) | 71 (16%) | 11 (15%) | 315 (81%) | 49 (16%) | 1 (2%) |
| NS | 191 | 372 | 60 | 76 | 266 | 48 |
| T | 634 | 443 | 71 | 391 | 315 | 49 |

**Tableau 34**: Pour les échantillons de futaie et de taillis-sous-futaie, le tableau donne le nombre de chronologies où une autocorrélation significative au seuil de 5% est mise en évidence (ligne **S**), le nombre de chronologies où l'autocorrélation n'est pas significative au seuil de 5% (ligne **NS**) et le nombre total de chronologies testées (ligne **T**). L'autocorrélation concerne le cerne de l'année n avec le cerne de l'année n-1 (colonne **n-1**), le cerne de l'année n avec le cerne de l'année n-1 puis n-2 (colonne **n-2**), le cerne de l'année n avec le cerne de l'année n-1, n-2 puis n-3 (colonne **n-3**). Seules les chronologies où il existe une autocorrélation significative avec l'année n-1 sont testées ici avec l'année n-2, etc.

Parallèlement à ces observations on peut mettre en évidence un "bruit" statistique. En effet, en ce qui concerne les arbres de futaie, sur les 191 chronologies où il n'existe pas de corrélation significative entre les cernes des l'années n et n-1, 12 chronologies présentent une corrélation significative avec le cerne de l'année n-2 (soit 6%). Cette proportion est de 3% en taillis-sous-futaie.

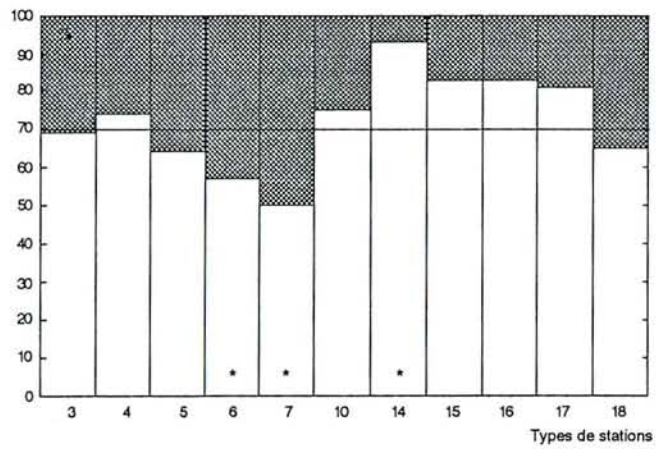



**Figure 128** : Répartition des arbres pour lesquels il existe une autocorrélation significative (en blanc) ou non significative (en gris) entre les cernes de l'année n et ceux de l'années n-1 en fonction du type de station. Chaque fréquence peut être comparée à une répartition théorique de 70/30%. Les stations où les fréquences observées sont significativement différentes de la répartition théorique sont identifiées par une étoile (test de chi2 au seuil de 1%).

Puisque plusieurs types de stations sont représentés en futaie, on peut tester l'influence de ceux-ci sur la présence des arrière-effets. La fréquence des autocorrélations est recalculée pour chaque type de station et comparée à la fréquence moyenne (fréquence théorique) où tous les arbres sont pris en compte, à l'aide d'un test de chi2 (Figure 128). En situation de plateau (station 3 à 7), l'autocorrélation est d'autant plus faible que la disponibilité en eau augmente (*cf.* chap. V et VI). La répartition des arbres pour lesquels il existe ou non une corrélation entre les cernes des années n et n - 1 est significativement différente pour les types de stations 6 et 7. La répartition des arbres pour le type de station 14 est également différente de la répartition théorique : sur les versants exposés au sud le taux d'autocorrélation est supérieur au taux théorique de l'ensemble de notre échantillon. Pour les stations de pente, la fréquence des arbres pour lesquels il existe une autocorrélation est plus forte qu'en situation de plateau mais non significativement différente de la répartition théorique. Cette comparaison n'est pas possible avec les arbres de taillis-sous-futaie car ils ne couvrent pas une variabilité stationnelle importante. Elle n'est pas non plus réalisable avec les corrélations concernant l'année n - 2, car le nombre d'arbres disponible n'est pas suffisant.

Le cerne de l'année n semble donc dépendre très fortement et positivement du cerne de l'année n-1, et ceci de façon d'autant plus forte que la disponibilité en eau est faible. L'influence de l'année n-2 peut être mise en évidence dans certains cas mais l'influence de l'année n-3 ne semble par contre qu'extrêmement faible.

### 2.3 - Sélection des chronologies

La réponse des arbres vis-à-vis des variables climatiques n'est pas indépendante des conditions stationnelles (Fritts, 1976). A l'occasion d'un stress hydrique estival, la croissance d'un arbre situé sur un sol superficiel sera affectée plus rapidement que celle d'un arbre poussant sur un sol profond. Il n'est également pas exclu que, si le stress climatique est assez fort pour dessécher totalement le sol profond, l'arbre correspondant soit plus atteint que l'arbre régulièrement stressé et vraisemblablement mieux adapté aux stress hydriques. Dans le paragraphe précédent, nous avons montré que les autocorrélations entre cernes successifs n'étaient pas non plus indépendantes des conditions stationnelles.

Il serait alors intéressant d'étudier la réponse climatique en fonction des types de stations. Cependant, toutes les stations ne sont pas réprésentées par un nombre suffisant d'arbres et elles ne sont pas réparties de façon homogène entre les futaies et les taillis-sous-futaie. Afin d'homogénéiser les réponses de la croissance vis-à-vis des conditions climatiques et afin de pouvoir comparer la croissance des arbres de futaie et de taillis-sous-futaie, deux sous-échantillons d'arbres sont constitués à partir d'une gamme homogène de paramètres environnementaux. Ces sous-échantillons sont les mêmes que ceux utilisés dans le chapitre VI, page 165, (18 placettes de futaie et 26 de taillis-sous-futaie soit respectivement 181 et 258 chronologies).

## 2 - Analyse des relations cerne - climat

Les chronologies standardisées moyennes, dégagées ou non des autocorrélations, et les variables climatiques sont analysées selon un processus itératif utilisant les procédures de corrélation linéaire et de régression multiple (procédures CORR et REG du logiciel d'analyses statistiques S.A.S (SAS, 1988)).

1° - les corrélations entre les variables climatiques et les indices de croissance sont calculées. Les plus significatives sont conservées et visualisées graphiquement afin de vérifier leur qualité (homoscédaticité, absence de points extrêmes, etc.) ;

2° - la variable retenue est intégrée en tant que variable explicative dans la procédure de régression. Un modèle est calculé et les résidus non expliqués par la première variable sont conservés ;

3° - les corrélations entre les variables climatiques et les premiers résidus des indices de croissance sont calculées. La meilleure variable climatique est choisie comme dans l'étape n°1 ;

4° - une nouvelle régression est calculée et le processus est réitéré jusqu'à ce que les résidus ne puissent plus être expliqués de façon significative (à un seuil de 10%) ou que les variables suivantes ne semblent pas avoir un déterminisme physiologique évident.

Parallèlement à ce processus itératif, plusieurs contraintes sont imposées. Les variables climatiques de base (pluies et températures) sont tout d'abord introduites sous forme mensuelle. Si, pour un mois donné, la pluviométrie et la température mensuelle sont toutes les deux significatives, une variable synthétique est testée (comme le bilan hydrique). Si une variable apparaît significative sur la croissance pendant deux mois consécutifs (ou plus), comme par exemple les bilans hydriques des mois de juin et juillet, une nouvelle variable est créée par addition des deux variables initiales. Les corrélations avec les indices de croissance ou les résidus sont alors testées à nouveau. L'addition de variables consécutives permet essentiellement de limiter le nombre des variables dans les modèles, ce qui les rend plus robustes.

Les différentes variables climatiques dont nous disposons ne couvrent pas la même période de temps. Les pluies, températures, ETP et bilans hydriques de Thornthwaite nous permettent d'analyser les variations de croissance depuis 1881, alors que les données relatives au modèle de bilan hydrique ne sont disponibles qu'à partir de 1950. Depuis 1881, la période est assez longue pour nous permettre de valider l'emploi de certaines variables climatiques dans les modèles en analysant les corrélations sur l'ensemble de la période et sur deux portions indépendantes d'une cinquantaine d'années chacune (1881-1936, 1937-1991). Si une variable climatique est corrélée de façon significative à la croissance sur les deux périodes, elle est conservée dans le modèle final. Si une variable est à la fois significative sur une première période et non significative sur la seconde, elle est éliminée. Ce tri permet de ne conserver que les variables qui influencent de façon constante la croissance radiale, c'est-à-dire les variables déterminantes que nous recherchons. L'étude de la signification variable de certains facteurs climatiques sur différentes périodes de temps serait intéressante pour savoir si la réaction des arbres vis-à-vis de certains paramètres environnementaux a évolué au cours du temps (Makowka *et al.*, 1992) mais les méthodologies appliquées ne sont pas assez pertinentes et nous nous écarterions de l'objectif de ce travail.

Enfin, il est important de préciser que la recherche des variables climatiques les mieux corrélées à la croissance ne se fait pas sans *a priori* . Les régressions ne sont pas choisies statistiquement parmi les meilleures. Les meilleurs modèles, au sens du pourcentage de variance expliquée, sont en général difficile à interpréter biologiquement.

## III - RESULTATS

### 1 - Analyse des relations entre la croissance et le climat depuis 1881

#### 1.1 - Analyse des chronologies non dégagées des arrière-effets : modèles FUT1 et TSF1

Les précipitations des mois de mai, juin et juillet sont positivement et significativement corrélées à la croissance. Les températures de juin et juillet sont corrélées négativement à la croissance, mais les températures de mai semblent avoir une action positive, quoique non significative. Les pluies et les températures étant des variables corrélées, surtout pour les mois de juin et de juillet, les variables synthétiques sont introduites parmi les variables potentiellement explicatives (ETP et bilans hydriques de Thornthwaite). Pour ces deux mois, les bilans hydriques sont corrélés très significativement à la croissance et les nouvelles corrélations sont meilleures que celles obtenues avec les seules pluies ou températures. Les premières variables explicatives retenues sont donc la somme des bilans hydriques des mois de juin et juillet et les précipitations du mois de mai.

L'analyse des premiers résidus fait ensuite ressortir des variables climatiques de l'année précédente. Malgré la bonne signification des pluies et des températures, les bilans hydriques sont meilleurs.

**Tableau 35: Modèle FUT1**

**Etapes de la régression**

| Variables climatiques | Année | $r^2$ partiel | F | prob > F | Coefficient | Coef. corr. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| somme des bilans hydriques de juin et juillet | n | 25,59% | 37,14 | 0,0001 | 16,43E-4 | 0,4954 |
| précipitations de mai | n | 4,92% | 7,57 | 0,0070 | 12,47E-4 | 0,1957 |
| somme des bilans hydriques de juillet à septembre | n-1 | 3,73% | 6,02 | 0,0158 | 5,90E-4 | 0,2110 |
| ETP d'avril | n | 2,65% | 4,40 | 0,0383 | -38,77E-4 | -0,1624 |

**Analyse de variance**

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | prob > F | $r^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Régression | 4 | 0,37706 | 15,34 | 0.0001 | 36,89% |
| Erreur | 105 | 0,02458 | | | |

**Tableau 36 : Modèle TSF1**

**Etapes de la régression**

| Variables climatiques | Année | $r^2$ partiel | F | prob > F | Coefficient | Coef. corr. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| somme des bilans hydriques de juin et juillet | n | 20,86% | 28,46 | 0,0001 | 20,97E-4 | 0,4855 |
| somme des bilans hydriques de juillet et août | n-1 | 15,15% | 25,33 | 0,0001 | 15,83E-4 | 0,3485 |
| précipitations de mai | n | 6,54% | 12,06 | 0,0007 | 20,09E-4 | 0,2421 |
| ETP de mars et d'avril | n | 2,44% | 4,66 | 0,0332 | -34,00E-4 | 0,1564 |

**Analyse de variance**

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | prob > F | $r^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Régression | 4 | 0,78582 | 21,47 | 0.0001 | 44,99% |
| Erreur | 105 | 0,03661 | | | |

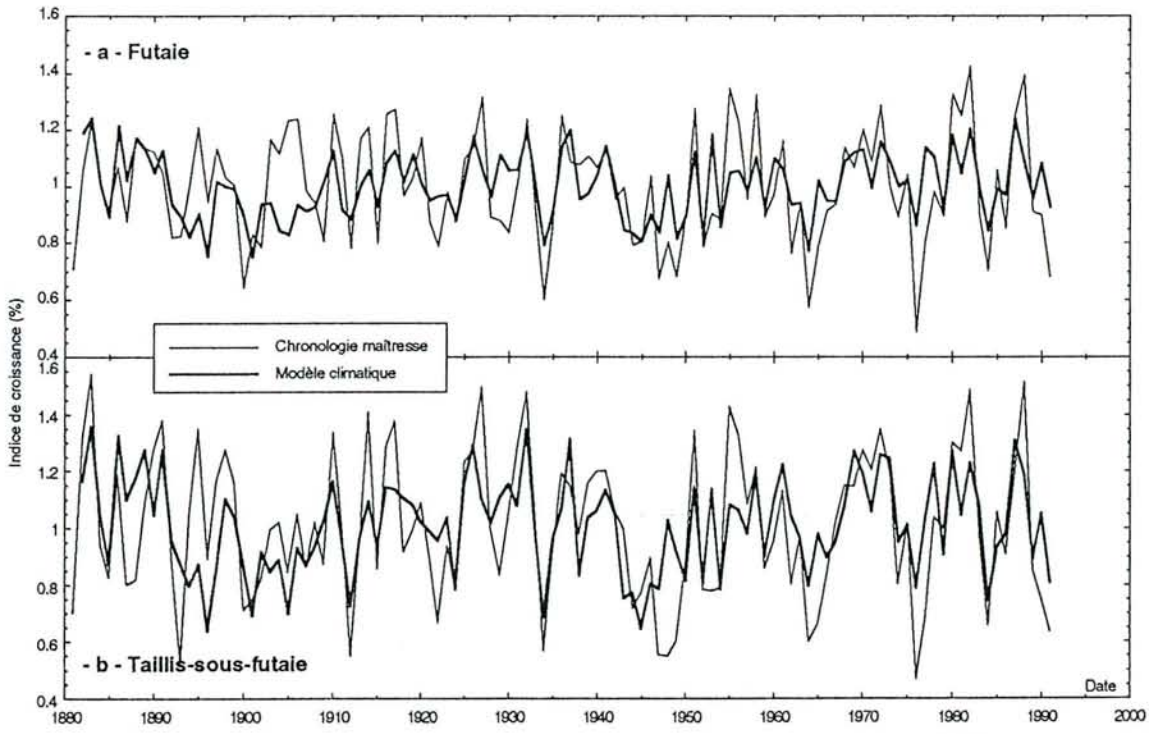



**Figure 129** : Reconstruction climatique des chronologies non dégagées des arrière-effets. Modèle FUT1 (**a**) et TSF1 (*b*).

Dans le cas de la futaie, les mois qui ont une influence sur la croissance sont les mois de juillet, août et septembre de l'année précédente (la variable retenue est la somme de ces trois bilans). Les bilans hydriques, pluies ou températures des mois de mai et juin précédents n'ont pas d'action significative sur la croissance.

Dans le cas du taillis-sous-futaie, les bilans hydriques de juillet et août de l'année précédente sont significativement corrélés à la croissance. Les données climatiques relatives aux mois de mai, juin ou septembre de l'année n-1 ne sont quant à elles pas corrélées à la croissance de façon significative. La troisième variable explicative dans le cas du taillis-sous-futaie est donc la somme des bilans hydriques des mois de juillet et d'août de l'année n-1.

L'analyse des corrélations entre les résidus et les facteurs climatiques fait ensuite ressortir la température et l'ETP d'avril. Les fortes températures au mois d'avril ont une influence significativement négative sur la croissance alors que les fortes températures du mois de mai auraient une action positive quoique non significative. Dans le cas des arbres de futaie, la quatrième variable explicative introduite dans le modèle est donc l'ETP du mois d'avril. Dans le cas du taillis-sous-futaie, après l'introduction de l'ETP du mois d'avril, il existe encore une influence significativement négative de l'ETP du mois de mars. La somme des ETP de ces deux mois est donc utilisée.

Apparaissent enfin des températures automnales de l'année précédente (octobre à novembre) mais de façon non significative au seuil de 10%.

Les tableaux 35 et 36 présentent les résultats des régressions multiples réalisées à partir des variables climatiques retenues. Ces tableaux donnent la liste des variables par ordre d'entrée dans le modèle, le $r^2$ partiel de chacune d'elles, un test F, le coefficient multiplicatif de la variable dans le modèle et le coefficient corrigé (coefficient*écart-type de la variable explicative/écart-type de la variable à expliquer). La figure 129 présente le modèle climatique construit par rapport à la chronologie de référence. Les deux premiers modèles expliquent 37 et 45% de la variance de la croissance radiale en futaie et en taillis-sous-futaie avec quatre variables explicatives. La croissance des hêtres apparaît très corrélée aux conditions d'alimentation hydrique des mois de mai à juillet de l'année de végétation. Plus le déficit hydrique est marqué (forte demande climatique et faibles précipitations) plus la croissance radiale est affectée. Les bilans hydriques de l'année précédente ont également une action significative sur la croissance. Des déficits marqués depuis le milieu jusqu'à la fin de la saison de végétation de l'année précédente sont préjudiciables à la croissance des arbres de futaie. Les conditions météorologiques du mois d'avril, voire du mois de mars, ont également une influence. Si le mois d'avril est relativement chaud, la croissance est affectée. Ce paramètre montre l'influence possible et néfaste des gels tardifs bien connue pour le hêtre en Lorraine: les arbres débourrent très tôt si les conditions climatiques sont favorables puis les jeunes pousses peuvent geler. On peut également penser à un épuisement plus rapide des réserves carbonées à cause d'une respiration plus intense ou a un épuisement plus rapide des réserves en eau à cause d'un débourrement précoce, ou encore à des problèmes relatifs à la levée de dormance du cambium. Enfin, on peut noter qu'aucune variable climatique des années n-2 ou n-3 n'entre de façon significative dans les modèles.

### 1.2 - Analyse des chronologies dégagées des arrière-effets : modèles FUT2 et TSF2

Seuls les résultats concernant les chronologies où l'autocorrélation de premier degré a été supprimée sont présentés ici. Les résultats obtenus à partir des chronologies où sont pris en compte les arrière-effets des années n-2 ou n-3 n'apportent pas de changement.

Comme dans le paragraphe précédent, les premières variables climatiques très corrélées à la croissance sont la somme des bilans hydriques de juin et juillet de l'année de formation du cerne, et les précipitations du mois de mai, tant en futaie qu'en taillis-sous-futaie. Dans le cas particulier du taillis-sous-futaie, les précipitations du mois d'août semblent également avoir une influence sur le niveau de croissance de l'année.

**Tableau 37 : Modèle FUT2**

**Etapes de la régression**

| Variables climatiques | Année | $r^2$ partiel | F | prob > F | Coefficient | Coef. corr. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| somme des bilans hydriques de juin et juillet | n | 31,10% | 48,75 | 0,0001 | 17,26E-4 | 0,5142 |
| somme des ETP d'août et de septembre | n-1 | 7,09% | 12,27 | 0,0007 | -46,86E-4 | 0,2921 |
| précipitations de mai | n | 2,58% | 4,62 | 0,0338 | 9,50E-4 | 0,1472 |
| somme des températures d'octobre à décembre | n-1 | 1,82% | 3,34 | 0,0706 | 8,78E-4 | 0,1380 |

**Analyse de variance**

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | prob > F | $r^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Régression | 4 | 0,44863 | 19,48 | 0.0001 | 42,60% |
| Erreur | 105 | 0,02303 | | | |

**Tableau 38 : Modèle TSF2**

**Etapes de la régression**

| Variables climatiques | Année | $r^2$ partiel | F | prob > F | Coefficient | Coef. corr. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| somme des bilans hydriques de juin et juillet | n | 24,62% | 35,27 | 0,0001 | 19,15E-4 | 0,4569 |
| somme des bilans hydriques de juillet à septembre | n-1 | 12,50% | 21,26 | 0,0001 | -47,86E-4 | 0,3369 |
| précipitations de mai | n | 7,06% | 13,41 | 0,0004 | 16,31E-4 | 0,2397 |
| précipitations d'août | n | 2,19% | 4,29 | 0,0408 | 12,12E-4 | 0,1610 |
| somme des températures de novembre à décembre | n-1 | 1,56% | 3,11 | 0,0805 | 13,01E-4 | 0,1261 |

**Analyse de variance**

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | prob > F | $r^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Régression | 5 | 0,62698 | 19,14 | 0.0001 | 47,93% |
| Erreur | 104 | 0,03275 | | | |

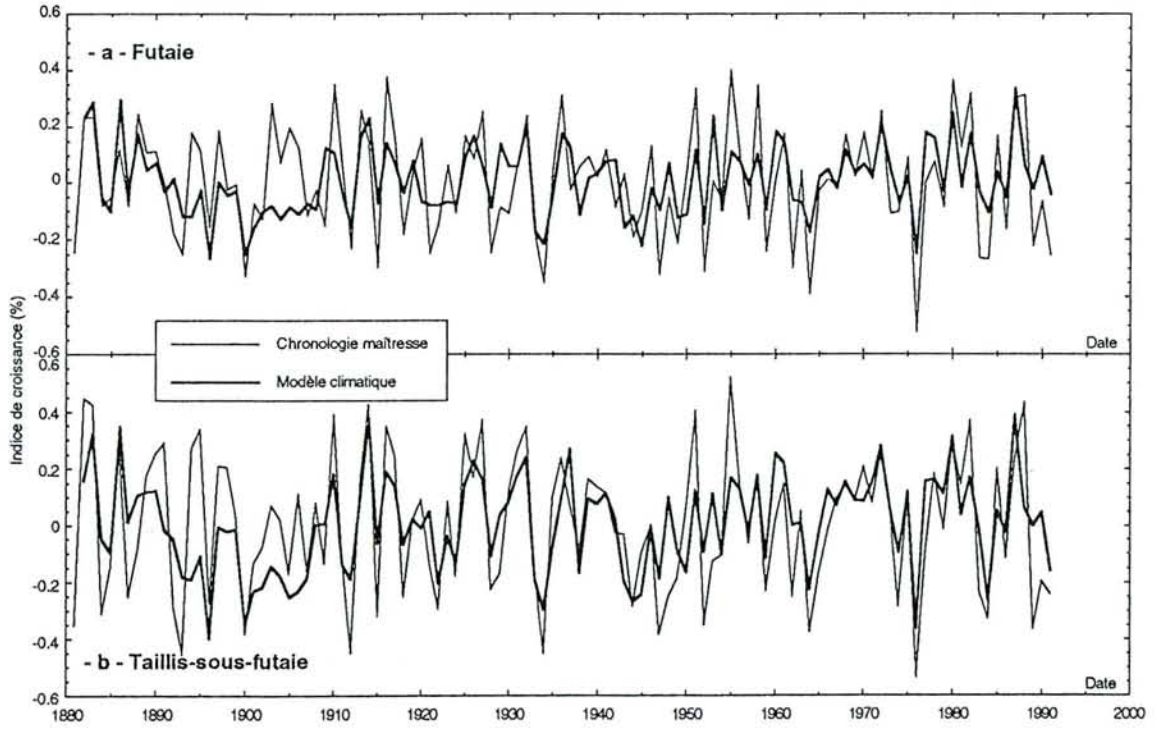



**Figure 130** : Reconstruction climatique des chronologies dégagées des arrière-effets d'un an. Modèle FUT2 (a) et TSF2 (b).

Les paramètres climatiques influençant la croissance sont ensuite différents entre les deux types de gestion sylvicole. Dans le cas du taillis-sous-futaie, les déficits hydriques des mois de juillet, août et septembre de l'année précédente ont encore une forte influence sur la croissance de l'année n. Dans le cas des arbres de futaie, les déficits hydriques de l'année précédente n'apparaissent plus comme des variables déterminantes. Ce sont les variables thermiques qui ressortent et plus précisément l'ETP. Une forte demande climatique pendant les mois d'août et de septembre de l'année précédente a une influence négative sur l'accroissement de l'année en cours.

Les températures automnales de l'année n-1 ont cette fois une action significative sur la croissance. Pour les arbres de futaie, si la somme des températures moyennes des mois d'octobre, de novembre et de décembre n'est pas trop basse, la croissance radiale sera favorisée l'année suivante. En ce qui concerne les arbres de taillis-sous-futaie, les températures d'octobre ne semblent pas avoir un effet significatif.

Enfin, on observe encore que de fortes températures ou qu'une forte ETP au mois d'avril est préjudiciable à la croissance en futaie comme en taillis-sous-futaie. Pourtant, l'ETP n'est cette fois pas corrélée significativement aux résidus des modèles. Cette variable n'est donc pas prise en compte.

Les deux modèles construits expliquent 43 et 48% de la variance de la croissance radiale en futaie et en taillis-sous-futaie avec quatre et cinq variables explicatives (tableaux 37 et 38 ; figure 130). La qualité des modèle est peu améliorée par rapport aux précédents. La réponse au déficit hydrique des mois de juin et juillet de l'année en cours est améliorée et les températures automnales, non significatives précédemment, peuvent entrer dans les modèles.

### 2 - Analyse des relations entre la croissance et le climat depuis 1950

Sur cette période de temps, aux variables utilisées précédemment (pluies, températures moyennes, ETP et bilans hydriques selon Thornthwaite) sont ajoutés d'autres paramètres climatiques mensuels : températures minimales et maximales (calculées pour chaque mois à partir de huit mesures journalières), ETP "Penman", déficit de réserve, nombre de jours de stress hydrique, transpiration. Ces paramètres sont déterminés à partir d'une hypothèse de réserve utile de 140 mm. Ce choix sera justifié dans le paragraphe 2.3 suivant.

#### 2.1 - Analyse des chronologies non dégagées des arrière-effets : modèles FUT3 et TSF3

Les variables utilisées précédemment dans les modèles climatiques restent valides sur la période 1950-1991 ; cependant, les variables issues du modèle de bilan hydrique sont encore meilleures, notamment le déficit de réserve. Ainsi, la meilleure variable climatique corrélée à la croissance est le cumul des déficits de réserve des mois de juin à août (corrélation de -0,76 avec les indices de futaie et de -0,65 avec les indices de taillis-sous-futaie).

Le cumul des déficits de réserve des mêmes mois, mais de l'année précédente, est ensuite très bien corrélé aux résidus obtenus (respectivement -0,55 et -0,62 pour les arbres de futaie et de taillis-sous-futaie).

Comme précédemment, les températures printanières semblent avoir une grosse influence sur la croissance, mais ce ne sont plus les températures moyennes qui ressortent ou les ETP, mais les températures maximales des mois de mars et d'avril. De trop fortes températures en mars et avril sont préjudiciables à la croissance.

Les températures automnales de l'année précédente peuvent ensuite entrer dans les modèles mais les moyennes mensuelles utilisées auparavant sont moins efficaces que les températures minimales. La quatrième variable entrant dans les modèles est donc la somme des températures minimales des mois de septembre à décembre de l'année précédente.

**Etapes de la régression**

| Variables climatiques | Année | $r^2$ partiel | F | prob > F | Coefficient | Coef. corr. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| - a - cumul des déficits de réserve de juin à août | n | 58,11% | 54,09 | 0,0001 | -32,977E-3 | -0,9243 |
| - b - cumul des déficits de réserve de juin à août | n-1 | 12,67% | 16,48 | 0,0002 | -14,635E-3 | -0,4024 |
| - c - somme des températures maximales de mars et avril | n | 6,99% | 11,64 | 0,0016 | -2,069E-3 | -0,2722 |
| - d - somme des temp. minima. de septembre à décembre | n-1 | 6,63% | 15,30 | 0,0004 | 1,503E-3 | 0,2438 |
| - e - températures minimales de septembre | n | 1,81% | 4,60 | 0,0390 | 2,157E-3 | 0,1381 |

**Analyse de variance**

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | prob > F | $r^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Régression | 5 | 0,35226 | 43,76 | 0.0001 | 86,21% |
| Erreur | 35 | 0,00805 | | | |

**Corrélations**

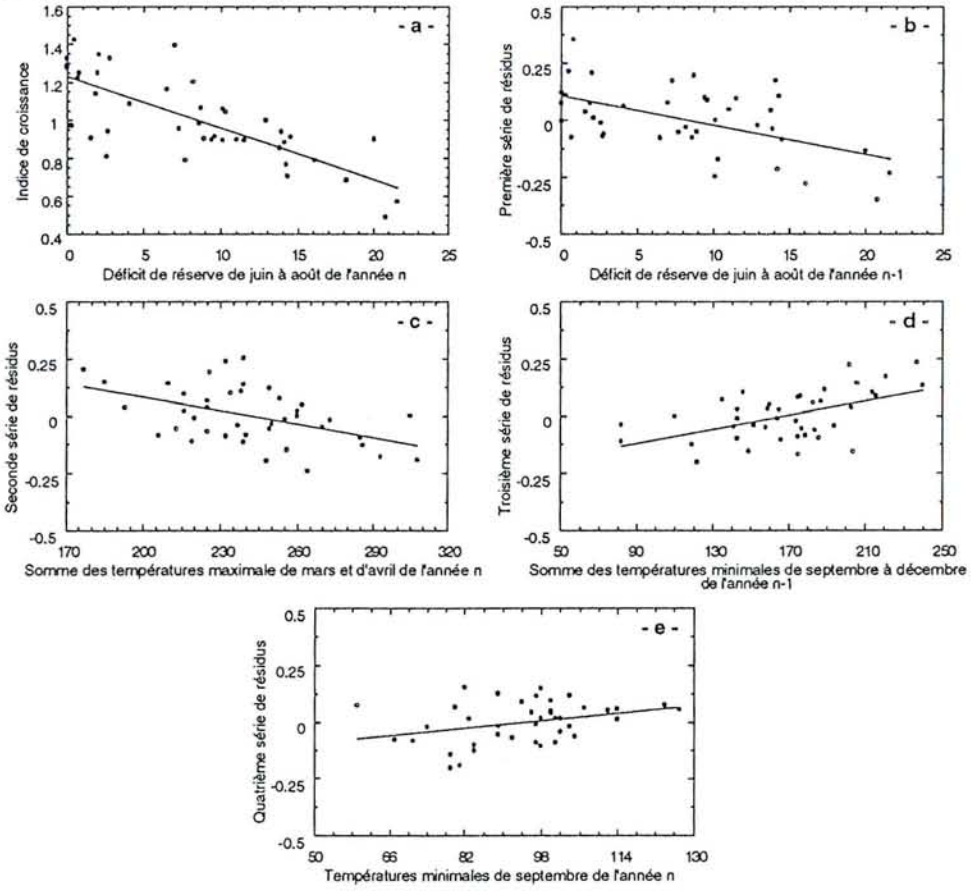



**Tableau 39 : Modèle FUT3.** Résumé des étapes de la régression multiple ; analyse de variance ; graphiques des corrélations successives entre les variables climatiques et les indices de croissance ou les résidus.

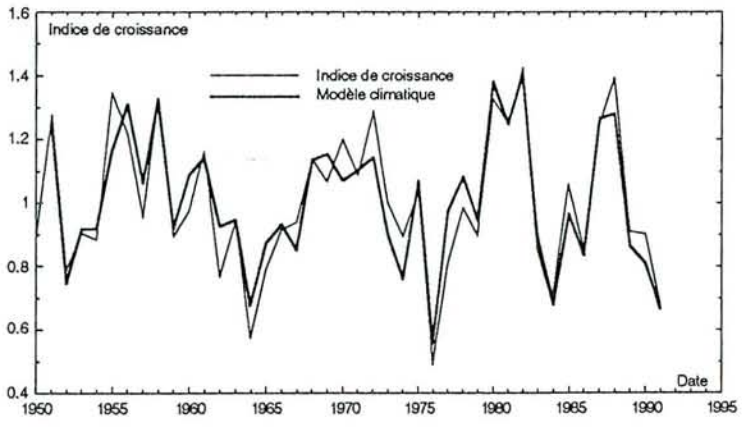



**Figure 131 : Modèle FUT3.** Reconstruction climatique de la chronologie de futaie sans prise en compte de l'autocorrélation entre cernes successifs.

**Etapes de la régression**

| Variables climatiques | Année | $r^2$ partiel | F | prob > F | Coefficient | Coef. corr. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| - a - cumul des déficits de réserve de juin à août | n | 43,26% | 29,74 | 0,0001 | -34,698E-3 | -0,9082 |
| - b - cumul des déficits de réserve de juin à août | n-1 | 22,49% | 24,95 | 0,0001 | -23,244E-3 | -0,5492 |
| - c - somme des températures maximales de mars et avril | n | 10,77% | 16,97 | 0,0002 | -2,96E-3 | -0,3346 |
| - d - somme des températures minimales de septembre à décembre | n-1 | 3,73% | 6,80 | 0,0132 | 1,448E-3 | 0,2019 |

**Analyse de variance**

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | prob > F | $r^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Régression | 4 | 0,55508 | 36,567 | 0.0001 | 80,25% |
| Erreur | 36 | 0,01518 | | | |

**Corrélations**

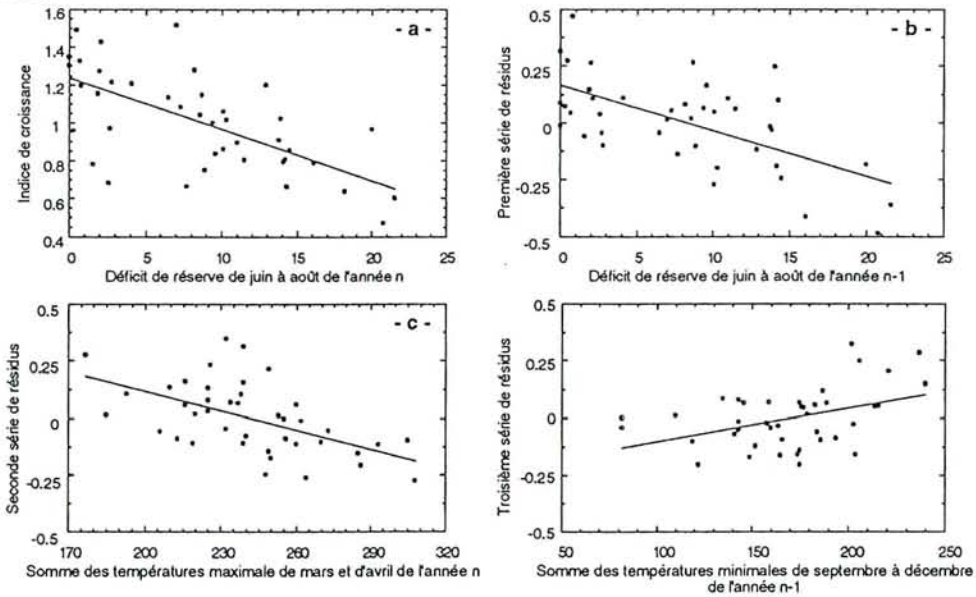



**Tableau 40 : Modèle TSF3.** Résumé des étapes de la régression multiple ; analyse de variance ; graphiques des corrélations successives entre les variables climatiques et les indices de croissance ou les résidus.

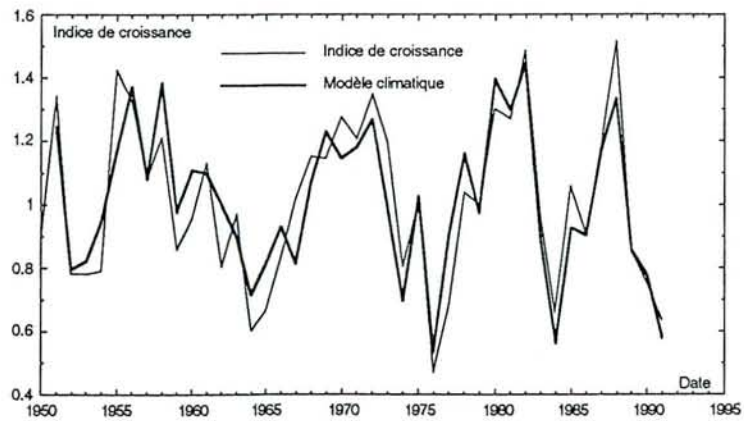



**Figure 132 : Modèle TSF3.** Reconstruction climatique de la chronologie de taillis-sous-futaie sans prise en compte de l'autocorrélation entre cernes successifs.

**Etapes de la régression**

| Variables climatiques | Année | $r^2$ partiel | F | prob > F | Coefficient | Coef. corr. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| - a - cumul des déficits de réserve de juin à août | n | 68,48% | 84,74 | 0,0001 | -32,046E-3 | -0,8966 |
| - b - somme des températures minimales d'octobre à décembre | n-1 | 6,33% | 9,54 | 0,0037 | 1,829E-3 | 0,2386 |
| - c - somme des températures maximales de mars et avril | n | 6,36% | 12,50 | 0,0011 | -1,953E-3 | -0,2564 |
| - d - température minimale de septembre | n | 3,07% | 7,00 | 0,0120 | 2,827E-3 | 0,1807 |

**Analyse de variance**

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | prob > F | $r^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Régression | 4 | 0,43345 | 48,091 | 0.0001 | 84,24% |
| Erreur | 36 | 0,00901 | | | |

**Corrélations**

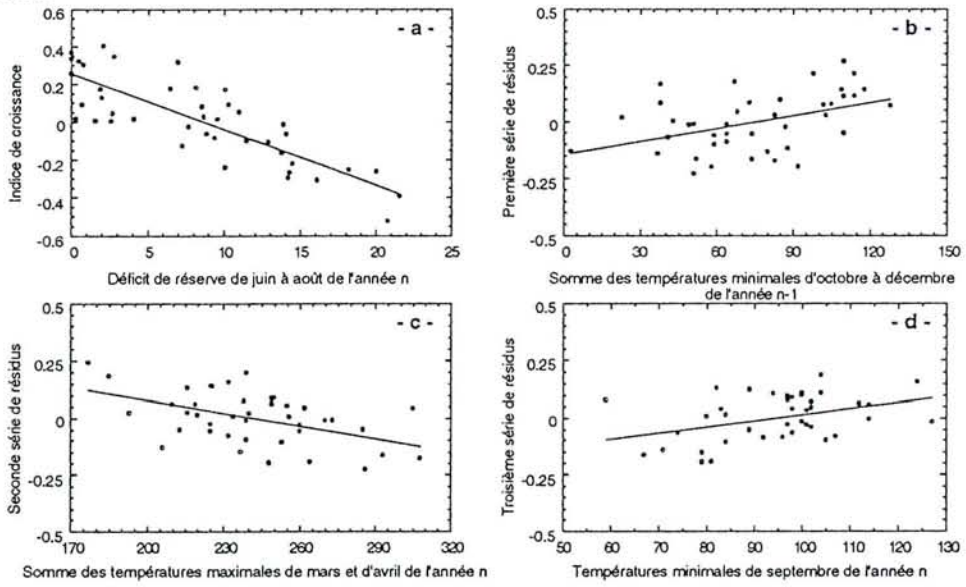



**Tableau 41 : Modèle FUT4.** Résumé des étapes de la régression multiple ; analyse de variance ; graphiques des corrélations successives entre les variables climatiques et les indices de croissance ou les résidus.

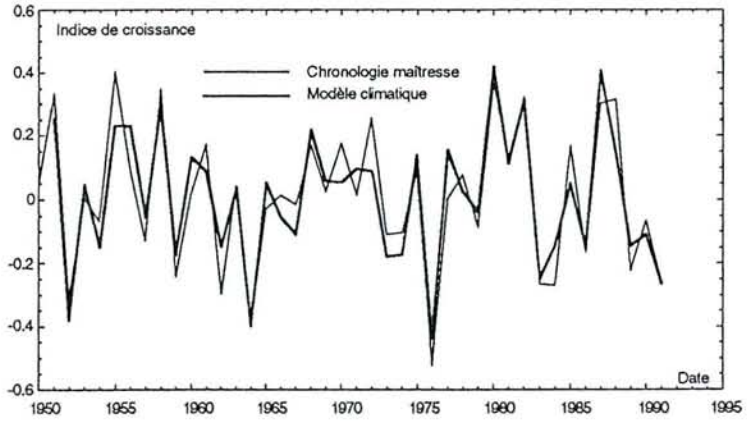



**Figure 133 : Modèle FUT4.** Reconstruction climatique de la chronologie de futaie avec prise en compte de l'autocorrélation sur un an.

**Etapes de la régression**

| Variables climatiques | Année | $r^2$ partiel | F | prob > F | Coefficient | Coef. corr. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| - a - cumul des déficits de réserve de juin à août | n | 54,42% | 46,56 | 0,0001 | -33,764E-3 | -0,8638 |
| - b - somme des températures maximales de mars et avril | n | 6,98% | 6,87 | 0,0125 | 11,687E-3 | -0,3346 |
| - c - cumul des déficits de réserve de juin à août | n-1 | 7,82% | 9,40 | 0,0040 | -2,787E-3 | -0,2933 |
| - d - somme des températures minimales d'octobre à décembre | n-1 | 6,54% | 9,70 | 0,0036 | 2,208E-3 | 0,2634 |

**Analyse de variance**

| Source de variation | Degrés de liberté | Carrés moyens | F | prob > F | $r^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Régression | 4 | 0,46608 | 28,121 | 0.0001 | 75,75% |
| Erreur | 36 | 0,01657 | | | |

**Corrélations**

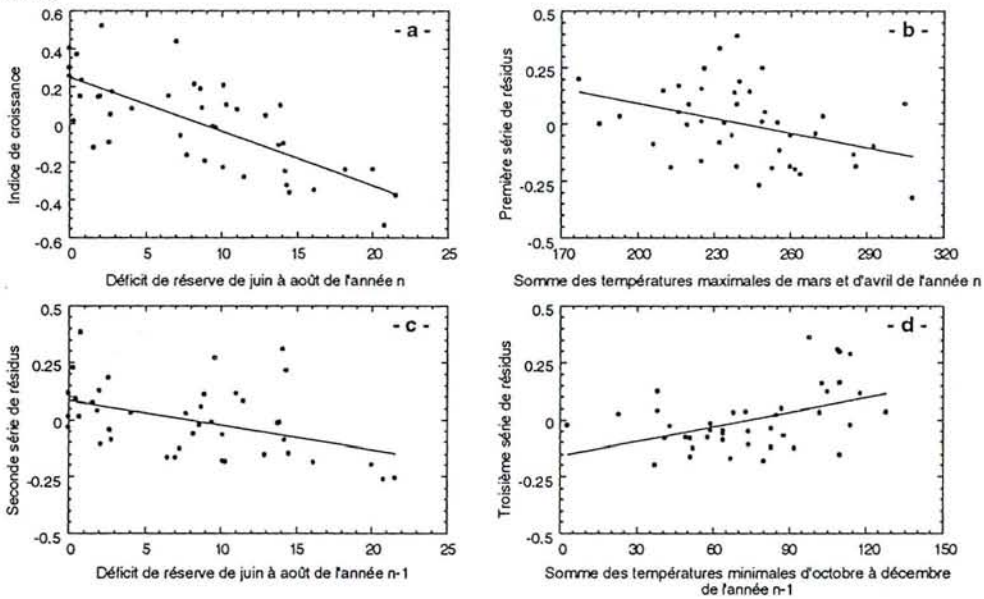



**Tableau 42 : Modèle TSF4.** Résumé des étapes de la régression multiple ; analyse de variance ; graphiques des corrélations successives entre les variables climatiques et les indices de croissance ou les résidus.

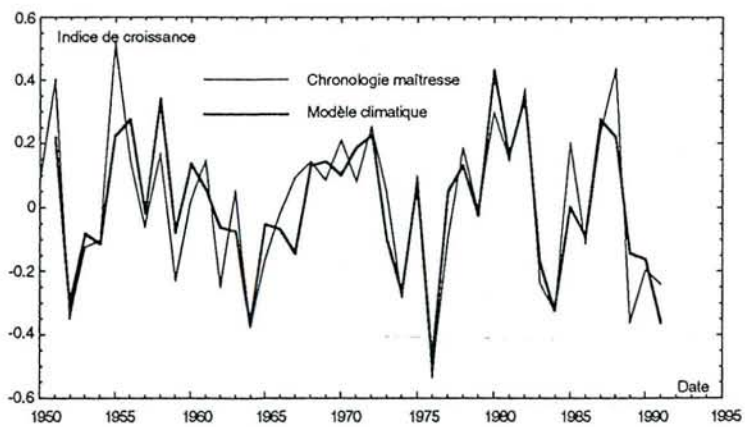



**Figure 134 : Modèle TSF4.** Reconstruction climatique de la chronologie de taillis-sous-futaie avec prise en compte de l'autocorrélation sur un an.

Dans le cas de la futaie, les températures minimales du mois de septembre de l'année n semblent avoir également une action positive sur la croissance.

Pour les arbres de futaie ou de taillis-sous-futaie, on peut constater que les mêmes variables explicatives entrent dans les modèles. Ceci montre bien qu'il existe des contraintes de croissance au niveau de l'espèce et que la sylviculture n'agit pas de façon déterminante sur la réponse des arbres vis-à-vis du climat. Comme dans le cas des reconstructions climatiques sur la période 1881-1991, aucune variable climatique des années n-2 ou moins n'est corrélée de façon significative à la croissance de l'année n.

Les tableaux 39 et 40 présentent les résultats des régressions multiples comme précédemment, mais ils sont cette fois complétés par des graphiques représentant les corrélations entre les variables climatiques et les indices de croissance ou les résidus. Les deux modèles construits à partir des déficits de réserve expliquent respectivement 86 et 80% de la variance des indices de croissance des arbres de futaie et de taillis-sous-futaie sur la période 1950 - 1991. Les figures 131 et 132 présentent les reconstructions climatiques réalisées pour les arbres de futaie et de taillis-sous-futaie.

### 2.2 - Analyse des chronologies dégagées des arrière-effets : modèles FUT4 et TSF4

La prise en compte des arrière-effets améliore nettement les corrélations entre les indices de croissance et les déficits de réserve. Le déficit de réserve cumulé sur les mois de juin, juillet et août explique à lui seul 68% de la variance des accroissements en futaie et 54% en taillis-sous-futaie.

Pour les arbres de futaie, les déficits hydriques de l'année précédente ne sont plus significatifs. On retrouve l'effet négatif des fortes températures de mars et d'avril de l'année en cours et l'effet positif des températures minimales élevées aux mois d'octobre, novembre et décembre de l'année précédente. L'influence positive des températures du mois de septembre de l'année n-1 disparaît, mais cette influence est toujours significative pour l'année n.

Pour les arbres de taillis-sous-futaie, les déficits de réserve des mois de juin, juillet et août de l'année précédente sont encore significativement corrélés à la croissance malgré la prise en compte des arrière-effets. Les arbres de taillis-sous-futaie semblent donc plus sensibles aux arrière-effets des sécheresses que les arbres de futaie. Comme en futaie, les températures maximales de mars et avril et les minimales de l'automne précédent sont bien corrélées à la croissance.

Les modèles construits à partir des chronologies dégagées des arrière-effets de l'année n-1 permettent d'expliquer 84 et 75% de la variance des accroissements des arbres de futaie et de taillis-sous-futaie. La prise en compte de l'autocorrélation ne permet pas ici d'améliorer globalement les reconstructions. Pour la futaie ou le taillis-sous-futaie, la réponse aux déficits de réserve de l'année est améliorée par rapport aux deux modèles précédents. Dans le cas du taillis-sous-futaie, le pourcentage de variance expliqué par les déficits des réserves de l'année précédente est beaucoup plus faible que dans le modèle TSF3, mais toujours significatif. Les arrière-effets climatiques ne s'expriment donc pas uniquement par l'autocorrélation existant entre deux cernes successifs. Lorsque l'autocorrélation est prise en compte, l'action bénéfique des températures douces du mois de septembre de l'année précédente disparaît, mais pas celle des autres températures automnales. On peut alors penser que l'action de ces températures n'intéresse pas les mêmes compartiments de l'arbre. Des températures clémentes en septembre favoriseraient la prolongation de la croissance radiale alors que les températures d'octobre à décembre pourraient plutôt permettre une bonne croissance racinaire.

### 2.3 - Les différentes hypothèses de réserve utile

Nous avons dit dans le paragraphe de méthodologie de ce chapitre que le modèle de bilan hydrique nous a fourni différents indices de stress en fonction de dix hypothèses initiales de réserve utile. Les modèles présentés ci-dessus peuvent donc être testés pour chacune de ces hypothèses.

Le premier résultat de ce test concerne les variables entrant dans les modèles. Pour chaque traitement sylvicole, la liste des variables les plus explicatives reste la même. Cependant, la part de variance expliquée par le déficit de réserve varie d'un modèle à l'autre. On montre que pour la futaie ou le taillis-sous-futaie, la meilleure corrélation entre les indices de croissance et le déficit cumulé des mois de juin à août est obtenue avec une hypothèse initiale de réserve utile de 140 mm. Si la réserve est supposée plus forte ou plus faible, les coefficients de corrélation sont moins bons. On peut alors se demander si cet optimum à 140 mm correspond à une réalité biologique ou s'il est dû à un artefact inhérent au modèle de bilan hydrique.

A partir des arbres de futaie situés sur les meilleurs types de stations (sols les plus profonds, stations 5, 6, 7 et 18), un nouveau sous-échantillon est constitué, une chronologie de référence est calculée et analysée comme précédemment (22 placettes, soit 221 séries, sont prises en compte). Les variables entrant dans le modèle climatique restent identiques, mais cette fois il n'existe pas d'optimum entre la croissance et le déficit de réserve pour une hypothèse particulière de réserve utile.

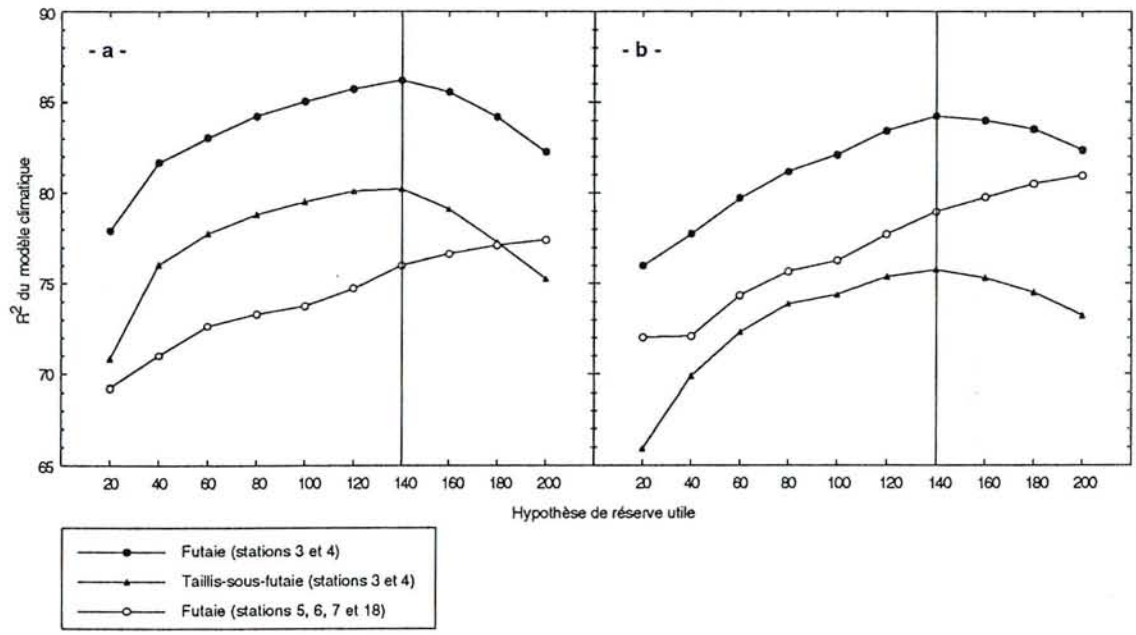



**Figure 135** : Evolution du pourcentage de variance de la croissance radiale expliquée en fonction de dix hypothèses initiales de réserve utile. Les modèles climatiques utilisés sont FUT3 pour les arbres de futaie et TSF3 pour les arbres de taillis-sous-futaie (a) ainsi que FUT4 et TSF4 (b), soit sans ou avec prise en compte de l'autocorrélation entre cernes successifs.

Si on trace l'évolution du pourcentage de variance expliquée par chaque modèle en fonction des différentes hypothèses de réserve utile, deux constatations peuvent être faites (Figure 135).

Pour le sous-échantillon de hêtres choisi, en futaie et en taillis-sous-futaie, en fonction de caractéristiques stationnelles semblables (et relativement médiocres), la part de variance expliquée par les modèles climatiques croit régulièrement en fonction de l'hypothèse initiale de réserve utile. La valeur du $r^2$ atteint un maximum pour l'hypothèse 140 mm puis elle diminue.

Pour le sous-échantillon de hêtres choisi parmi les meilleures stations de futaie, aucun optimum d'explication ne semble atteint.

Si on estime la réserve utile moyenne de chaque sous-échantillon en fonction de la profondeur de décarbonatation (Becker *et al.*, 1980), on arrive au résultat de 103 mm pour les stations les plus sèches de futaie et de taillis-sous-futaie et à la valeur de 214 mm pour les stations les plus humides de futaie. Ces valeurs ne sont que des approximations, mais elles permettent de montrer qu'il semble exister un lien entre la

qualité des ajustements climatiques et la réserve utile réelle. Pour expliquer la croissance des arbres des stations les plus sèches, il existe un "optimum de stress". Si l'hypothèse de réserve utile est trop basse, les crises sont trop nombreuses et surestimées. A l'inverse, si l'hypothèse de réserve utile est trop forte, les crises ne sont ni assez nombreuses, ni assez intenses pour expliquer les crises de croissance réellement observées. De façon complémentaire, les hypothèses de réserve utile dont nous disposons semblent trop faibles pour étudier la croissance des meilleures futaies : les crises climatiques sont toujours trop nombreuses et trop intenses.

Malheureusement, nous ne disposons pas d'arbres poussant dans des conditions d'alimentation en eau très limitantes. Il n'est donc pas possible de vérifier si de tels arbres présenteraient une réponse maximale pour des hypothèses de réserve utile très basses. A l'opposé, nous ne disposons pas des résultats des calculs du bilan hydrique pour des hypothèses de réserves supérieures à 200 mm. Il n'est pas possible de vérifier s'il existe un optimum sur les bonnes stations.

## IV - DISCUSSION ET CONCLUSION

Nos résultats montrent que la croissance du hêtre est très conditionnée par les réserves en eau disponibles pendant la saison de végétation. Pour le modèle FUT4, les déficits de réserve des mois de juin, juillet et août expliquent jusqu'à 68% les fluctuations interannuelles de la croissance radiale. Le bilan hydrique selon Thornthwaite ou le déficit de réserve rendent mieux compte des fluctuations de la croissance que les seules pluies incidentes. Les mois pris en compte ne sont cependant pas les mêmes avec les différentes variables. Les bilans hydriques des mois de juin et juillet et les précipitations de mai apparaissent déterminants alors que les déficits de réserve des mois de juin à août ressortent préférentiellement. Cette différence peut s'expliquer simplement. Le bilan hydrique de Thornthwaite ne prend en compte que les conditions climatiques mensuelles. A partir du mois de mai, l'ETP est toujours assez forte pour dépasser la quantité des pluies incidentes : il y a toujours des déficits hydriques en mai, juin, juillet et août. Cependant, ce calcul n'est qu'une approximation. L'eau disponible dans le sol ne correspond pas uniquement à la quantité incidente du mois considéré : elle est constituée en plus par les excédents des mois précédents. Dans le cas du hêtre, des notations de débourrement effectuées aux printemps 1993 et 1994 ont montré que les bourgeons commencent à gonfler entre la fin mars et la mi avril et que les feuilles sont tout à fait étalées (ou presque) au début du mois de mai. Pendant le mois de mai, les peuplements peuvent donc transpirer mais l'eau du sol n'est jamais épuisée en un seul mois. Les déficits de réserves ou le nombre de jours de stress des mois de mai sont toujours égaux à zéro sur la période 1950-1991 ; cette variable n'entre donc pas dans les modèles. Par contre, plus le mois de mai aura été sec (peu de pluies et forte ETP), plus les déficits hydriques seront précoces dans les mois suivants. La quantité des pluies incidentes du mois de mai est donc importante. Depuis 1950, les années où on enregistre un fort déficit de réserve dès le mois de juin sont caractérisées par une croissance radiale très faible (1991, 1989, 1983, 1976, 1973, 1964, 1962, 1952). Pendant l'été, il n'y a pas d'amélioration de l'état hydrique des sols. Les pluies ne sont jamais suffisantes pour compenser l'évaporation et la transpiration.

De façon générale, l'utilisation des déficits de réserve est donc préférable, car plus proche de la réalité. Dans le cas du hêtre, ils nous permettent d'affirmer que les mois les plus critiques pour la croissance sont les mois de juin, de juillet et d'août et que la croissance radiale est d'autant plus faible que le déficit de réserve est précoce, donc intense, sur toute la période végétative.

Le niveau de croissance radiale atteint une année donnée est également très dépendant des conditions climatiques précédant le début de la saison végétative. De fortes températures (ou une forte ETP) aux mois de mars et avril sont préjudiciables à la croissance.

De bonnes conditions météorologiques en avril semblent favoriser l'activité des hêtres qui sont en cours de débourrement. Par contre, ces arbres s'exposent à des revers climatiques (comme les gelées tardives ou simplement des nuits plus froides) et subissent des dégâts. S'il est bien résistant aux froids rigoureux de l'hiver, le hêtre est particulièrement sensible aux gelées de printemps (Becker, 1981b).

Bien qu'aucune activité végétative ne soit engagée, le hêtre semble également très sensible aux températures du mois de mars. Si les maxima sont trop forts, l'accroissement radial de l'année est affecté. Hubert (1984) a pu montrer que la croissance radiale de jeunes hêtres élevés hors gel était significativement inférieure à celle de plants de même âge conservé à l'extérieur en pépinière. En établissant des fonctions de réponses sur des hêtres de Basse Saxe, Makowka *et al.* (1992) montrent que les températures hivernales sont négativement corrélées à la croissance. Il semblerait donc que les bourgeons et le cambium du hêtre aient besoin d'être vernalisés. Si la quantité de froid nécessaire à cette vernalisation est insuffisante, la croissance serait affectée.

Enfin, parmi les facteurs climatiques favorisant la croissance du hêtre, les températures automnales de l'année précédente jouent un rôle non négligeable. Si l'automne est doux, soit si la somme des températures minimales n'est pas trop basse, la croissance de l'année suivante est améliorée. Ce résultat a déjà été mis en évidence par Makowka *et al.* (1992) sur des hêtres de 150 ans en Allemagne. L'action bénéfique des températures d'automne peut être corrélée à l'activité racinaire. Pour beaucoup d'espèces ligneuses, l'activité racinaire se prolonge tard en saison. Riedacker (1976) rapporte quant à lui que le seuil thermique apparent de l'allongement des racines semble être compris entre 2 et 4°C pour de nombreuses espèces ligneuses (2-4°C pour *Picea abies* et *Abies alba*, 2-3°C pour *Acer saccharinum*). Pour le chêne blanc dans le Missouri (*Quercus alba* L.) Teskey & Hinckley (1981) ont montré, entre autre, que l'élongation racinaire, arrêtée par les sécheresses estivales, reprend en octobre et peut se prolonger jusqu'en décembre tant que le sol n'est pas gelé. Au dessus de 17°C, la quantité d'eau disponible dans le sol conditionne l'élongation racinaire ; en dessous de ce seuil la température est le facteur limitant de l'élongation. Hoffman (1966, *in* Riedacker, 1976) note une élongation racinaire chez de jeunes plants de hêtre au moins jusqu'en octobre. Riedacker (1981) rapporte que sous le climat lorrain, les plants de hêtre n'ont généralement plus aucune pointe blanche à l'extrémité de leurs racines en décembre. En revanche, au Danemark, Ladefoged (1939, in Riedacker, 1981) a observé que certaines racines de hêtre, âgés de 30 à 150 ans, pouvaient s'allonger durant tout l'hiver. Ce résultat pourrait s'expliquer à la fois par le fait qu'au Danemark les températures hivernales du sol sont plus élevées et par le fait que s'agissant d'arbres plus âgés, les racines pourraient disposer d'un stock plus important de glucides utilisables pour leur croissance.

L'automne serait une période clé pendant laquelle les arbres développent leur système racinaire soit en élaborant de nouvelles racines soit en reconstituant celles qui ont été détruites pendant l'été. Si l'automne est doux, l'arbre se constitue un réseau de racines important. Par contre, si des températures minimales trop basses réduisent la régénération racinaire, l'arbre sera handicapé pendant la saison de végétation suivante du point de vue de l'absorption d'eau et d'éléments nutritifs.

Sur des types de stations comparables, les fluctuations de la croissance radiale des arbres de futaie et de taillis-sous-futaie peuvent être expliquées par les mêmes phénomènes climatiques. Pourtant, dans le cas du taillis-sous-futaie, la rémanence des arrière-effets "hydriques" de l'année n-1 est encore nette même si une autocorrélation de premier degré de la croissance radiale est prise en compte. Sans cette prise en compte, les bilans hydriques ou les déficits de réserve de l'année n-2 n'entrent pas dans les modèles. Les arrière-effets concernant les bilans en eau ne semblent donc pas dus à une prise en compte insuffisante de l'autocorrélation. On peut donc penser que les arbres de taillis-sous-futaie sont plus sensibles que les arbres de futaie à des stress hydriques semblables. Il est possible que la compétition pour l'eau soit plus grande en taillis-sous-futaie qu'en futaie à cause d'une compétition racinaire plus forte due à la densité et à la vigueur des brins de taillis.

D'un point de vue méthodologique, l'utilisation conjointe de plusieurs variables climatiques nous a montré que l'influence d'un facteur peut être interprétée à des degrés divers. Dans le cas du hêtre, l'économie de l'eau pendant la saison de végétation est le facteur le plus déterminant pour la croissance. Parmi l'ensemble des variables synthétiques, seuls le bilan hydrique de Thornthwaite ou le déficit de réserve sont des variables satisfaisantes. L'ETP ou la transpiration, pourtant bien corrélées aux niveaux de croissance, sont moins explicatives que les deux variables précédentes. Bien que satisfaisant pour modéliser la

croissance, le déficit hydrique de Thornthwaite est une variable trop éloignée des réalités biophysiques. Le déficit de réserve apparaît alors comme une variable intéressante pour étudier l'influence du climat sur la croissance radiale. Ses avantages sont nombreux. Son calcul à un pas de temps journalier permet de prendre en compte des épisodes de déficits hydriques courts mais suffisants pour affecter le fonctionnement hydrique du peuplement. Le déficit de réserve intègre des paramètres du fonctionnement de l'écosystème, notamment la réserve utile des sols et des caractéristiques des peuplements, qu'il n'est pas possible de prendre en compte avec les variables climatiques seules.

On peut noter toutefois que le modèle de bilan hydrique pourrait être amélioré. Les données que nous avons utilisées proviennent d'un modèle calibré à partir du fonctionnement d'une jeune futaie de chênes. Certaines caractéristiques concernant l'espèce et la structure des peuplements pourraient donc être modifiées : réajustement des dates de débourrement et de chute des feuilles, prise en compte des écoulements d'eau le long des troncs (qui ont été négligés ici), modification du taux d'évaporation du sol, de la fonction d'interception, prise en compte de la transpiration du taillis, prise en considération d'éventuelles remontées d'eau par capillarité, etc.

Les premiers modèles construits à partir des bilans hydriques de Thornthwaite sont globalement plus explicatifs pour le taillis-sous-futaie que pour la futaie. Les arbres de taillis-sous-futaie seraient plus réactifs aux aléas climatiques que les arbres de futaie. Nous avions d'ailleurs précédemment remarqué que la variance interannuelle des indices de croissance est plus forte en taillis-sous-futaie qu'en futaie (Chap IV, § 3.2.3, page 72). En utilisant les données du modèle de bilan hydrique, le pourcentage de variance expliquée par les modèles est plus élevé pour l'échantillon de futaie que pour celui de taillis-sous-futaie. Cette remarque est en contradiction avec la précédente, mais ceci peut s'expliquer par le fait que le modèle de bilan hydrique, paramétré en fonction d'un couvert forestier uniforme de type futaie, n'est pas adapté aux caractéristiques bioclimatiques particulières du taillis-sous-futaie.

L'utilisation des déficits de réserve permet cependant d'expliquer convenablement la part de variance attribuable aux besoins en eau du hêtre pendant la période de végétation. Puisque cette variance est bien expliquée, les corrélations entre les résidus et les autres facteurs climatiques sont plus évidentes. Les températures automnales de l'année précédente ou les températures printanières de l'année en cours -variables instables dans les premiers modèles- apparaissent clairement si les sorties du modèle de bilan hydrique sont utilisées.

*Quatrième partie*

# *CONCLUSIONS GENERALES*

# Chapitre VIII

# SYNTHESE DES RESULTATS, DISCUSSION et CONCLUSION

Quatre objectifs principaux ont été à l'origine de ce travail :

- l'analyse dendrochronologique des hêtraies des plateaux calcaires de Lorraine devait tout d'abord confirmer ou infirmer l'existence d'une dérive positive de la croissance radiale des hêtres depuis le siècle dernier à l'étage collinéen ;

- l'étude de l'évolution à long terme de la croissance radiale offrait l'opportunité d'éprouver diverses méthodes d'extraction des signaux à basse fréquence contenus dans les chronologies de cernes d'accroissements annuels ;

- l'étude conjointe des futaies et taillis-sous-futaies de hêtres devait permettre de quantifier l'influence de la sylviculture dans les phénomènes de dérive à long terme de la croissance radiale ;

- il était enfin intéressant de préciser le statut écologique du hêtre, en particulier vis-à-vis du facteur hydrique (climatique et édaphique) et de caractériser l'interaction de ces facteurs avec la sylviculture.

L'ensemble des résultats obtenus nous permet d'apporter des réponses à ces objectifs. Chacun d'eux sera traité dans les différentes parties de ce chapitre de synthèse.

## I - La croissance radiale des hêtraies collinéennes de Lorraine a-t-elle évolué au cours du siècle passé ?

L'analyse des accroissements annuels de 1025 hêtres, échantillonnés dans toutes les classes d'âges et sur 102 placettes d'observation, nous permet de montrer qu'il existe une dérive positive de la croissance radiale de *Fagus sylvatica* L. au moins depuis le début du siècle. Cette tendance est totalement indépendante de tout effet biologique lié aux processus de vieillissement des arbres.

Ce résultat est tout d'abord en accord avec ceux obtenus d'une part, au laboratoire de phytoécologie de l'INRA et qui concernent la France et, d'autre part, en Europe et dans le reste du monde (voir la synthèse de Innes (1991) qui donne une liste de trente quatre études réalisées dans le monde entier).

De façon plus particulière, ce résultat concorde avec les observations de Picard (1995) à propos du hêtre dans les montagnes vosgiennes. Celui-ci avec une démarche semblable à la nôtre, met en évidence une dérive positive de la croissance radiale depuis le siècle dernier. Cette observation concorde également avec les résultats de Abetz (1988) qui a montré que les jeunes hêtres de Forêt-Noire, jusqu'à l'âge de 50 ans, poussent actuellement plus vite, tant en hauteur qu'en diamètre, que les plus vieux arbres quand ils étaient eux-mêmes jeunes.

Les études qui concluent à l'existence d'une augmentation de la productivité des écosystèmes forestiers ont été réalisées dans de nombreuses parties du globe, depuis les forêts boréales d'Europe (Hari *et al.*, 1984 ; Kauppi *et al.*, 1992) et d'Amérique du Nord (Jozsa & Powell, 1987 ; D'Arrigo *et al.*, 1987), jusqu'aux forêts de montagne (Lamarche *et al.*, 1984 ; Becker, 1987a et b ; Graumlich *et al.*, 1989 ; Peterson *et al.*, 1990 ; Bert, 1992 ; Briffa *et al.*, 1992 ; Becker *et al.*, 1994a ; Picard, 1995), ou selon des séries de transects altitudinaux depuis la limite subalpine des forêts jusqu'à de basses altitudes (Kienast & Luxmoore, 1988). Les forêts collinéennes tempérées restent par contre un domaine géographique peu étudié (Wagener *et al.*,

1983 ; Becker, 1992). La mise en évidence d'une tendance positive de la croissance radiale chez le hêtre des plateaux calcaires de Lorraine est donc un résultat intéressant. Il est cohérent d'une part avec les observations de Becker (1992) qui concernent l'évolution de la croissance radiale des chênes sur le Plateau Lorrain et il tend d'autre part à confirmer l'existence d'une augmentation de la productivité des écosystèmes forestiers pratiquement généralisable à l'échelle de l'hémisphère nord.

**II - La mise en évidence d'une tendance à long terme dépend-elle des méthodes d'analyse utilisées ?**

De nombreux facteurs agissent sur la taille des accroissements annuels des végétaux ligneux : l'âge de l'arbre, les facteurs climatiques, les facteurs environnementaux, les perturbations locales ou régionales des peuplements, etc. Parmi ces facteurs, l'influence de l'âge est en général la première variable dont le dendrochronologue désire se dégager afin de pouvoir comparer les accroissements annuels d'arbres d'âges différents. Pour éliminer cet effet âge, on procède à une standardisation des largeurs ou des surfaces de cernes en calculant des indices de croissance. Cependant, il n'existe pas une méthode unique de standardisation ; celle-ci est liée au but poursuivi.

La standardisation peut être réalisée arbre par arbre. En opérant ainsi, on construit *in fine* une chronologie de référence où aucune tendance à long terme ne peut être décelée (voir chap. VII). Ce résultat vient du fait que l'influence de l'âge et celle de la date sont confondues. En standardisant une à une les séries chronologiques, tous les signaux à base fréquence sont éliminés : l'influence de l'âge de l'arbre aussi bien que l'influence de la date, au sens d'un changement lent et continu des conditions environnementales.

Pour étudier l'évolution à long terme de la croissance radiale, ces deux principaux signaux à basse fréquence doivent être séparés. Trois méthodes d'analyse sont alors envisageables. On peut tout d'abord choisir de fixer le facteur âge, c'est à dire étudier l'influence de la date sur les accroissements radiaux en fonction des âges cambiaux disponibles pris individuellement. On peut aussi choisir d'éliminer uniquement l'effet âge en standardisant les séries chronologiques à l'aide d'une courbe de croissance calculée au niveau régional. On peut enfin tenter d'étudier conjointement l'effet âge et l'effet date, voire l'interaction entre ces deux facteurs, en utilisant l'analyse de variance.

Ces trois méthodes ont été utilisées et elles se sont toutes avérées efficaces pour mettre en évidence des signaux à long terme et de basse fréquence non liés aux processus de vieillissement des arbres. Ces méthodes ont donné des résultats similaires en ce qui concerne la mise en évidence d'une dérive à long terme de la croissance radiale ; nos résultats dépendent donc peu du choix de l'une ou l'autre des méthodes. Cependant, chacune d'elles a ses propres avantages et ses inconvénients.

La méthode à âge constant est très simple et les biais de calcul sont très limités, mais elle est relativement lourde si on cherche à analyser finement les phénomènes et elle ne permet pas de synthétiser l'information contenue dans l'ensemble des cernes.

L'analyse de variance permet de prendre en compte l'effet d'interaction entre l'âge cambial et l'année calendaire, ce que la méthode basée sur la courbe régionale de l'effet âge ne permet pas de faire de façon simple. D'un autre côté, la nécessité de disposer d'un jeu de données équilibré pour l'analyse de variance est une condition très restrictive. En raison de cette contrainte, la résolution temporelle que l'analyse de variance permet d'obtenir est directement liée à l'importance de l'échantillon. L'analyse fiable des tendances à long terme requiert en effet de très gros lots de données le moins déséquilibrés possible surtout en ce qui concerne les cernes âgés (vieux âges cambiaux) correspondant à des dates anciennes.

Cette contrainte existe également lorsque l'on utilise la méthode basée sur une standardisation à partir d'une courbe âge régionale mais elle est moins restrictive. Le signal à basse fréquence dû à des modifications lentes et continues des conditions environnementales est clairement mis en évidence. Ce signal peut être analysé finement sur une chronologie longue et continue, contrairement à ce qu'il est possible de faire par analyse de variance. Pourtant, puisque la croissance radiale d'un arbre dépend à la fois de l'âge de celui-ci et

des modifications lentes et continues des facteurs environnementaux (effet date), la construction d'une courbe âge moyenne unique pour standardiser chaque cerne conduit à l'élimination d'une partie non quantifiable de l'effet date. L'étude conjointe de l'action de l'âge cambial et de la date sur les accroissements radiaux annuels n'est possible qu'en utilisant l'analyse de variance.

Pour étudier l'évolution à long terme de la croissance radiale, il est donc essentiel d'employer une méthode de standardisation particulière. Dans ce but, le procédé "arbre par arbre", très efficace pour des études dendroclimatiques, est mal adapté aux arbres provenant de forêts gérées. Dans ce cas les arbres sont toujours "trop jeunes" ; il existe toujours une influence de l'âge sur les largeurs de cernes. Ceci n'est cependant plus le cas lorsque l'on s'intéresse à des arbres très âgés. L'analyse de la croissance à âge constant permet de mettre en évidence de façon simple et rapide l'existence ou non d'une dérive à long terme. L'analyse de variance permet de quantifier précisément l'importance du phénomène avec un minimum de biais. Enfin, l'emploi d'une courbe âge régionale pour standardiser les séries permet d'étudier finement l'évolution du phénomène dans le temps. Ces trois méthodes apparaissent donc comme complémentaires.

## III - Déterminisme de la tendance à long terme de la croissance radiale

Notre étude apporte de nouvelles informations quant au rôle respectif de la sylviculture et des changements environnementaux sur les modifications à long terme de la croissance radiale. Pour les arbres de futaie, on observe une augmentation régulière du taux de croissance depuis le siècle dernier. En taillis-sous-futaie une tendance est perceptible quoique beaucoup plus faible jusque dans années 1950. A partir de 1950, la tendance à long terme de la croissance radiale s'accélère brusquement. Ce saut de croissance est particulièrement évident dans le cas du taillis-sous-futaie.

La différence significative observée entre les deux types de traitements sylvicoles étudiés implique que les tendances mises en évidence ne peuvent être expliquées uniquement par l'évolution des facteurs environnementaux globaux comme le $CO_2$, le climat, les dépôts azotés. La sylviculture intervient également, soit en jouant un rôle direct dans la tendance positive de croissance radiale, soit en interagissant avec certains facteurs de l'environnement.

### 1 - Biais d'échantillonnage

En premier lieu, nos résultats montrent que les tendances à long terme mises en évidence ne semblent pas être un artéfact dû à certains biais d'échantillonnage.

Il semblerait que les arbres anciens et actuellement dominants ont probablement toujours été dominants tout au long de leur vie. Si on exclut des lots de données les arbres les plus vieux (supposés peu vigoureux et non représentatifs du niveau de croissance des peuplements anciens) ou les jeunes arbres très vigoureux (supposés soumis à des pratiques sylvicoles plus dynamiques que par le passé), on met toujours en évidence en futaie, comme en taillis-sous-futaie, l'existence d'une dérive positive de la croissance radiale.

De tels arbres ne sont donc pas à l'origine du phénomène. On ne peut pas incriminer un tel biais comme étant le facteur prépondérant dans le déterminisme des tendances à long terme.

### 2 - Influence de la sylviculture

Une sylviculture plus dynamique du hêtre, c'est-à-dire une fréquence ou une intensité plus élevée des éclaircies dans les peuplements de futaie au cours du siècle écoulé, aurait pu expliquer la tendance observée. Une telle diminution des conditions de compétition n'est cependant pas clairement documentée, et cette hypothèse est tout à fait spéculative. Un tel changement n'aurait pu se produire qu'au cours des dernières décennies, où l'aménagement des forêts a été plus intensif. Nous avons d'ailleurs montré qu'une nette

amélioration des niveaux de croissance, imputable à une évolution des pratiques sylvicoles, s'est produite seulement à partir des années 1975-1980, en futaie uniquement, et essentiellement pour les arbres jeunes. La dérive positive de la croissance radiale s'observe également dans les taillis-sous-futaie. Dans ce cas, elle ne peut que plus difficilement être expliquée par des changements de pratiques sylvicoles. Ces changements sont supposés *a priori* absents ou minimes dans ce type de peuplement. Les seules modifications rapportées à propos de la gestion des taillis-sous-futaie concernent l'abandon des coupes de taillis à partir des années 1960 en raison du désintérêt croissant pour le bois de feu. Pourtant, malgré la fermeture des taillis-sous-futaie consécutive au vieillissement des taillis, ce qui correspond à une augmentation du niveau de compétition dans les peuplements, les arbres constituant la "réserve" montrent une tendance positive de la croissance encore très nette. Cette tendance à long terme, existant depuis le début du siècle, s'est d'ailleurs accélérée depuis les années 1950 et, comme pour les arbres de futaie, les jeunes tiges réagissent plus que les anciennes. En taillis-sous-futaie, les perturbations locales de la croissance radiale (densité des peuplements) n'ont pas supplanté les perturbations exogènes (du type changements environnementaux).

### 3 - Influence de la fertilité stationnelle

Nous avons montré qu'en situation de plateau, la productivité des hêtraies est très corrélée à la disponibilité en eau du sol, c'est à dire à l'épaisseur de celui-ci. Or, sur les plateaux calcaires de Lorraine, les futaies de hêtres sont situées préférentiellement sur les sols les plus profonds, alors que le régime de taillis-sous-futaie a été maintenu principalement sur les stations à sol plus superficiel. D'autre part, pour les arbres de futaie, la dérive positive de la croissance radiale est d'autant plus forte que le type de station est favorable à la croissance. La meilleure fertilité des placettes de futaie par rapport à celles de taillis-sous-futaie pourrait expliquer la différence observée entre les tendances à long terme des arbres de futaie et de taillis-sous-futaie. Pourtant, dans une fourchette de conditions environnementales identiques, la tendance à long terme de la croissance radiale des arbres de futaie reste supérieure à celle des arbres de taillis-sous-futaie. Les types de stations ne peuvent en outre expliquer les sauts de croissance observés dans les années 1950.

### 4 - Influence des facteurs environnementaux

Parmi les changements environnementaux susceptibles d'affecter positivement la croissance radiale, figurent trois facteurs. Certains auteurs invoquent une fertilisation directe par le dioxyde de carbone atmosphérique (Hari *et al.*, 1984 ; Hari &Arovaara, 1984, 1988 ; D'Arrigo *et al.*, 1987 ; Kienast & Luxmoore, 1988 ; Briffa, 1992 ; Graybill, 1993 ; Becker *et al.*, 1994a et b). D'autres insistent plus particulièrement sur l'importance des dérives climatiques comme l'augmentation des pluies et des températures (Kuivinen & Lawson, 1982 ; Graumlich & Brubaker, 1987 ; Graybill, 1987 ; Becker, 1989b ; Graumlich *et al.*, 1989 ; Cook *et al.*, 1991 ; Graumlich, 1991 ; Archambault & Bergeron, 1992). Enfin, d'autres auteurs groupent plusieurs facteurs en associant une fertilisation par les dépôts azotés atmosphériques (Wagener *et al.*, 1983 ; Hari & Arovaara, 1984, 1988 ; Hari *et al.*, 1986 ; Kenk & Fischer, 1988 ; Kenk *et al.*, 1989 ; Hartmann *et al.*, 1992 ; Becker, 1993).

#### 4.1 - Le climat

La reconstruction des séries chronologiques dégagées de toute tendance séculaire à partir des données climatiques conduit à des modèles stables et très explicatifs en ce qui concerne les relations entre arbre, climat et gestion sylvicole. Pour l'essentiel, la croissance du hêtre est extrêmement bien corrélée à la disponibilité en eau dans les sols. Pourtant, en Lorraine, ni la pluviométrie ni les températures n'ont augmenté ou diminué de façon significative depuis 1881, et encore moins depuis quelques décennies, que ce soit à l'échelle annuelle ou mensuelle. Les seules évolutions climatiques ne peuvent, dans notre cas, expliquer de façon satisfaisante l'évolution positive de la croissance radiale. L'hypothèse climatique ne

saurait toutefois être définitivement abandonnée ; il est en effet possible que les séries dont nous disposons soient biaisées.

### 4.2 - Le dioxyde de carbone

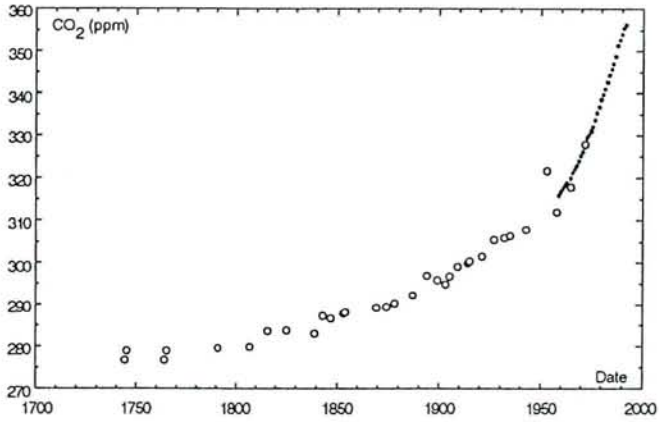



**Figure 136** : Evolution du taux de CO2 atmosphérique depuis 1745. Les points blancs correspondent à des mesures effectuées sur des carottes de glace à la station de Siple en Antartique (Neftel *et al.*, 1985 ; Friedli *et al.*, 1986 ; Neftel *et al.*, 1994). Les points noirs correspondent à des mesures atmosphériques effectuées à Mauna Loa (archipel d'Hawaî), (Keeling & Whorf, 1994).

En raison des activités humaines, la concentration du dioxyde de carbone atmosphérique ne cesse d'augmenter depuis le début du siècle dernier (Figure 136), passant de 280 à 360 ppm actuellement. Ce taux sera probablement deux fois celui de la valeur pré-industrielle en 2050. A cette constatation correspond une question fondamentale : comment cette augmentation va-t-elle se répercuter, ou s'est-elle déjà répercutée, sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers ? L'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique devrait entraîner d'une part, des modifications climatiques importantes qu'il n'est pas encore possible de modéliser de façon fiable (le $CO_2$ agirait alors conjointement avec d'autres gaz à effet de serre), et d'autre part, une réaction des végétaux qu'il est actuellement difficile de quantifier (Gates, 1990 ; Watson *et al.*, 1990 ; Bowes, 1993). Si certains auteurs minimisent l'action d'une fertilisation directe par le $CO_2$, d'autres pensent au contraire que ce facteur est primordial soit parce qu'il favorise directement la photosynthèse soit parce qu'il améliore l'efficience de l'eau. Les études expérimentales entreprises pour éprouver l'effet d'atmosphères enrichies en $CO_2$ montrent que la complexité des mécanismes physiologiques mis en œuvre aboutit à des réactions très diverses. La plupart de ces études révèle cependant des effets positifs plus ou moins importants que ce soit sur la biomasse produite, la taille des feuilles, l'activité photosynthétique ou l'efficience de l'eau (voir la synthèse de Ceulemans & Mousseau, 1994). Pour de jeunes plants de hêtre, les effets positifs d'un enrichissement en $CO_2$ ont été observés par Overdieck (1993) et El Kohen *et al.* (1993). Pour ces derniers, la biomasse est augmentée de 60% entre 350 et 700 ppm. La réponse à un taux de $CO_2$ élevé se traduit par la formation de nouveaux puits capables d'utiliser l'excès de carbohydrates formés, avec notamment la formation de secondes pousses. Il est cependant important de noter que peu d'études ont été réalisées afin de comparer la réaction des arbres à des concentrations de 280 ppm et 360 ppm de $CO_2$. En analysant des échantillons d'herbiers, Woodward (1987), puis Paoletti & Gellini (1993), ont montré qu'en 200 ans la densité stomatique du hêtre aurait diminué d'à peu près 40%. L'augmentation du taux de $CO_2$ atmosphérique pourrait donc être responsable, au moins en partie, des tendances à long terme de la croissance radiale que nous observons. Pourtant, la réponse des arbres de futaie et de taillis-sous-futaie n'est pas identique : la fertilisation par le $CO_2$ n'aurait pas eu exactement les mêmes conséquences.

La différence entre ces deux types de peuplements pourrait s'expliquer par des modes différents d'allocation du carbone en particulier en ce qui concerne la fructification. Les arbres de taillis-sous-futaie fructifient plus jeunes et en plus grande quantité que les arbres de futaie. Selon Mathieu (1897) et Pardé (1943), la maturité sexuelle d'un hêtre isolé peut être atteinte à l'âge de 40 ans. Pour un hêtre soumis à la concurrence, la fructification ne peut commencer qu'à l'âge de 60-80 ans selon Thiébaut & Vernet (1981).

Seuls les arbres âgés fructifient fréquemment c'est-à-dire tous les ans ou tous les deux ans. Les facteurs exogènes, comme le climat ou la fertilité stationnelle, ont une grande influence sur le rythme et l'abondance des floraisons (Le Tacon & Oswald, 1977), mais ces facteurs semblent avoir moins d'influence à partir d'un certain âge. Toujours d'après ces mêmes auteurs, dans des stations à mor, moder et mull acide, l'azote et le phosphore auraient un effet considérable sur la fructification en mutipliant le nombre de fleurs mâles et surtout femelles, ainsi que le nombre de faînes viables. L'état physiologique d'un arbre âgé semble plus orienté vers la floraison que celui d'un arbre jeune. A surface de projection de cime égale, les arbres dominants des peuplements fortement éclaircis et les arbres de taillis-sous-futaie ont une fructification plus élevée que les arbres de futaie très dense (c'est la raison pour laquelle le forestier réalise des coupes d'ensemencements). Becker *et al.* (1977), ont montré que le diamètre des arbres à 1,30 m est corrélé positivement avec le nombre de cupules au sol et qu'à type de station égal (parmi les plus fertiles), les arbres de taillis-sous-futaie produisent 2,5 fois plus de faînes que les arbres de futaie. Ceci peut s'expliquer par une surface feuillée plus grande, un meilleur éclairement et par un meilleur écoulement de l'air froid vers le bas, c'est à dire un moindre risque de gelées tardives (Oswald, 1981). Le houppier des arbres de taillis-sous-futaie étant bien plus volumineux que celui des arbres de futaie, on peut penser que la production de faînes n'en est qu'augmentée. Or, une bonne faînée consomme une grande partie des produits de la photosynthèse et des éléments minéraux de l'arbre. Oswald (1981), après plusieurs études et comparaisons avec d'autres auteurs, avance les chiffres suivants : une faînée totale produit 500 faînes pleines et 250 faînes vides par mètre carré, avec un poids sec unitaire et moyen respectif de 0,200 g et 0,007 g. Les faînes représentent 30% de la biomasse mise en œuvre, la part restante étant divisée entre les inflorescences mâles (pollen exclu), 10% et les cupules, 60%. A partir de ces valeurs, on obtient une biomasse totale de 3,39 t/ha de matière sèche concernant les organes reproducteurs. Selon Schober (*in* Le Goff, 1981), la meilleure classe de productivité pour le hêtre dans le Nord-Est de la France correspond à un accroissement moyen à 100 ans de 9 $m^3$/ha/an. Selon Nepveu (1981), la densité du bois de hêtre sec à l'air varie, selon les provenances, entre 0,65 et 0,78. L'accroissement moyen à 100 ans correspond donc à des valeurs situées entre 5,85 et 7,02 t/ha/an. Une fructification complète serait alors équivalente à 58 ou 48% de l'accroissement annuel moyen à 100 ans. Holmsgaard (1955, *in* Oswald, 1981) avait d'ailleurs remarqué que lors d'une fructification abondante, les largeurs de cernes étaient diminuées de 50% avec un arrière-effet sur deux ans. Hartig (1888) et Henry (1895) avait déjà rapporté la même réduction de croissance. On peut alors penser, de façon générale, que l'arbre de taillis-sous-futaie investit en priorité dans la production des semences. Le cerne annuel ne couvrirait que les besoins physiologiques de l'arbre (surface conductrice) et la production supplémentaire de bois (dérive positive de la croissance radiale) serait alors une production "de luxe". A l'opposé, l'arbre de futaie qui ne produit pas ou peu de faînes tant qu'il est soumis à une forte concurrence, pourrait consacrer la majorité des assimilats surproduits à la formation de bois (croissance en hauteur et en diamètre).

Ce raisonnement peut être étendu à d'autres compartiments de l'arbre. Toutes stations confondues et pour des arbres de 100 à 130 ans, il existe des différences sensibles entre la hauteur et le diamètre des arbres de futaie et de taillis-sous-futaie (31 m et 50 cm pour les arbres de futaie contre 23 m et 60 cm pour les arbres de taillis-sous-futaie). Ces différences au niveau de la tige sont cependant bien inférieures à celles que l'on peut observer au niveau du houppier puisqu'en moyenne le volume de celui-ci est deux fois plus important pour les arbres de taillis-sous-futaie que pour les arbres de futaie (1400 $m^3$ contre 740 $m^3$). Oswald (1981) propose une masse foliaire sèche de 3 t/ha, sans préciser cependant ni l'âge ni la nature du peuplement. Schulze (1981) donne la valeur de 2,93 t/ha/an pour des hêtres de 120 ans. Lemée (1978) donne quant à lui les valeurs de 3,8 et 3,45 t/ha/an pour, respectivement, des gaulis et des arbres adultes.

La compétition racinaire est souvent supposée plus forte en taillis-sous-futaie qu'en futaie. Si le taillis ne concurrence pas la réserve dans sa partie aérienne, ce n'est probablement pas le cas dans le compartiment souterrain. Le taillis, formé d'essences rejettant beaucoup et de façon très vigoureuse comme le charme, doit concurrencer fortement les arbres de place en ce qui concerne l'eau et les éléments minéraux. Pour survivre, il est alors possible que l'arbre de taillis-sous-futaie doive investir dans ses racines plus que l'arbre de futaie. Celles-ci doivent alimenter de surcroît un volume de feuilles beaucoup plus grand. Mac Queen (1968, *in* Riedacker, 1981) estime la masse des fines racines de hêtres âgés de 105 ans à 2,4 t/ha. Meyer & Göttsche (1971, *in* Riedacker, 1981) donnent la valeur de 2,5 t/ha dans une hêtraie allemande. La biomasse des fines racines serait donc à peu près égale à celle des feuilles.

Ces remarques peuvent intervenir dans l'explication de la différence de "rendement" provoquée par une amélioration des conditions environnementales entre les arbres de futaie et de taillis-sous-futaie. De façon plus générale, on peut se demander quelle est la part de carbone allouée à ce que nous avons étudié, c'est-à-dire le développement de la tige à la hauteur de 1,30 m. Schulze & Koch (1971, *in* Aussenac, 1981) et Schulze (1981) donnent un bilan de la productivité photosynthétique d'un peuplement de hêtres. Ces valeurs sont reportées dans le tableau 43.

| | t C/ha/an | | pourcentages | |
|---|---|---|---|---|
| **Assimilation nette** | 8,6 | | 100 | |
| **Pertes par respiration** | 4,3 | | 50 | |
| Respiration nocturne des feuilles | | 1,3 | | 15 |
| Respiration des bourgeons | | 0,4 | | 5 |
| Respiration des racines et des troncs | | 2,6* | | 30* |
| **Accroissement annuel de biomasse** | 4,3 | | 50 | |
| Chute annuelle des feuilles et des rameaux | | 1,9 | | 22 |
| Accroissement net de la biomasse aérienne | | 2,1 | | 24 |
| Accroissement net de la biomasse souterraine | | 0,3* | | 4* |

**Tableau 43** : Bilan de la productivité photosynthétique d'un peuplement de hêtres en tonnes de carbone par hectare et par an. Les valeurs suivies d'un astérisque ne sont pas calculées et constituent simplement des ordres de grandeur. (d'après Schulze & Koch, 1971, *in* Aussenac, 1981 et Schulze, 1981).

D'après ces valeurs, il apparaît clairement que la dendrochronologie ne permet d'étudier qu'une faible part du carbone fixé par l'arbre. Les changements environnementaux pourraient de surcroît très bien se traduire par des changements dans les proportions allouées aux différentes parties de l'arbre, en même temps que les quantités "absolues" allouées. Des différences concernant la respiration, la densité du bois, l'allocation du carbone aux fruits, racines, branches et feuilles, etc., pourraient expliquer des différences de comportement entre les arbres de futaie et de taillis-sous-futaie et expliquer la plus faible tendance observée en taillis-sous-futaie, notamment avant les années 1950. Cependant l'augmentation du taux de $CO_2$ dans l'atmosphère est régulière et exponentielle : il n'y a pas eu de saut brusque de concentration dans les années 1950, bien que certains auteurs aient considéré cette date comme une charnière importante (Gammon *et al.*, 1985 ; Kienast & Luxmoore, 1988 ; Bouvarel, 1989 ; Graumlich, 1991).

### 4.3 - Les dépôts azotés

Parmi les autres facteurs susceptibles d'avoir évolué brusquement depuis quelques décennies, figurent les dépôts azotés. Ces dépôts seraient de faible importance sous les hautes latitudes (Erisman, 1989), mais ils auraient brutalement augmenté en Europe Centrale à partir de 1950 (Lövblad & Erisman, 1992). En France, selon Ulrich & Williot (1993), les plus anciennes mesures de dépôts atmosphériques ont été réalisées en 1850, mais ce n'est qu'à partir de 1970 que ces mesures se sont intensifiées. Les données trop irrégulières et ponctuelles ne permettent cependant pas de dégager des tendances à plus ou moins long terme. Landmann (1991) et Gundersen (1992) donnent les valeurs de 15 à 30 kg/ha/an en moyenne pour les écosystèmes forestiers européens et 2-3 à 55 kg/ha/an pour les forêts françaises. Dans les Vosges, les apports seraient compris entre 5 et 20 kg/ha/an (Dambrine & Nourisson, 1990). Plus précisément, en ce qui concerne la région que nous avons étudiée ici, les niveaux d'apports actuels ont été évalués à environ 14 à 20 kg/ha/an (Thimonier, 1994). Cependant, les activités métallurgiques en Lorraine ont fortement régressé : les émissions

d'azote devaient être plus élevées auparavant. Hors couvert, entre la fin des années 1960 et le début des années 1970, Aussenac *et al.* (1972) donnaient, pour la même région des valeurs de 20 à 30 kg/ha/an en ce qui concerne l'azote ; 5 à 10 kg/ha/an pour le potassium et 2 à 3 kg/ha/an pour le magnésium. En comparant des relevés de la végétation herbacée de sous-bois entre 1970 et 1992, Thimonier *et al.* (1994) ont montré que la flore actuelle des forêts de Lorraine se caractérise par une fréquence plus élevée des espèces exigeantes en azote. Cette eutrophisation joue probablement un rôle important dans les fortes tendances positives de la croissance radiale des hêtres observée depuis 1950. Cette observation n'est pas unique. Kenk & Fischer (1988) ont constaté des augmentations dans la croissance radiale de l'épicea et du hêtre en Forêt-Noire à partir de années 1960. Ces auteurs pensent que ces augmentations peuvent être attribuées à une fertilisation azotée atmosphérique (dépôts de 9,5 à 40 kg/ha/an, soit en moyenne 25 kg/ha/an (Evers, 1985, *in* Kenk & Fischer, 1988)). Des constatations similaires sont faites par Glatzel *et al.* (1987, *in* Kenk & Fischer, 1988) et Evers (1987, *in* Kenk & Fischer, 1988) qui constatent que dans la région de Baden-Württemberg, les dépôts atmosphériques ont supprimé ou diminué les carences en azote très générales dans cette région. La très bonne translocation de l'azote dans l'arbre prolongerait de surcroît le bénéfice d'un dépôt ponctuel dans le temps (Hari *et al.*, 1986).

Pourtant, Toutain & Duchaufour (1970) ont montré que sur des sols à mor, moder, mull acide ou mull calcique, si la quantité d'azote varie dans les horizons organiques de 1,7 à 12 t/ha et de 0,3 à 12 t/ha dans les horizons minéraux, la quantité d'azote contenue dans les litières annuelles est relativement stable, oscillant entre 25 et 50 kg/ha. Le Tacon & Toutain (1973) notent également dans soixante cinq peuplements adultes que, par rapport à d'autres éléments minéraux, la teneur en azote des feuilles (ainsi que le rapport C/N), mesurée au mois d'août, varie assez peu en fonction du type de station (avec des humus allant du mor jusqu'au mull calcique). Toujours selon ces mêmes auteurs, le hêtre semblerait manifester, pour une gamme très large de stations, une relative indifférence à la forme comme à la quantité d'azote disponible dans le sol, ceci pouvant expliquer en partie la grande plasticité de cette essence. Nous montrons cependant qu'en classant les stations par rapport aux besoins de la flore herbacée en ce qui concerne la nutrition azotée (coefficient N d'Ellenberg), la croissance radiale est favorisée, en futaie comme en taillis-sous-futaie, par une bonne disponibilité en azote. Cet élément doit donc avoir une certaine importance sur la croissance, même si par rapport à d'autres essences le hêtre semble plus tolérant.

L'action favorisante sur la croissance d'un apport supplémentaire de dioxyde de carbone atmosphérique pourrait également être améliorée grâce à la fertilisation azotée. El Kohen *et al.* (1992) ont montré que dans le cas de jeunes plants de châtaignier (*Castanea sativa* Mill.) l'augmentation de biomasse due au doublement de $CO_2$ est la même quelle que soit la fertilité du sol (de l'ordre de 20%), mais que la répartition de la matière sèche est différente. Sur sol pauvre, l'augmentation de biomasse est uniquement localisée dans les racines ; sur sol fertilisé, l'augmentation de biomasse concerne uniquement la partie aérienne, dont la tige grossit en diamètre et non pas en hauteur. D'autre part, l'enrichissement en $CO_2$ réduit de façon significative la concentration en azote de tous les organes, quel que soit son degré de disponibilité dans le sol. Cependant, l'augmentation de biomasse compense cette réduction et le pool d'azote reste constant entre les différents arbres. Une double fertilisation azotée et carbonée pourrait donc avoir une action très significative sur la croissance depuis les années 1950. Cependant, selon Aussenac (1987), l'augmentation d'éclairement au sol favorise la minéralisation de l'humus et peut ainsi être assimilée à une fertilisation azotée. Il est possible que la mise en lumière régulière des sols de taillis-sous-futaie (tous les 25-30 ans après les coupes de taillis) favorise la disponibilité de cet élément par rapport aux sols de futaie. Dans ce cas, la synergie supposée $CO_2$/azote devrait avoir eu une action sur la croissance radiale supérieure pour les arbres de taillis-sous-futaie par rapport aux arbres de futaie. Or ce n'est pas le cas puisqu'avant les années 1950 la tendance à long terme est moins forte en taillis-sous-futaie qu'en futaie. Dans le cas du taillis-sous-futaie, il n'est cependant pas évident qu'un surcroit régulier d'azote profite aux tiges constituant la réserve. Le taillis, très vigoureux, doit consommer une part importante de cet azote. De plus, son extraction régulière doit contribuer à une exportation massive d'éléments minéraux. Cependant on ne dispose actuellement d'aucune information précise sur les mécanismes de compétition ou sur le rôle exact de ces exportations.

## III - Conclusion et perspectives

Entre les peuplements de futaie régulière et de taillis-sous-futaie, les caractéristiques microclimatiques, le fonctionnement du sol, le fonctionnement écophysiologique des arbres (bilan hydrique et minéral, allocation du carbone), sont sensiblement différents. Ces caractéristiques sont malheureusement assez peu connues (Becker, 1972). Les changements environnementaux qui sont susceptibles d'agir sur la croissance pourraient donc le faire de façon variable dans les deux types de peuplements.

Nos résultats soulignent donc l'intérêt de l'étude rétrospective de la croissance radiale des arbres à l'échelle du siècle ou plus. La compréhension des phénomènes de dérive à long terme ne pourra se faire qu'en multipliant les études dendroécologiques comparables à la nôtre dans des régions où les facteurs explicatifs potentiels évoqués ci-dessus peuvent être séparés. Les forêts boréales, vierges de toute perturbation sylvicole et où les niveaux de pollution azotée sont les plus bas des zones forestières de l'hémisphère nord, ou les arbres poussant en limite altitudinale de végétation, offrent une bonne opportunité. De telles études devront cependant impérativement mettre en œuvre des méthodes de standardisation adaptées au but recherché, telles que l'utilisation d'une courbe régionale de l'effet âge ou l'analyse de variance conjointe des effets âge cambial et année calendaire. Elles seules sont susceptibles d'aboutir à des conclusions fiables. L'analyse du rapport isotopique $^{13}C/^{12}C$ dans la cellulose devrait également permettre d'affiner notre compréhension des causes de ces tendances. Il donne en effet accès à une composante essentielle de la productivité de l'arbre : l'efficience d'utilisation de l'eau. Une telle approche est actuellement en cours à partir de nos échantillons.

Enfin, l'étude de la croissance radiale implique tout d'abord une bonne compréhension des variations interannuelles des niveaux de croissance. Le modèle de bilan hydrique, efficace sous sa forme actuelle pour expliquer la croissance radiale, devrait être amélioré en le calibrant plus précisément (écoulements le long des troncs, dates de débourrement ...) et en le testant dans d'autres régions d'études et sur de plus longues chronologies. Cependant, cette approche à l'échelle annuelle ou décennale n'est pas suffisante pour comprendre, modéliser ou prévoir les évolutions probables des écosystèmes forestiers. Les réactions à long terme ne sont probablement pas de simples extrapolations des réactions à court terme : les mécanismes mis en jeu sont sans doute différents. L'intérêt des études dendroécologiques du type que nous avons présenté ici est de porter sur une échelle de temps peu étudiée jusqu'à maintenant dans le domaine des relations croissance-environnement.

# *REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES*

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES


**ABETZ V.P., 1988.** Untersuchungen zum Wachstum von Buchen auf der Schwäbischen Alb. *Allg. Forst- u.J.- Ztg., 159. Jg.*, 11/12, 215-223.

**ABGRALL J.F. & SOUTRENON A., 1991.** La forêt et ses ennemis. CEMAGREF (Ed.), 399p.

**ARCHAMBAULT S. & BERGERON Y., 1992.** An 802-year tree ring chronology from the Quebec boreal forest. *Can. J. For. Res.*, 22, 674-682.

**AUSSENAC G., 1981.** Physiologie de la croissance du hêtre : photosynthèse. *In* "Le hêtre", Tessier-du-Cros E., Le Tacon F., Nepveu G., Pardé J., Perrin R., Timbal J., INRA (Ed.), Paris, 157-160.

**AUSSENAC G., 1987.** Effets de l'éclaircie sur l'écophysiologie des peuplements forestiers. *Schweiz. Z. Forstwes.*, 138, 685-700.

**AUSSENAC G., BONNEAU M. & LE TACON F., 1972.** Restitution des minéraux au sol par l'intermédiaire de la litière et des précipitations dans quatre peuplements forestiers de l'Est de la France. *Œcol. Plant.*, 7, 1-21.

**AUSSENAC G., DESJEUNES J.M. & WILLM F., 1981.** Climatologie de l'arborétum d'Amance (Meurthe-et-Moselle). *Rev. For. Fr.*, 33 (1), 29-37.

**AUSSENAC G. & DUCREY M., 1977.** Etude bioclimatique d'une futaie feuillue (*Fagus sylvatica* L. et *Quercus sessiliflora* Salisb.) de l'Est de la France : I - Analyse des profils microclimatiques et des caractéristiques anatomiques et morphologiques de l'appareil foliaire. *Ann. Sci. For.*, 34 (4), 265-284.

**AUSSENAC G. & VALETTE J.C., 1982.** Comportement hydrique estival de *Cedrus atlantica* Manetti, *Quercus ilex* L., *Quercus pubescens* Willd. et de divers pins dans le Mont Ventoux. *Ann. Sci. For.*, 39 (1), 41-62.

**BACH M., 1975.** Les forêts mitraillées en Lorraine. *Rev. For. Fr.*, 27 (3), 217-222.

**BADOUX E., 1939.** De l'influence de divers modes et degrés d'éclaircies dans les hêtraies pures. *Mitt. schweiz. Anst. forstl. Versuchswes.*, 21, 59-145.

**BADRE L., 1983.** Histoire de la forêt française. Arthaud (Ed.), 310p.

**BAIZE D., 1988.** Guide des analyses courantes en pédologie. INRA (Ed.), Paris, 172p.

**BECKER M., 1972.** Etude des liaisons station-production dans une forêt sur sols hydromorphes (Forêt communale de Charmes - Vosges). *Rev. For. Fr.*, 24 (4), 269-287.

**BECKER M., 1978.** Définition des stations en forêt de Haye. Potentialités du hêtre et du chêne. *Rev. For. Fr.*, 30 (4), 251- 268.

**BECKER M., 1979.** Une étude phyto-écologique sur les plateaux calcaires du Nord-Est (Massif de Haye ; 54). Utilisation de l'analyse des correspondances dans la typologie des stations. Relations avec la productivité et la qualité du hêtre et du chêne. *Ann. Sci. For.*, 36 (2), 93-124.

**BECKER M., 1981a.** Sylviculture du hêtre : concurrence de la végétation dans les régénérations naturelles. *In* "Le hêtre", Tessier-du-Cros E., Le Tacon F., Nepveu G., Pardé J., Perrin R., Timbal J., INRA (Ed.), Paris, 224-228.

**BECKER M., 1981b.** Ecologie du hêtre et de la hêtraie ; caractérisation climatique de la hêtraie. *In* "Le hêtre", Tessier-du-Cros E., Le Tacon F., Nepveu G., Pardé J., Perrin R., Timbal J., INRA (Ed.), Paris, 71-77.

**BECKER M., 1985.** Le dépérissement du sapin dans les Vosges. Quelques facteurs liés à la détérioration des cimes. *Rev. For. Fr.*, 37 (4), 281-287.

**BECKER M., 1986.** Avantages et limites de l'étude de la végétation spontanée pour la typologie des stations forestières. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 72 (10), 875-882.

**BECKER M., 1987a.** Bilan de santé actuel et rétrospectif du sapin (*Abies alba* Mill.) dans les Vosges. Etude écologique et dendrochronologique. *Ann. Sci. For.*, 44 (4), 379-402.

**BECKER M., 1987b.** Intérêt de la végétation pour la typologie des stations forestières. *Bull. Soc. Bot. Fr., lettres bot.*, 134 (1), 35-37.

**BECKER M., 1988.** Démarche méthodologique préconisée pour la typologie des stations forestières. *Colloque Phytosociologique XIV : Phytosociologie et foresterie*, Nancy, 299-311.

**BECKER M., 1989a.** Le dépérissement des forêts : importance du climat et de la sylviculture. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 75 (9), 117-124.

**BECKER M., 1989b.** The role of climate on present and past vitality of silver fir in forest in the Vosges montains of northeastern France. *Can. J. For. Res.*, 19, 1110-1117.

**BECKER M., 1992.** Deux indices de compétition pour la comparaison de la croissance en hauteur et en diamètre d'arbres aux passés sylvicoles variés et inconnus. *Ann. Sci. For.*, 49, 25-37.

**BECKER M., 1993.** Réponse des arbres aux variations du climat dans l'est de la France. *Sécheresse*, 4, 241-244.

**BECKER M., BERT G.D., BOUCHON J., DUPOUEY J.L., PICARD J.F. & ULRICH E., 1995.** Long-term changes in Forest Productivity: the Dendroecological Approach. *In* "Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains", G. landmann & M. Bonneau (Eds.), Springer-Verlag, 143-153.

**BECKER M., BERT G.D., BOUCHON J., PICARD J.F. & ULRICH E., 1994a.** Tendances à long terme observées dans la croissance de divers feuillus et résineux du nord-est de la France depuis le milieu du XIX$^{e}$ siècle. *Rev. For. Fr.*, 46 (4), 335-341.

**BECKER M., BOUCHON J. & KELLER R., 1988.** La dendrochronologie et la xylochronologie : les outils d'analyse rétrospective du comportement des arbres. *Rev. For. Fr.*, 40 (n°spécial), 53-61.

**BECKER M., BRAEKER O.U., KENK K., SCHNEIDER O. & SCHWEINGRUBER F.H., 1990.** Aspects des houppiers et croissance des arbres au cours des dernières décennies dans les régions frontalières d'Allemagne, de France et de Suisse. *Rev. For. Fr.*, 42 (3), 284-300.

**BECKER M., DUBOIS F.X. & LE TACON F., 1977.** Types de station, fructification et installation des semis de hêtre sur les plateaux calcaires du Nord-Est (Forêt de Haye ; Meurthe-et-Moselle). Interaction avec le travail du sol et l'élimination de la végétation concurrente. *Rev. For. Fr.*, 29 (5), 363-374.

**BECKER M., LANDMANN G. & LEVY G., 1989.** Silver fir decline in the Vosges Mountains (France): role of climate and silviculture. *Water, Air and Soil Pollution*, 48, 77-86.

**BECKER M. & LE GOFF N., 1988.** Diagnostic stationnel et potentiel de production. *Rev. For. Fr.*, 40 (n° spécial), 29-43.

**BECKER M., LE TACON F. & TIMBAL J., 1980.** Les plateaux calcaires de Lorraine. Types de stations et potentialités forestières. ENGREF (Ed.), 216p.

**BECKER M. & LEVY G., 1988.** A propos du dépérissement des forêts : climat, sylviculture et vitalité de la sapinière vosgienne. *Rev. For. Fr.*, 40 (5), 345-358.

**BECKER M., NIEMINEN T.M. & GEREMIA F., 1994b.** Short-term variations and long-term changes in oak productivity in northeastern France. The role of climate and atmospheric $CO_2$. *Ann. Sci. For.*, 477-492.

**BECKER M., PICARD J.F. & TIMBAL J., 1978.** Les espèces forestières à répartition écologique bimodale : hypothèses et premiers éléments de réponse. 103ème congrès national des sociétés savantes, Nancy, *Sciences fasc. I*, 189-199.

**BERT G.D., 1988.** Etude dendroécologique du dépérissement du sapin (*Abies alba* Mill.) dans le Jura. *Mémoire de DEA en biologie végétale et forestière*. Université de Nancy I, 62 p + annexes.

**BERT G.D., 1992.** Influence du climat, des facteurs stationnels et de la pollution sur la croissance et l'état sanitaire du Sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) dans le Jura. Etude phytoécologique et dendrochronologique. *Thèse de Doctorat en Sciences du Bois, Biologie Végétale et Forestière*. Université de Nancy I, 200 p + annexes.

**BERT G.D., 1993.** Impact of ecological factors, climatic stresses, and pollution on growth and health of silver fir (*Abies alba* Mill.) in the Jura mountains: an ecological and dendrochronogical study. *Acta Œcologica*, 14 (2), 229-246.

**BERT G.D. & BECKER M., 1990.** Vitalité actuelle et passée du sapin (Abies alba Mill.) dans le Jura. Etude dendroécologique. *Ann. Sci. For.*, 47 (5), 395-412.

**BIONDI F., 1992.** Four tree-ring chronologies for the Italian peninsula. *In* "Tree rings and Environment". Proceedings International dendrochronological symposium "Tree rings and environment", Ystad (Sweden), 3-9 September 1990, Lundqua report, 34, 41-44.

**BIONDI F., 1993.** Climatic signals in tree rings of *Fagus sylvatica* L. from the central Apennines (Italy). *Acta Œcologica*, 14 (1), 57-71.

**BOND E., 1991.** SQL Forms Designer's Reference, version 3.0. Part N°. 3304 - V3.0 0691.

**BONNEAU M., 1987.** Génèse et contenu du programme DEFORPA. *In* "Les recherches en France sur le dépérissement des forêts". *Programme DEFORPA, 1er rapport*, ENGREF, Nancy, 6-10.

**BOUCHON J., DHOTE J.F. & LANIER L., 1989a.** Note sur la réaction individuelle du hêtre à différentes intensités d'éclaircie et à différents âges. *Rev. For. Fr.*, 41, 39-50.

**BOUCHON J., DHOTE J.F. & LANIER L., 1989b.** Réaction individuelle de hêtres (*Fagus sylvatica* L.) d'âges divers à diverses intensités d'éclaircie. *Ann. Sci. For.*, 46, 251-259.

**BOURGENOT, 1965.** Manuel pratique d'aménagement. Ministère de l'Agriculture, Direction Générale des Eaux et Forêts (Ed.), 263p.

**BOUVAREL P., 1989.** Le gaz carbonique dans l'atmosphère : le rôle des forêts. *Rev. For. Fr.*, 41 (4), 301-307.

**BOWES G., 1993.** Facing the inevitable: plants and increasing atmospheric $CO_2$. *Annu. Rev. Plant. Physiol. Plant. Mol. Biol.*, 44, 309-332.

**BOX G.F. & JENKINS G.M., 1970.** Time series analysis: forecasting and control. *Hoden Day, San Francisco*, 575p.

**BRAUN-BLANQUET J., 1983.** Plant sociology. The study of plants communities ; (traduction de "Pflanzensoziologie", 1928, Springer, Berlin). *Koeltz Scientific Books.* Koenigstein, (Publié initialement par Mc Graw Hill Books Company,1932), 439p.

**BREDA N., 1994.** Analyse du fonctionnement hydrique des chênes sessile (*Quercus petraea*) et pédonculé (*Quercus robur*) en conditions naturelles ; effets des facteurs du milieu et de l'éclaircie. *Thèse sur publications, spécialité Biologie Forestière, Université Henri Poincaré de Nancy I*, 60 p + annexes.

**BREDA N., GRANIER A., BARATAUD F. & MOYNE C., 1995.** Soil water dynamics in an oak stand. Part I. Soil moisture, water potentials and water uptake by roots. *Plant and soil*, 172, 17-27.

**BRIFFA K.R., 1992.** Increasing productivity of 'natural growth' of conifers in Europe over the last century. *In* "Tree rings and Environment". Proceedings International dendrochronological symposium "Tree rings and environment", Ystad (Sweden), 3-9 September 1990, Lundqua report, 34, 64-71.

**BRIFFA K.R., JONES P.D., BARTHOLIN T.S., ECKSTEIN D., SCHWEINGRUBER F.H., KARLEN W., ZETTERBERG P & ERONEN M., 1992.** Fennoscandian summer from A.D. 500: temperature changes on short and long timescales. *Climate Dynamics*, 7, 111-119.

**BRIFFA K.R. & SCHWEINGRUBER F.H., 1992.** Recent dendroclimatic evidence of northern and central European summer temperatures. *Climate Since A.D. 1500* . R.S. Bradley & P.D. Jones (Eds.), Routledge Press, London, 366-392.

**BRIFFA K.R., WIGLEY T.L.M. & JONES P.D., 1987.** Towards an objective approach to standardisation. *In* "Methods of Dendrochronology - I", *L.Kairiukstis. Z. Bednarz. E. Feliksik (Eds)*, IIASA/Polish Academy of Sciences, Systems Research Institut, Warsaw, 69-86.

**CALVO HARO R., GONZALEZ ANDUJAR J.L. & PEREZ BOADA S., 1994.** Manual de modelos no lineales en los ambitos agrónomico, ganaderos y forestal. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (Ed.), Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, 110p.

**CEULEMANS R. &, MOUSSEAU M., 1994.** Effets of elevated atmospheric $CO_2$ on woody plants. *New phytol.*, 127 (3), 425-446.

**CHAMAYOU H., 1990.** Notions de bioclimatologie. *ENSA Montpellier*, doc. interne, 178p.

**CHEU D. & LINDEN B., 1990.** SQL Language Reference Manual, version 6.0. Part N°. 778-V6.0.

**CHOISNEL E., DE VILLELE O. & LACROZE F., 1992.** Une approche uniformisée du calcul de l'évapotranspiration potentielle pour l'ensemble des pays de la communauté européenne. Commission des Communautés Européenne, Centre Commun de Recherche, EUR 14223 FR, Luxembourg: Office des Publications Officielles des Communautés Européennes, 178p.

**COLSTON, 1989.** SQL Plus User's Guide and Reference, Version 3.0. Part N°. 5142-V3.0.

**COOK E.R., 1987.** The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-ring bulletin*, 47, 37-59.

**COOK E.R., 1990.** A conceptual linear aggregate model for tree-rings. *In* "Methods of dendrochronology", *E.R. Cook & L.A. Kairiukstis (Eds)*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London, 98-104.

**COOK E.R., BIRD T., PETERSON M., BARBETTI M., BUCKLEY B., D'ARRIGO R., FRANCEY R. & TANS P., 1991.** Climatic change in Tasmania inferred from a 1089-year tree ring chronology of Huon pine. *Science*, 253, 1266-1268.

**COOK E.R., BRIFFA K., SHIYATOV S. & MAZEPA V., 1990.** Tree-ring standardization and growth-trend estimation. *In* "Methods of dendrochronology", *E.R. Cook & L.A. Kairiukstis (Eds)*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London, 104-123.

**CROPPER J.P. & FRITTS H.C., 1981.** Tree-ring width chronologies from the North American artic. *Arctic & Alpine Research.*, 13, 245-260.

**D'ARRIGO R., JACOBY G.C. & FUNG I.Y., 1987.** Boreal forests and atmosphere-biosphere exchange of carbon dioxide. *Nature*, 329, 321-323.

**DAGNELIE P., 1975a.** Théorie et méthodes statistiques vol. 1. *Presses agronomiques de Gembloux.* (Belgique), 378p.

**DAGNELIE P., 1975b.** Théorie et méthodes statistiques vol. 2. *Presses agronomiques de Gembloux.* (Belgique), 463p.

**DAMBRINE E. & NOURISSON G., 1990.** Etablissement d'un réseau de collecte et d'analyse de la pluie et des pluviolessivats dans les Vosges. DEMENT, (Dépôts d'Eléments Minéraux sur les Ecosystèmes Naturels Terrestres). Résultats du cycle annuel 1989-1990. Rapport Scientifique du Ministère de l'Environnement, 36p.

**DANIELS R.F., BURKHART H.E. & CLASON T.R., 1986.** A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. *Can. J. For. Res.*, 16, 1230-1237.

**DAY M.W., BEY C.F. & RUDOLPH V.J., 1960.** Site index for planted Red pine by the 5-year growth intercept method. *J. Forestry*, 58, 198-202.

**DE MARTIN P., 1974.** Analyse des cernes ; dendrochronologie et dendroclimatologie. MASSON (Ed.) Paris VIe, 78p.

**DECOURT N., 1973.** Production primaire, production utile : méthodes d'évaluation, indices de productivité. *Ann. Sci. For.*, 30, 219-238.

**DELPECH R., DUME G. & GALMICHE P., 1985.** Typologie des stations forestières. Vocabulaire. IDF (Ed.), Paris, 243p.

**DELVAUX J., 1964.** A propos de l'éclaircie des hêtraies en forêt de Soignes : les aspects qualitatifs. Groenendaal-Hoeilaart : Stn. Rech. Eaux For., Travaux série B, n°30, 70p.

**DHOTE J.F., 1990.** Modèles de la dynamique des peuplements forestiers : articulation entre les niveaux de l'arbre et du peuplement. Application à la sylviculture des hêtraies. *Thèse de Doctorat de l'Université Claude-Bernard - Lyon I.* 240p + annexes.

**DION J., 1970.** Les forêts de la France du Nord-Est. *Revue géographique de l'Est*, 12 (3-4), 277p.

**DOUGLASS A.E., 1935.** Dating Pueblo Bonito and other ruins of the Southwest. *National Geographic Society Contributed Technical Papers.* Pueblo Bonito série 1, 74p.

**DREYFUS P., 1988.** Compétition et croissance dans de jeunes peuplements résineux. Aspects biolgiques, écologiques et sylvicoles. *Thèse de l'Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille III.* 286p + annexes.

**DUCREY M., 1981.** Etude bioclimatique d'une futaie feuillue (*Fagus sylvatica* L. et *Quercus sessiliflora* Salisb.) de l'Est de la France : III. Potentialités photosynthétiques des feuilles à différentes hauteurs dans le peuplement. *Ann. Sci. For.*, 38 (1), 71-86.

**DUHAMEL D., 1984.** Statut écologique du chêne pédonculé et du chêne sessile dans le quart Nord-Est de la France. *Mémoire de 3ème année.* ENGREF - INRA - NANCY, 58p.

**DUPOUEY J.L., DENIS J.B. & BECKER M., 1992.** A new method of standardization for examining long term trends in tree-ring chronologies. *In* "Tree rings and Environment". Proceedings International dendrochronological symposium "Tree rings and environment", Ystad (Sweden), 3-9 September 1990, Lundqua report, 34, 85-88.

**DUPRE S., THIEBAUT B. & TESSIER-DU-CROSS E., 1986.** Morphologie et architecture des jeunes hêtres (*Fagus sylvatica* L.), influence du milieu, variabilité génétique. *Ann. Sci. For.*, 43, 85-102.

**ECKSTEIN D., 1969.** Entwicklung und Anwendung der chronologies zur Alterbestimmung der Siedlung Haithabu. *Thèse de Doctorat, Université de Hambourg*, 113p.

**EL KOHEN A., ROUHIER H. & MOUSSEAU M., 1992.** Changes in dry weight and nitrogen partitioning induced by elevated $CO_2$ depend on soil nutrient availability in sweet chesnut (*Castanea sativa* Mill.). *Ann. Sci. For.*, 49, 1-8.

**EL KOHEN A., VENET L. & MOUSSEAU M., 1993.** Growth and photosynthesis of two deciduous forest tree species exposed to elevated carbon dioxide. *Functional Ecology*, 7, 480-486.

**ELLENBERG H., WEBER H.E., DULL R., WIRTH V., WERNER W. & PAULISSEN D., 1992.** Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. *Scripta geobot.*, 18, 258p.

**ERIKSSON H. & JOHANSSON U., 1993.** Yields of norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) in two consecutive rotations in Southwestern Sweden. *Plant and Soil*, 154 (2), 239-247.

**ERISMAN J.W., 1989.** Ammonia emissions in the Netherland in 1987 and 1988. Report N°228471006, RIVM.

**ERLANDSSON S., 1936.** Dendrochronological studies. Stockholms Hogskolas Geokronol Institute, Report 23, Uppsala, Sweden.

**FALCONE P, KELLER R., LE TACON F. & OSWALD H., 1986.** Facteurs influençant la forme des feuillus en plantation. *Rev. For. Fr.*, 38 (3), 315-323.

**FEDERER C.A., TRITTON L.M., HORNBECK J.W. & SMITH R.B., 1989.** Physiologically based dendroclimate models for effects of weather on red spruce basal-area growth. *Agricultural and Forest Meteorology.* 46 (1-2), 159-172.

**FEHLEN N., 1992.** Etude dendroécologique d'une plantation d'épicéa commun (*Picea abies* (L.) Karst.) adulte fertilisée dans les Ardennes. *D.E.A. de Biologie forestière, Université de Nancy I*, 25p. + annexes.

**FOSTER J.R. & LEBLANC D.C., 1993.** A physiological approach to dendroclimatic modeling of oak radial growth in the midwestern United States. *Can. J. For. Res.*, 23, 783-798.

**FRIEDLI H., LOTSCHER H., OESCHGER H., SIEGENTHALER U. & STAUFFER B., 1986.** Ice core record of $^{13}C/^{12}C$ ratio of armospheric $CO_2$ in the past two centuries. *Nature*, 324, 237-238.

**FRITTS H. C., 1971.** Dendroclimatology and dendroecology. *Quaternary Research*, 1 (4), 419-449.

**FRITTS H.C., 1974.** Relationships of rings widths in arid-site conifers to variations in monthly temperature and precipitation. *Ecological Monographs*, 44 (4), 411-440.

**FRITTS H.C., 1976.** Tree rings and climate. *Academic press* , vol. 1 (245p) et vol. 2 (567p).

**FRITTS H.C., 1987.** The encyclopedia of climatology. *Encyclopedia of earth science. vol XI.* Eds : Oliver J.E. & Fairbridge R.W. Van Nostran Reinhold Company, New-York. 858-875.

**GAMMON R. H., SUNDQUIST E.T. & FRASER P.J., 1985.** History of carbon dioxide in the atmosphere. *In* "Atmospheric carbon dioxide and the global carbon cycle", J.R. TRABALKA (Ed.), United States Department of Energy Report DOE/ER-0239, 27-62.

**GANDOLFO C. & TESSIER L., 1994.** Analyse dendroécologique sur des sapins (*Abies alba* Mill) et des épicea (*Picea abies* (L) Karst) de différentes classes de défolation dans la forêt de Vigo di Ton (Trento, Italie). *Ann. Sci. For.*, 51, 391-406.

**GATES D.M., 1990.** Climate change and forest. *Tree Physiology*, 7, 1-5.

**GILES D.G., BLACK T.A. & SPITTLEHOUSE D.L., 1985.** Determination of growing season soil water deficits on a forested slope using water balance analysis. *Can. J. For. Res.*, 15, 107-114.

**GODARD A., 1951.** Contribution à l'étude du climat lorrain. *Revue de la géographie de Lyon*, 3, 297-310.

**GRANIER A., 1987.** Evaluation of transpiration in a Douglass-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiol.*, 3, 309-320.

**GRAUMLICH L.J., 1991.** Subalpine tree growth, climate, and increasing $CO_2$ : an assessment of recent growth trends. *Ecology*, 72 (1), 1-11.

**GRAUMLICH L.J. & BRUBAKER L.B., 1987.** Increasing primary net productivity in Washington (USA) forests during the last 100 years. In : Jacoby & Hornbeck (Eds), Proc. Int. Symp. on Ecologic Aspects of Tree-Rings analysis, Springfield : National Technical Information Service, United States Department of Commerce, 59-69.

**GRAUMLICH L.J., BRUBAKER L.B. & GRIER C.C., 1989.** Long-term trends in forest net primary productivity : Cascade Mountains, Washington. *Ecology*, 70, 405-410.

**GRAYBILL D.A., 1982.** Chronology development and analysis. In Climate from tree rings, Hughes M.K. *et al.* (Eds), Cambridge University Press,

**GRAYBILL D.A., 1987.** A network of high-elevation conifers in the western US for detection of tree-ring growth response to increasing atmospheric carbon dioxide. In : Jacoby & Hornbeck (Eds.), Proc. Int. Symp. on Ecologic Aspects of Tree-Rings analysis, Springfield : National Technical Information Service, United States Department of Commerce, 463-473.

**GRAYBILL D.A., 1993.** Detecting the aerial fertilization effect of atmospheric CO2 enrichment in tree-ring chronologies. *Global biogeochemical cycles.* 7 (1), 81-95.

**GRISSINO-MAYER H.D. & BUTLER D.R., 1993.** Effects of climate on growth of shortleaf pine (Pinus echinata Mill.) in Northern Georgia: a dendroclimatic study. *Southeastern Geographer,* 33 (1), 65-81.

**GRISSINO-MAYER H.D., ROSENBERGER M.S & BUTLER D.R., 1989.** Climatic response in tree rings of loblolly pine from North Georgia. *Physical Geography,* 10 (1), 32-43.

**GUIBAL F., 1991.** La dendrochronologie : méthode et potentialité. *ARCHIPAL.* Archéologie et Histoire. Pays d'Apt - Lubéron. N°30 - décembre 1991, 85-103.

**GUIBAL F., LAMBERT G. & LAVIER C., 1991.** Application de trois tests de synchronisation à trois types de données. *Dendrochronologia,* 9, 193-206.

**GUINIER P., 1947.** Technique forestière. La maison rustique, Paris, 316p.

**GUIOT J, 1984.** Deux méthodes d'utilisation de l'épaisseur des cernes ligneux pour la reconstruction des paramètres climatiques anciens, exemple de leur application dans le domaine alpin. *Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleoecol.,* 45, 347-368.

**GUIOT J, 1986.** ARMA techniques for modelling tree-ring response to climate and for reconstructing variations of paleoclimates. *Ecol Model.,* 33, 149-171.

**GUIOT J., TESSIER L. & SERRE-BACHET F., 1982.** Application de la modélisation ARMA en dendroclimatologie. *C. R. Acad. Sc. Paris,* 294, série 3, 133-136.

**GUNDERSEN P., 1992.** Mass balance approaches for establishing critical loads for nitrogen in terrestrial ecosystems. *In* "Critical loads for nitrogen", report from a workshop held at Lökeberg, Sweden, *P. Grennfelt & Thörnelöf (Eds).Nord.* 41, 55-109.

**GURY M., 1972.** Carte pédologique du plateau de Haye. *Centre National de la Recherche Scientifique.* Université Nancy I, 46p. + carte.

**GUTIERREZ E., 1988.** Dendroecological study of *Fagus sylvatica* L. in the Montseny mountains (Spain). *Acta Œcologica/Œcol. Plant.,* 9 (3), 301-309.

**GUTIERREZ E., 1991.** Climate tree-growth relationships for Pinus uncinata Ram. in the Spanish pre-Pyrenees. *Acta Œcologica,* 12 (2) 213-225.

**HARI P. & AROVAARA H., 1984.** Trend like changes in environmental factors and tree ring analyses. In : Perttu K. (Ed). Ecology & Management of Forest Biomass Production System. Dept. Ecol. & Environ. Res., Swed. Univ. Agric. Sci. Rep., 15, 421-427.

**HARI P. & AROVAARA H., 1988.** Detecting CO2 induced enhancement in the radial increment of trees. Evidence from northern timber line. Scandinavian. *J. of Forest Research.,* 3 (1), 67-74.

**HARI P., AROVAARA H., RAUNEMAA T. & HAUTOJARVI A., 1984.** Forest growth and the effects of energy production : a method for detecting trends in the growth potential of trees. *Canadian Journal of Forest Research,* 14, 437-440.

**HARI P., RAUNEMAA T. & HAUTOJARVI A., 1986.** The effects on forest growth of air pollution from energy production. *Atmospheric environment,* 20 (1), 129-137.

**HARTIG R., 1888.** Das holz der rothbuche. Verlag von J. Springer, Berlin, 238p.

HARTMANN P., SCHNEIDER O., PETTER D. & ZIMMERMANN D., 1992. L'accroissement en diamètre des arbres. Evolution des connaissances. Influence du climat, de la sylviculture et de la pollution. *Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat.*, 81, 131-151.

HEIZER R.F., 1956. The first dendrochronologist. *Amer. antiq.*, 22, 186-188.

HENRY E., 1894. Influence de la sécheresse de l'année 1893 sur la végétation forestière en Lorraine. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, juillet-décembre (2), 1025-1027.

HENRY E., 1895. La végétation forestière en Lorraine pendant l'année 1893. *Revue Générale de Botanique*, 7, 49-70.

HENRY E., 1898. La végétation forestière pendant l'année 1893 (nouvelles observations). *Revue Générale de Botanique*, 10, 142-160.

HILLY J. & HAGUENAUER B., 1979. Guides géologiques régionnaux. Lorraine, Champagne. MASSON (Ed.), 215p.

HUBERT F., 1984. Influence du froid, de la lumière et des stress hydriques sur la formation du bois de hêtre. *Ann. Sci. For.*, 41 (3), 323-334.

HUFFEL G., 1927. Les méthodes de l'aménagement forestier en France. *Annales de l'Ecole Nationale de Eaux et Forêts*, Nancy, T. 1, fasc. 2, 229p.

HUGHES M.K., KELLY P.M., PILCHER J.R. & LAMARCHE Jr.C. (Eds.), 1982. Climate from tree rings. *CambridgeUniversity Press.*

IFN, 1980. Résultats du deuxième Inventaire Forestier National. Département de la Meurthe-et-Moselle - Tome I. *Ministère de l'agriculture. Direction des Forêts.* Inventaire Forestier National, 115p.

IFN, 1980. Résultats du deuxième Inventaire Forestier National. Département de la Meuse - Tome I. *Ministère de l'agriculture. Direction des Forêts.* Inventaire Forestier National, 109p.

IFN, 1981. Résultats du deuxième Inventaire Forestier National. Département des Vosges - Tome I. *Ministère de l'agriculture. Direction des Forêts.* Inventaire Forestier National, 115p.

IFN, 1982. Résultats du deuxième Inventaire Forestier National. Département de la Moselle - Tome I. *Ministère de l'agriculture. Direction des Forêts.* Inventaire Forestier National, 117p.

INNES J.L., 1991. High-altitude and high-latitude tree growth in relation to past, present and future global climate changes. *The Holocene*, 1,2, 168-173.

JACAMON M., 1983. Arbres et forêts de Lorraine. *Ed. S.A.E.P., Ingersheim. Colmar.* 140p.

JORDAN D.N. & LOCKABY B.G., 1990. Time series modelling of relationships between climate and long-term radial growth of loblolly pine. *Can. J. For. Res.*, 20, 738-742.

JOZSA L.A. & POWELL J.M., 1987. Some climatic aspects of biomass productivity of white spruce stem wood. *Canadian Journal of Forest Research*, 17, 1075-1079.

KAUPPI P., MIELIKAINEN K. & KUUELA K., 1992. Biomass and carbon budget of European forests, 1971 to 1990. *Science* , 256, 70-74.

**KEELING C.D. & WHORF T.P., 1994.** Atmospheric $CO_2$ records from sites in the SIO air sampling network. *In* T.A.BODEN, D.P. KAISER, R.J. SEPANSKI & F.W. STOSS (Eds.), Trend's 93: a compendium of data on global change. ORNL/CDIAC-65. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak-Ridge National Laboratory, Oak-Ridge, Tenn., U.S.A., 16-26.

**KELLER W., 1992.** Bonität in Fichten-Folgebeständen ehemaliger Fichten-Verssuchsflächen der WSL. DUFFA, Sektion Ertragskunde, Tagungsber, 123-129.

**KELLY P.M., MUNRO M.A.R., HUGHES M.K. & GOODESS C.M., 1989.** Climate and signature years in west European oaks. *Nature*, 340, 57-60.

**KENK G. & FISCHER H., 1988.** Evidence from nitrogen fertilization in the forests of Germany. *Environmental Pollution*, 54, 199-218.

**KENK G., ROMMEL W.D. & SPIECKER H., 1989.** Weiter Ergebnisse zum aktuellen und früheren Wachstumsverhalten von Fichten. *KfK-PEF*, 50 (1), 117-126.

**KENK G., SPIECKER H. & DIENER G., 1991.** Referenzdaten zum Waldwachstum. *KfK - PEF Forschungsbericht*, 82, 59p.

**KESSLER J. & CHAMBRAUD A., 1990.** Météo de la France. J.C.LATTES (Ed.), 391p.

**KIENAST F. & LUXMOORE R.J., 1988.** Tree-ring analysis and conifer growth responses to increased atmospheric $CO_2$ levels. *Œcologia*, 76, 487-495.

**KUIVINEN K.C. & LAWSON M.P., 1982.** Dendroclimatic analysis of birch in South Greenland. *Arctic & Alpine Research*, 14 (3), 243-250.

**LAMARCHE V.C., GRAYBILL D.A., FRITTS H.C. & ROSE M.R., 1984.** Increasing atmospheric carbon dioxide : tree-ring evidence for growth enhancement in natural vegetation. *Science*, 225, 1019-1021.

**LAMBERT G., LAVIER C., PERRIER P. & VINCENOT S., 1988.** Pratique de la dendrochronologie. *Histoire & Mesure*, 3 (3), 279-308.

**LAMBERT G.N. & MAURICE B., 1992.** Les veines du temps ; lecture de bois en Bourgogne. *Ouvrage collectif.* Musée Rolin (Ed.), Autun, 455p.

**LANDMANN G., 1991.** Les émissions d'ammoniac : leurs origines et leurs effets sur les écosystèmes forestiers, annalyse sommaire des données récentes de la littérature. *Rapport du programme DEFORPA*. INRA - CRF de Nancy, 51p + annexes.

**LANIER L., 1981a.** Sylviculture du hêtre : coupes de mise en lumière dans les régénérations naturelles. *In* "Le hêtre", Tessier-du-Cros E., Le Tacon F., Nepveu G., Pardé J., Perrin R., Timbal J., INRA (Ed.), Paris, 239-241.

**LANIER L., 1981b.** Les dégagements et les nettoiements en futaie feuillue. *Rev. For. Fr.*, 33 (n° spécial), 19-40.

**LAURENT D., 1992.** Mise au point d'une base de données ORACLE en dendroécologie. *Mémoire de stage D.E.S.S. Informatique Double Compétence*, Université de Nancy I, Institut Supérieur d'Informatique et Automatique de Lorraine. 66p. + annexes.

**LE BLANC D.C., 1993.** Temporal and spatial variation of oak growth-climate relationships along a pollution gradient in the midwestern United States. *Can. J. For. Res.*, 23, 772-782.

**LE GOFF N., 1974.** La croissance du hêtre en France. Utilisation possible de tables de production étrangères pour suivre l'évolution des peuplements. INRA - Station de sylviculture et de production (Doc. int. 74/3), 45p.

**LE GOFF N., 1981.** Tables de production. *In* "Le hêtre", Tessier-du-Cros E., Le Tacon F., Nepveu G., Pardé J., Perrin R., Timbal J., INRA (Ed.), Paris, 326-338.

**LE GOFF N., 1984.** Indice de productivité des taillis-sous-futaies de chêne dans la région centre. *Ann. Sci. For.*, 41 (1), 1-34.

**LE TACON F. & OSWALD H., 1977.** Influence de la fertilisation minérale sur la fructification du hêtre (*Fagus sylvatica* L.). *Ann. Sci. For.*, 34 (2), 89-109.

**LE TACON F., 1981.** Les éléments dans les feuilles. Principales valeurs de diagnostic. *In* "Le hêtre", Tessier-du-Cros E., Le Tacon F., Nepveu G., Pardé J., Perrin R., Timbal J., INRA (Ed.), Paris, 185-189.

**LE TACON F., BECKER M. & TIMBAL J., 1989.** Facteurs nutritionnels du hêtre sur les plateaux calcaires de Lorraine. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 75 (5), 11-28.

**LE TACON F. & NYS C., 1970.** Les sols du massif de Haye et leur influence sur le comportement des réserves de hêtre en taillis-sous-futaie. *Rev. For. Fr.*, 22 (5), 545-552.

**LE TACON F. & TOUTAIN F., 1973.** Variations saisonnières et stationnelles de la teneur en éléments minéraux des feuilles de hêtre (*Fagus sylvatica*) dans l'est de la France. *Ann. Sci. For.*, 30 (1), 1-29.

**LEBOURGEOIS F., BECKER M. & BONNEAU M., 1993.** Influence d'une fertilisation minérale sur la croissance radiale de sapinières dépérissantes dans les Vosges. *Rev. for. fr.*, 45 (6), 639-650.

**LEBOURGEOIS, 1995.** Etude dendroécologique et écophysiologique du pin laricio de corse (*Pinus nigra* Arnold ssp. *laricio* Poiret var. *corsicana*) en région Pays de la Loire. *Thèse de Doctorat en Sciences de la vie, Université de Paris XI*, 209p. + annexes.

**LEMEE G., 1978.** La hêtraie naturelle de Fontainebleau. In "Problèmes d'écologie : écosystèmes terrestres.", Lamotte M. & Bourlière F., Masson (Ed.), 75-128.

**LEMOINE P., 1993.** Etude dendroécologique du Pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) sur le dispositif de fertilisation de Mimizan (Landes). *D.E.A. de Biologie Forestière, Université de Nancy I*, 27p. + annexes.

**LEPOUTRE B. & TEISSIER-DU-CROSS E., 1979.** Croissance et nutrition de semis d'un an de hêtre (*Fagus sylvatica* L.) de différentes provenances, élevés sur substratum naturel acide et sur même substratum calcarifié. *Ann. Sci. For.*, 36 (3), 239-262.

**LEVY G., 1988.** Appréciation de la fertilité du sol. *Rev. For. Fr.*, 40 (n° spécial), 11-17.

**LIU C. J., 1986.** Rectifying radii on off center increment cores. *Forest Science*, 32 (4), 1058-1061.

**LORENTZ B. & PARADE A., 1883.** Cours élémentaire de culture des bois. (Sixième édition du Cours de culture de 1837), O.DOIN (Ed.), Paris, 720p.

**LÖVBLAD G. & ERISMAN J.W., 1992.** Deposition of nitrogen in Europe. *In* "Critical loads for nitrogen", report from a workshop held at Lökeberg, Sweden, *P. Grennfelt & Thörnelöf (Eds).Nord.* 41, 239-286.

LUCIER A.A., WARMICK W.L. & HYINK D.M., 1989. Possible bias in tree-ring tme series due to mortality. *Journal of Forestry*, 31-32.

MAKOWKA I., RIEMER T., STICKAN W. & WORBES M., 1992. Dendroclimatological studies on beech-trees (*Fagus sylvatica* L.) and the changing influence of climate on radial growth. *In* "Tree rings and Environment". Proceedings International dendrochronological symposium "Tree rings and environment", Ystad (Sweden), 3-9 September 1990, Lundqua report, 34, 217-221.

MATHEY A., 1929. Traité pratique et théorique des taillis. *Le mans : imprimerie M. Vilaire*. 353p.

MATHIEU A., 1897. Flore forestière. Paris : Baillières, 705p.

McLAUGHLIN S.B., BLASING T.J., MANN L.K. & DUVICK D.N., 1983. Effects of acid rain and gaseous pollutants on forest productivity: a regional scale approach. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 33 (11), 1042-1049.

MITCHELL V.L., 1967. An investigation of certain aspects of tree growth rates in relation to climate in the central Canadian boreal forest. *Univ. Wisconsin. Dept. Meteorol. Tech. Rep.* 33, Task NR 387-022, ONR Contract 1202 (07), NSF GP-5572X, Madison.

MORAN R. & DIMMICK S., 1989. SQL Loader User's Guide, version 1.0. Part N° - V1.0.

MULLER N., 1993. Etude dendrométrique et anatomique de la croissance radiale intra-annuelle du hêtre (*Fagus sylvatica* L.). Rapport de DAA en Sciences et Génie de l'Environnement et de DEA en Sciences Agronomiques, 33p + annexes.

NEFTEL A., FRIEDLI H., MOOR E., LOTSCHER H., OESCHGER H., SIEGENTHALER U. & STAUFFER B., 1994. Historical $CO_2$ record from the Siple Station ice core. *In* T.A.BODEN, D.P. KAISER, R.J. SEPANSKI & F.W. STOSS (Eds.), Trend's 93: a compendium of data on global change. ORNL/CDIAC-65. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak-Ridge National Laboratory, Oak-Ridge, Tenn., U.S.A., 11-14.

NEFTEL A., MOOR E., OESCHGER H. & STAUFFER B., 1985. Evidence from polar ice cores for the increase in atmospheric $CO_2$ in the past two centuries. *Nature*, 315, 45-47.

NEPVEU G., 1981. Propriétés du bois de hêtre. *In* "Le hêtre", Tessier-du-Cros E., Le Tacon F., Nepveu G., Pardé J., Perrin R., Timbal J., INRA (Ed.), Paris, 377-387.

NIEMINEN T.M., 1988. Etude dendroécologique du chêne (pédonculé et sessile) et du hêtre dans une forêt de la plaine lorraine (Forêt domaniale d'Amance). *D.E.A. Biologie végétale et forestière, Université de Nancy I*, 44p + annexes.

ORDING A., 1941. Årringanalyser på gran og furu. (Growth-ring analyses of spruce and pine). *Medd. norsk. Shog. fors. Ves.*, 7 (25), 101-354.

OSWALD H., 1981. Régénération naturelle du hêtre : importance et périodicité des faînées ; influence des facteurs climatiques et sylvicoles. *In* "Le hêtre", Tessier-du-Cros E., Le Tacon F., Nepveu G., Pardé J., Perrin R., Timbal J., INRA (Ed.), Paris, 198-205.

OVERDIECK D., 1993. Elevated $CO_2$ and the mineral content of herbaceous and woody plants. *Vegetatio* 104/105, 403-411.

PAOLETTI E. & GELLINI R., 1993. Stomatal density variation in beech and holm oak leaves collected over the last 200 years. *Acta Œcologica*, 14 (2), 173-178.

**PARDE J., 1981.** Sylviculture du hêtre : historique et objectifs. *In* "Le hêtre", Tessier-du-Cros E., Le Tacon F., Nepveu G., Pardé J., Perrin R., Timbal J., INRA (Ed.), Paris, 195-198.

**PARDE J. & BOUCHON J., 1988.** Dendrométrie (2ème édition). ENGREF (Ed.), Nancy, 328p.

**PARDE J. & VENET J., 1981.** Conduite des peuplements de hêtres : traitement en futaie régulière. *In* "Le hêtre", Tessier-du-Cros E., Le Tacon F., Nepveu G., Pardé J., Perrin R., Timbal J., INRA (Ed.), Paris, 272-293.

**PARDE L., 1943.** Les feuillus. La Maison Rustique : Paris VI, 392p.

**PERRIN H., 1952.** Sylviculture : I - bases scientifiques de la sylviculture Ecole Nationale de Eaux et Forêts, Nancy, 318p.

**PERRIN H., 1954.** Sylviculture : II - le traitement des forêts. Ecole Nationale de Eaux et Forêts, Nancy, 411p.

**PERRIN R., 1974.** Le chancre du hêtre. *Eur. J. For. Pathol.*, 4 (4), 251-252.

**PERRIN R., 1975.** Le chancre du hêtre : localisation des sources d'inoculum et possibilités d'intervention sylvicole. *Rev. For. Fr.*, 27 (6), 431-435.

**PERRIN R., 1977.** Le dépérissement du hêtre. *Rev. For. Fr.*, 29 (2), 101-126.

**PERRIN R., 1981.** Dommages causés au hêtre et aux hêtraies : rameaux, branches, tronc. *In* "Le hêtre", Tessier-du-Cros E., Le Tacon F., Nepveu G., Pardé J., Perrin R., Timbal J., INRA (Ed.), Paris, 474-493.

**PERRIN R. & VERNIER F. 1979.** Le chancre du hêtre. Influence des conditions stationnelles sur la gravité de la maladie. *Rev. For. Fr.*, 24 (4), 286-297.

**PETERSON D.L., ARBAUGH M.J., ROBINSON L.J. & DERDERIAN B.R., 1990.** Growth trends of whitebark pine and lodgepole pine in a subalpine Sierra Nevada forest, California, USA. *Artic and Alpine Research*, 22 (3), 233-243.

**PICARD J.F., 1995.** Evolution de la croissance radiale du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) dans les Vosges. Premiers résultats sur le versant Lorrain. *Ann. Sci. For.*, 52, 11-21.

**PILCHER J.R., 1990.** Sample preparation, cross-dating and measurement. Chaper 2.3 *in* "Methods of dendrochronology". *E.R. COOK & L.A. KAIRIUKSTIS (Eds).* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London, 40-51.

**PLAISANCE F., 1979.** La forêt Française. Denoël, Paris, 373p.

**PLAISANCE G., 1992.** Panorama des protoindustries en France. *In* "Protoindustries et histoire des forêts". *Les cahiers de l'ISARD, groupement de recherche ISARD 881 - CNRS.* 27-44.

**RAMEAU J.C., MANSION D. & DUME D., 1989.** Flore Forestière Française. Tome 1, plaines et collines. IDF, ENGREF (Eds.), 1785p.

**RIEDACKER A., 1976.** Rythmes de croissance et de régénération des racines des végétaux ligneux. *Ann. Sci. For.*, 33, 109-138.

**RIEDACKER A., 1981.** Physiologie de la croissance du hêtre ; croissance aérienne et souterraine. *In* "Le hêtre", Tessier-du-Cros E., Le Tacon F., Nepveu G., Pardé J., Perrin R., Timbal J., INRA (Ed.), Paris, 160-169.

ROBERTSON E.O., JOZSA L.A. & SPITTLEHOUSE D.L., 1990. Estimating douglas-fir wood production from soil and climate data. *Can. J. For. Res.*, 20, 357-364.

SAS Institute Inc., 1988. SAS/STAT® User's Guide. *Release 6.03 Edition*. Cary, NC: SAS Institut Inc., 1028p.

SAS Institute Inc., 1989. SAS/STAT® Guide to the SQL Procedure: Usage and Reference, Version 6. Cary, NC: SAS Institut Inc., 210p.

SCHOBER R., 1972. Die Rotbuche 1971. Frankfurt : J.P. Sauerländer's Verlag, 333p.

SCHULZE E.D., 1981. Carbon gain and wood production in trees of deciduous beech (*Fagus sylvatica*) and trees of evergreen spruce (*Picea excelsa*). Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien, 142, 105-123.

SCHWEINGRUBER F.H., 1988. Tree rings. Basics and applications of dendrochronology. *D. Reidel Publishing Company*. 276p.

SCHWEINGRUBER F.H., FRITTS H.C., BRACKER O.U., DREW L.G. & SCHAR E., 1978. The X-ray technique as applied to dendroclimatological. *Tree Ring Bull.*, 38, 61-91.

SERRE F., 1976. Les rapports de la croissance et du climat chez le Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.). I. Méthodes utilisées. L'activité cambiale et le climat. *Œcol. Plant.*, 11 (2), 143-171.

SERRE F., 1978. The dendroclimatological value of the european larch (*Larix decidua* Mill.) in the French Maritime Alps. Tree-ring bulletin, 38, 25-34.

SERRE F., 1980. De l'utilité du relevé des caractéristiques des cernes ou "skeleton plot" en dendrochronologie. *Revue d'Archéométrie*. XX Symposium d'Archéométrie, Paris, 26-29 mars 1980, 21-24.

SERRE-BACHET F., 1982. Analyse dendroclimatologique comparée de quatre espèces de pins et du chêne pubescent dans la région de la Gardiole près Rians (Var, France). *Ecologia Mediterranea*, 8 (3), 167-183.

SERRE-BACHET F. & TESSIER L., 1985. Dendroclimatologie, dendrochronologie et mélèze. Société Hydrotechnique de France, Section de Glaciologie, réunion des 11 et 12 mars 1985, 12p.

SPIECKER H., MIELIKAINEN K., KOHL M. & UNTHEIM H., 1994. Growth trends of European Forest: has site productivity changed ? *European Forest Institute*, Working paper N°4, Joensuu, Finland, 66p.

STUDHALTER R.A., 1955. Tree growth: I - some historical chapters. *Botanical Review*, 21, 1-72.

STUDHALTER R.A., GLOCK W.S. & AGERTER S.R., 1963. Tree growth ; some historical chapters in the study of diameter growth. *The Botanical Review*, 29, 245-365.

SWETNAM T.W., ARES THOMPSON M. & KENNEDY SUTHERLAND E., 1985. Spruce budworms handbook. Using dendrochronology to measure radial growth of defoliated trees. *CANUSA program (1977). U.S. Department of Agriculture. Forest service. Cooperative State Research Service. Agriculture Handbook, N°639,* 39p.

TESKEY R.O. & HINCKLEY T.M., 1981. Influence of temperature and water potential on root growth of white oak. *Physiol. Plant.*, 52, 363-369.

**TESSIER L., 1986**. Approche dendroclimatologique de l'écologie de *Pinus silvestris* L. et *Quercus pubescens* Willd. dans le Sud-Est de la France. *Acta Œcologica. Œcol. Plant.*, 7 (4), 339-355.

**TESSIER L., 1989**. Spatio-temporal analysis of climate-tree ring relationships. *New Phytol.*, 111, 517-529.

**TESSIER-DU-CROSS E., 1981**. Principaux résultats en matière d'amélioration du hêtre. *In* "Le hêtre", Tessier-du-Cros E., Le Tacon F., Nepveu G., Pardé J., Perrin R., Timbal J., INRA (Ed.), Paris, 456-466.

**THIEBAUT B. & VERNET Ph., 1981**. Reproduction du hêtre ; biologie de la reproduction sexuée. *In* "Le hêtre", Tessier-du-Cros E., Le Tacon F., Nepveu G., Pardé J., Perrin R., Timbal J., INRA (Ed.), Paris, 198-205.

**THIEBAUT B., COMPS B., RUCART M, SOROSTE S. & NTSAME OKWO C., 1992a**. Développement des plants de hêtre (*Fagus sylvatica* L.) dans une régénération naturelle, équienne, âgée de 18 ans. *Ann. Sci. For.*, 49, 111-131.

**THIEBAUT B., COMPS B., RUCART M, SOROSTE S. & NTSAME OKWO C., 1992b**. Reclassement des plants de hêtre (*Fagus sylvatica* L.) au cours de leur développement dans une régénération naturelle, équienne, âgée de 18 ans. *Ann. Sci. For.*, 49, 133-147.

**THIMONIER A., 1994**. Changements de la végétation et des sols en forêt tempérée européenne au cours de la période 1970-1990. Rôle possible des apports atmosphériques. *Thèse de l'Université Paris XI - Orsay en Sciences de la Vie*, 177p.

**THIMONIER A., DUPOUEY J.L., BOST F. & BECKER M., 1994**. Simultaneous eutrophication and acidification of a forest ecosystem in North-East France. *New Phytol.*, 126, 533-539.

**THORNTHWAITE C.W., 1948**. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, 38, 55-94.

**TIMBAL J., 1974**. Principaux caractères écologiques et floristiques des hêtraies du Nord-Est de la France. *Ann. Sci. For.*, 31 (1), 27-45.

**TIMBAL J., 1979**. Carte de la végétation de la France au 1/200 000e. Notice détaillée des feuilles lorraine (n°16 : Metz et n° 27 : Nancy) Ed. Centre National de la Recherche Scientifique, Service de la carte de la végétation, Paris, 118p.

**TIMBAL J., 1980**. Carte de la végétation de la France au 1/200 000e, feuille N°16 : Metz. Ed. Centre National de la Recherche Scientifique, Service de la carte de la végétation, Paris,

**TOUTAIN F. & DUCHAUFOUR Ph., 1970**. Etude comparée des bilans biologiques de certains sols de hêtraie. *Ann. Sci. For.*, 27 (1), 39-61.

**TUTIN T.G., HEYWOOD V.H., BURGES N.A., MOORE D.M., VALENTINE D.H., WALTERS S.M. & WEBBD.A., 1966-1976**. Flora Europaea. *Cambridge Univ. Press.*, 5 volumes.

**ULRICH E. & WILLIOT B., 1993**. Les dépots atmosphériques en France de 1850 à 1990. INRA - ONF - ADEME, 154p.

**UNG C.H., 1989**. Forme des tiges d'érable à sucre et de hêtre à grandes feuilles dans une jeune futaie selon leur position sociale et leur âge. *Ann. Sci. For.*, 46 (3), 261-271.

**VENET J., 1974.** Identification et classement des bois Français. ENGREF, Nancy, 310p.

**WAGENER K.A., DE LUCA REBELLO A. & HOLLSTEIN E., 1983.** Increasing productivity in recent european oak trees. *Radiation & Environmental Biophysics*, 22, 303-310.

**WATSON R.T., RODHE H., OESCHGER H. & SIEGENTHALER U., 1990.** Greenhouse gases and aerosols. *In* "Climate change", Hougton, Jenkings & Ephraums (Eds.). Cambridge University Press, 1-40.

**WIGLEY T.L.M., JONES P.D. & BRIFFA K.R., 1987.** Detecting the effects of acidic deposition and CO2 fertilization on tree growth. *In* "Methods of Dendrochtonology - I". *L.Kairiukstis. Z. Bednarz. E. Feliksik (Eds).* IIASA/Polish Academy of Sciences. Systems Research Institut, Warsaw, 239-253.

**WOODWARD F.I., 1987.** Stomatal numbers are sensitive to increase in CO2 from pre-industrial levels. *Nature*, 127, 617-618.

**ZARNOVICAN R. & TRENCIA J., 1987.** Croissance de l'érable à sucre et du hêtre à grandes feuilles selon la position sociale dans le peuplement. *Ann. Sci. For.*, 44 (2), 211-226.

# *ANNEXES*

# LA FORET LORRAINE EN CHIFFRES

Les données relatives aux tableaux ont été empruntées aux Résultats des Inventaires Forestiers Nationaux concernant les départements :

- Meuse (IFN, 1980) ;
- Vosges (IFN, 1981) ;
- Moselle (IFN, 1982) ;
- Meurthe-et-Moselle (IFN, 1991);

## I - Gestion sylvicole et propriété par département

| | | Surfaces (ha) | | | Pourcentage (%) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ensemble des forêts | forêts soumises | forêts privées | ensemble des forêts | forêts soumises | forêts privées |
| Meurthe-et-Moselle | surface boisée totale | 160259 | 109555 | 50704 | 100,00 | 68,36 | 31,64 |
| | futaie | 81286 | 48417 | 32869 | 50,72 | 59,56 | 40,44 |
| | taillis-sous-futaie | 73942 | 60528 | 13414 | 46,14 | 81,86 | 18,14 |
| | taillis simple | 5031 | 610 | 4421 | 3,14 | 12,12 | 87,88 |
| Meuse | surface boisée totale | 226050 | 150260 | 75790 | 100,00 | 66,47 | 33,53 |
| | futaie | 78850 | 46780 | 32070 | 34,88 | 59,33 | 40,67 |
| | taillis-sous-futaie | 138050 | 100980 | 37070 | 61,07 | 73,15 | 26,85 |
| | taillis simple | 9150 | 2500 | 6650 | 4,05 | 27,32 | 72,68 |
| Moselle | surface boisée totale | 167170 | 120990 | 46180 | 100,00 | 72,38 | 27,62 |
| | futaie | 114130 | 88080 | 26050 | 68,27 | 77,18 | 22,82 |
| | taillis-sous-futaie | 47010 | 31460 | 15550 | 28,12 | 66,92 | 33,08 |
| | taillis simple | 6030 | 1450 | 4580 | 3,61 | 24,05 | 75,95 |
| Vosges | surface boisée totale | 279940 | 180700 | 99240 | 100,00 | 64,55 | 35,45 |
| | futaie | 209760 | 135710 | 74050 | 74,93 | 64,70 | 35,30 |
| | taillis-sous-futaie | 60460 | 44720 | 15740 | 21,60 | 73,97 | 26,03 |
| | taillis simple | 9720 | 270 | 9450 | 3,47 | 2,78 | 97,22 |
| Lorraine | surface boisée totale | 833419 | 561505 | 271914 | 100,00 | 67,37 | 32,63 |
| | futaie | 484026 | 318987 | 165039 | 58,08 | 65,90 | 34,10 |
| | taillis-sous-futaie | 319462 | 237688 | 81774 | 38,33 | 74,40 | 25,60 |
| | taillis simple | 29931 | 4830 | 25101 | 3,59 | 16,14 | 83,86 |

## II - Gestion sylvicole et proriété par régions forestières

| | futaie (%) | TSF (%) | taillis (%) | futaie (%) | | taillis-sous futaie (%) | | taillis simple (%) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | soumise | privée | soumis | privé | soumis | privé |
| Argonne | 49,53 | 47,45 | 3,02 | 90,26 | 9,74 | 75,10 | 24,90 | 50,75 | 49,25 |
| Champagne humide | 21,71 | 75,24 | 3,05 | 22,49 | 77,51 | 46,93 | 53,07 | 0,00 | 100,00 |
| Barrois | 33,80 | 61,96 | 4,24 | 39,43 | 60,57 | 58,95 | 41,05 | 3,15 | 96,85 |
| Côtes de Meuse | 35,32 | 60,30 | 4,38 | 62,46 | 37,54 | 80,21 | 19,79 | 35,14 | 64,86 |
| Pays-Haut | 25,41 | 73,24 | 1,35 | 58,68 | 41,32 | 86,34 | 13,66 | 16,98 | 83,02 |
| Haye | 46,66 | 48,44 | 4,90 | 65,79 | 34,21 | 73,55 | 26,45 | 25,71 | 74,29 |
| Woëvre | 46,85 | 50,78 | 2,37 | 67,27 | 32,73 | 83,09 | 16,91 | 14,11 | 85,89 |
| Plateau lorrain | 95,70 | 1,21 | 3,09 | 76,44 | 23,56 | 0,00 | 100,00 | 13,04 | 86,96 |
| Warndt | 45,82 | 48,77 | 5,41 | 64,45 | 35,55 | 75,09 | 24,91 | 13,81 | 86,19 |
| Vôge | 97,74 | 0,80 | 1,46 | 78,00 | 22,00 | 38,89 | 61,11 | 0,00 | 100,00 |
| Coll.-sous-vosgiennes | 97,59 | 1,30 | 1,11 | 69,61 | 30,39 | 13,17 | 86,83 | 5,13 | 94,87 |
| B.-vosges gréseuses | 93,87 | 3,98 | 2,15 | 67,08 | 32,92 | 45,13 | 54,87 | 13,41 | 86,59 |
| Ht.-vosges gréseuses | 79,90 | 16,99 | 3,12 | 63,44 | 36,56 | 71,53 | 28,47 | 3,15 | 96,85 |
| Vosges cristallines | 93,22 | 3,27 | 3,50 | 66,85 | 33,15 | 13,44 | 86,56 | 2,21 | 97,79 |

## ANNEXE 1 : LA FORET LORRAINE EN CHIFFRES (suite)

### III - Surfaces boisées de production, par région forestière et par département

| | Meuse | | | Meurthe-et-moselle | | | Moselle | | | Vosges | | | Lorraine |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | surface totale (ha) | surface boisée (ha) | taux de boisement (%) | surface totale (ha) | surface boisée (ha) | taux de boisement (%) | surface totale (ha) | surface boisée (ha) | taux de boisement (%) | surface totale (ha) | surface boisée (ha) | taux de boisement (%) | taux de boisement (%) |
| Argonne | 45740 | 22280 | 48,71 | | | | | | | | | | 48,71 |
| Champagne humide | 33290 | 11470 | 34,45 | | | | | | | | | | 34,45 |
| Barrois | 190400 | 59880 | 31,45 | | | | | | | | | | 31,45 |
| Côtes de Meuse | 192660 | 92900 | 48,22 | 16284 | 10797 | 66,30 | | | | 20280 | 13370 | 65,93 | 51,07 |
| Pays-Haut | 41880 | 7880 | 18,82 | 87759 | 18118 | 20,65 | 44860 | 16050 | 35,78 | | | | 24,10 |
| Haye | | | | 99808 | 46243 | 46,33 | | | | 34770 | 15120 | 43,49 | 45,60 |
| Woëvre | 120170 | 32280 | 26,86 | 55848 | 10853 | 19,43 | | | | 6180 | 500 | 8,09 | 23,95 |
| Plateau lorrain | | | | 232399 | 50940 | 21,92 | 484940 | 90760 | 18,72 | 191250 | 58540 | 30,61 | 22,04 |
| Warndt | | | | | | | 22150 | 7580 | 34,22 | | | | 34,22 |
| Vôge | | | | | | | | | | 90950 | 40800 | 44,86 | 44,86 |
| Coll.-sous-vosgiennes | | | | 14864 | 6961 | 46,83 | 19050 | 9820 | 51,55 | 47900 | 25220 | 52,65 | 51,34 |
| B.-vosges gréseuses | | | | | | | 28820 | 22560 | 78,28 | | | | 78,28 |
| Ht.-vosges gréseuses | | | | 21561 | 16992 | 78,81 | 25270 | 21320 | 84,37 | 71560 | 49750 | 69,52 | 74,38 |
| Vosges cristallines | | | | | | | | | | 127050 | 77680 | 61,14 | 61,14 |
| Total par département | 624140 | 226690 | 36,32 | 528523 | 160904 | 30,44 | 625090 | 168090 | 26,89 | 589940 | 280980 | 47,63 | 35,34 |

### IV - Gestion sylvicole et essences par régions forestières

| | | | Argonne | Champagne humide | Barrois | Côtes de Meuse | Pays-Haut | Haye | Woëvre | Plateau lorrain | Warndt | Vôge | Collines-sous-vosgiennes | Basses-vosges gréseuses | Hautes-vosges gréseuses | Vosges cristallines | Lorraine |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| -a- | | Futaies | 10980 | 2490 | 20240 | 41080 | 19534 | 28687 | 11087 | 91343 | 7130 | 32550 | 39164 | 22050 | 85601 | 72090 | 484026 |
| | | Taillis-sous-futaies | 10520 | 8630 | 37100 | 70138 | 20277 | 31093 | 31955 | 97228 | 90 | 6920 | 1662 | 180 | 1139 | 2530 | 319462 |
| | | Taillis simples | 670 | 350 | 2540 | 5091 | 2050 | 1453 | 589 | 10779 | 230 | 1270 | 895 | 330 | 974 | 2710 | 29931 |
| | | Région forestière | 22170 | 11470 | 59880 | 116309 | 41861 | 61233 | 43631 | 199350 | 7450 | 40740 | 41721 | 22560 | 87714 | 77330 | 833419 |
| -b- | Futaie | chênes | 4010 | 1120 | 4980 | 2217 | 1091 | 3633 | 4535 | 30542 | 1550 | 6000 | 4435 | 5440 | 744 | 1150 | 71447 |
| | | hêtre | 2550 | 0 | 5340 | 16614 | 11162 | 14245 | 868 | 26424 | 1970 | 14470 | 13483 | 5450 | 8127 | 9320 | 130023 |
| | | autres feuillus | 690 | 640 | 3530 | 2123 | 3042 | 3986 | 2589 | 13698 | 310 | 1510 | 1861 | 350 | 1132 | 1540 | 37001 |
| | | conifères | 3730 | 730 | 6390 | 20126 | 4239 | 6823 | 3095 | 20679 | 3300 | 10570 | 19385 | 10810 | 75598 | 60080 | 245555 |
| | TSF | chênes | 6430 | 6310 | 19880 | 25864 | 5707 | 11001 | 26576 | 78543 | 30 | 5580 | 1070 | 150 | 390 | 810 | 188341 |
| | | hêtre | 1810 | 1440 | 10620 | 38441 | 9781 | 14838 | 1689 | 7513 | 30 | 780 | 100 | 0 | 60 | 300 | 87402 |
| | | autres feuillus | 2060 | 880 | 5070 | 4803 | 4488 | 4810 | 3380 | 10212 | 30 | 460 | 60 | 0 | 30 | 80 | 36363 |
| | | conifères | 220 | 0 | 1530 | 1030 | 301 | 444 | 310 | 960 | 0 | 100 | 432 | 30 | 659 | 1340 | 7356 |
| | Taillis simple | | 670 | 350 | 2540 | 5091 | 2050 | 1453 | 589 | 10779 | 230 | 1270 | 895 | 330 | 974 | 2710 | 29931 |
| -c- | Futaies | | 49,5 | 21,7 | 33,8 | 35,3 | 46,7 | 46,8 | 25,4 | 45,8 | 95,7 | 79,9 | 93,9 | 97,7 | 97,6 | 93,2 | 58,1 |
| | Taillis-sous-futaies | | 47,5 | 75,2 | 62,0 | 60,3 | 48,4 | 50,8 | 73,2 | 48,8 | 1,2 | 17,0 | 4,0 | 0,8 | 1,3 | 3,3 | 38,3 |
| | Taillis simples | | 3,0 | 3,1 | 4,2 | 4,4 | 4,9 | 2,4 | 1,3 | 5,4 | 3,1 | 3,1 | 2,1 | 1,5 | 1,1 | 3,5 | 3,6 |
| -d- | Futaie | chênes | 18,1 | 9,8 | 8,3 | 1,9 | 2,6 | 5,9 | 10,4 | 15,3 | 20,8 | 14,7 | 10,6 | 24,1 | 0,8 | 1,5 | 8,6 |
| | | hêtre | 11,5 | 0,0 | 8,9 | 14,3 | 26,7 | 23,3 | 2,0 | 13,3 | 26,4 | 35,5 | 32,3 | 24,2 | 9,3 | 12,1 | 15,6 |
| | | autres feuillus | 3,1 | 5,6 | 5,9 | 1,8 | 7,3 | 6,5 | 5,9 | 6,9 | 4,2 | 3,7 | 4,5 | 1,6 | 1,3 | 2,0 | 4,4 |
| | | conifères | 16,8 | 6,4 | 10,7 | 17,3 | 10,1 | 11,1 | 7,1 | 10,4 | 44,3 | 25,9 | 46,5 | 47,9 | 86,2 | 77,7 | 29,5 |
| | TSF | chênes | 29,0 | 55,0 | 33,2 | 22,2 | 13,6 | 18,0 | 60,9 | 39,4 | 0,4 | 13,7 | 2,6 | 0,7 | 0,4 | 1,0 | 22,6 |
| | | hêtre | 8,2 | 12,6 | 17,7 | 33,1 | 23,4 | 24,2 | 3,9 | 3,8 | 0,4 | 1,9 | 0,2 | 0,0 | 0,1 | 0,4 | 10,5 |
| | | autres feuillus | 9,3 | 7,7 | 8,5 | 4,1 | 10,7 | 7,9 | 7,7 | 5,1 | 0,4 | 1,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 4,4 |
| | | conifères | 1,0 | 0,0 | 2,6 | 0,9 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,5 | 0,0 | 0,2 | 1,0 | 0,1 | 0,8 | 1,7 | 0,9 |
| | Taillis simple | | 3,0 | 3,1 | 4,2 | 4,4 | 4,9 | 2,4 | 1,3 | 5,4 | 3,1 | 3,1 | 2,1 | 1,5 | 1,1 | 3,5 | 3,6 |
| -e- | Futaie | chênes | 36,5 | 45,0 | 24,6 | 5,4 | 5,6 | 12,7 | 40,9 | 33,4 | 21,7 | 18,4 | 11,3 | 24,7 | 0,9 | 1,6 | 14,8 |
| | | hêtre | 23,2 | 0,0 | 26,4 | 40,4 | 57,1 | 49,7 | 7,8 | 28,9 | 27,6 | 44,5 | 34,4 | 24,7 | 9,5 | 12,9 | 26,9 |
| | | autres feuillus | 6,3 | 25,7 | 17,4 | 5,2 | 15,6 | 13,9 | 23,4 | 15,0 | 4,3 | 4,6 | 4,8 | 1,6 | 1,3 | 2,1 | 7,6 |
| | | conifères | 34,0 | 29,3 | 31,6 | 49,0 | 21,7 | 23,8 | 27,9 | 22,6 | 46,3 | 32,5 | 49,5 | 49,0 | 88,3 | 83,3 | 50,7 |
| | TSF | chênes | 61,1 | 73,1 | 53,6 | 36,9 | 28,1 | 35,4 | 83,2 | 80,8 | 33,3 | 80,6 | 64,4 | 83,3 | 34,2 | 32,0 | 59,0 |
| | | hêtre | 17,2 | 16,7 | 28,6 | 54,8 | 48,2 | 47,7 | 5,3 | 7,7 | 33,3 | 11,3 | 6,0 | 0,0 | 5,3 | 11,9 | 27,4 |
| | | autres feuillus | 19,6 | 10,2 | 13,7 | 6,8 | 22,1 | 15,5 | 10,6 | 10,5 | 33,3 | 6,6 | 3,6 | 0,0 | 2,6 | 3,2 | 11,4 |
| | | conifères | 2,1 | 0,0 | 4,1 | 1,5 | 1,5 | 1,4 | 1,0 | 1,0 | 0,0 | 1,4 | 26,0 | 16,7 | 57,9 | 53,0 | 2,3 |

**- a -** : Surfaces boisées de production en fonction du type de gestion sylvicole (déduction faite de la surface des coupes rases de moins de cinq ans sans régénération : Meurthe-et Moselle 645 ha, Moselle 920 ha, Meuse 640 ha, Vosges 1040 ha).

**- b -** : Surfaces boisées de production en fonction du type de gestion sylvicole et des essences prépondérentes.

**- c -** : Proportions (%) des surfaces boisées de production en fonction du type de gestion sylvicole.

**- d -** : Proportions (%) des surfaces boisées de production en fonction du type de gestion sylvicole et des essences prépondérentes par rapport à la surface boisée de la région forestière.

**- e -** : Proportions (%) des surfaces boisées de production en fonction des essences prépondérentes par rapport à la surface boisée par type de gestion sylvicole.

| N° PLACETTE | METEO | AUTEUR(S) | |
|---|---|---|---|
| | | DATES | dendrométrie |
| GESTION taillis-sous-futaie | futaie | | relevé floristique |
| | | | carottage |

| FORET DE | domaniale | communale | privée |
|---|---|---|---|
| | ☆ | ☆ | ☆ |

| | | |
|---|---|---|
| N° PARCELLE | dépression | ☆ |
| LONGITUDE | plateau | ☆ |
| LATITUDE | haut de pente | ☆ |
| N° CARTE IGN | mi pente | ☆ |
| EXPOSITION | bas de pente | ☆ |
| PENTE SUR LA PLACETTE | fond de vallon | ☆ |

| TAILLIS | |
|---|---|
| hauteur moy. | |
| recouvrement | |
| circonf. moy. | |
| age moy. | |
| amenagement | |
| dernière coupe | |

| PENTE EN AMONT DE LA PLACETTE | topo |
|---|---|
| PENTE EN AVAL DE LA PLACETTE | topo |
| MICROTOPO | |
| CLASSE D'ALIM. EN EAU : 1 2 3 4 | |

| BITTERLICH | | |
|---|---|---|
| situation | futaie | taillis |
| - | - | - |
| - | - | - |
| - | - | - |
| - | - | - |
| - | - | - |

PLAN DE LA PLACETTE / ETAT DES RESERVES / REMARQUES ...

| N° ARBRE | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CIRCONFERENCE A 1,30 m | | | | | | | | | | | | |
| PIED | | | | | | | | | | | | |
| FOURCHE | | | | | | | | | | | | |
| PREMIERE BRANCHES | | | | | | | | | | | | |
| BASE DU HOUPPIER | | | | | | | | | | | | |
| SOMMET DU HOUPPIER | | | | | | | | | | | | |
| HAUTEUR TOTALE | | | | | | | | | | | | |
| HAUTEUR DU HOUPPIER | | | | | | | | | | | | |
| PROJECTION DU HOUPPIER | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| CONCURENCE EN CIME | | | | | | | | | | | | |
| éloignement | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| PLUS PROCHE VOISIN circonf. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| essence | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| récentes | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SOUCHES anciennes | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| très anciennes | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| CONCURENCE EN SOUCHE | | | | | | | | | | | | |
| CAROTTAGE | | | | | | | | | | | | |
| ANGLE BRANCHES BASSES | | | | | | | | | | | | |
| ETAT SANITAIRE | | | | | | | | | | | | |
| REMARQUES | | | | | | | | | | | | |

| STRATE ARBORESCENTE | | STRATE ARBUSTIVE | | STRATE HERBACEEE | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Aca1 | Acer campestre | Aca2 | Acer campestre | Aca3 | Acer campestre | Acpy | Aconitum pyramidale | Deca | Deschampsia caespitos | Lyvu | Lysimachia vulgaris | Vech | Veronica Chamaedrys |
| Apl1 | Acer platanoides | Apl2 | Acer platanoides | Apl3 | Acer platanoides | Acvu | Aconitum vulparia | Dilu | Digitalis lutea | Lysa | Lythrum salicaria | Vemo | Veronica montana |
| Aps1 | Acer pseudoplatanus | Aps2 | Acer pseudoplatanus | Aps3 | Acer pseudoplatanus | Acsp | Actaea spicata | Elca | Elymus caninus | Mepr | Melampyrum pratense | Veof | Veronica officinalis |
| Bpe1 | Betula pendula | Bpe2 | Betula pendula | Bpe3 | Betula pendula | Admo | Adoxa moschatellina | Epan | Epilobium angustifoliu | Meru | Melandryum rubrum | Vise | Vicia sepium |
| Cbe1 | Carpinus betulus | Cbe2 | Carpinus betulus | Cbe3 | Carpinus betulus | Aepo | Aegopodium podagrari | Epmo | Epilobium montanum | Menu | Melica nutans | Vinm | Vinca minor |
| Fsy1 | Fagus sylvatica | Fsy2 | Fagus sylvatica | Fsy3 | Fagus sylvatica | Ajre | Ajuga reptans | Ephe | Epipactis helleborine | Meun | Melica uniflora | Vinh | Vincetoxicum hirundinari |
| Fex1 | Fraxinus excelsior | Fex2 | Fraxinus excelsior | Fex3 | Fraxinus excelsior | Alpe | Alliaria petiolata | Eqma | Equisetum maximum | Meme | Melittis melissophyllur | Vihi | Viola hirta |
| Msy1 | Malus sylvestris | Msy2 | Malus sylvestris | Msy3 | Malus sylvestris | Alur | Allium ursinum | Euca | Eupatorium cannabinu | Mepe | Mercurialis perennis | Vimi | Viola mirabilis |
| Ptr1 | Populus tremula | Ptr2 | Populus tremula | Ptr3 | Populus tremula | Anne | Anemone nemorosa | Euam | Euphorbia amygdaloïd | Mief | Milium effusum | Viri | Viola riviniana |
| Pav1 | Prunus avium | Pav2 | Prunus avium | Pav3 | Prunus avium | Anra | Anemone ranunculoïde | Eucy | Euphorbia cyparissias | Motr | Moehringia trinervia | Vire | Viola reichenbachiana |
| Ppy1 | Pyrus pyraster | Ppy2 | Pyrus pyraster | Ppy3 | Pyrus pyraster | Ansy | Angelica sylvestris | Eudu | Euphorbia dulcis | Moca | Molinia caerulea | | |
| Qpe1 | Quercus petraea | Qpe2 | Quercus petraea | Qpe3 | Quercus petraea | Anli | Anthericum liliago | Fegi | Festuca gigantea | Mymu | Mycelis muralis | | |
| Qpu1 | Quercus pubescens | Qpu2 | Quercus pubescens | Qpu3 | Quercus pubescens | Aram | Anthericum ramosum | Fehe | Festuca heterophylla | Neni | Neottia nidus avis | | |
| Qro1 | Quercus robur | Qro2 | Quercus robur | Qro3 | Quercus robur | Anod | Anthoxanthum odoratu | Fesy | Festuca sylvatica | Orpy | Ornithogalum pyrenaï | | |
| Sca1 | Salix caprea | Sca2 | Salix caprea | Sca3 | Salix caprea | Aqvu | Aquilegia vulgaris | Fiul | Filipendula ulmaria | Oxac | Oxalis acetosella | | |
| Sni1 | Sambucus nigra | Sni2 | Sambucus nigra | Sni3 | Sambucus nigra | Arne | Arctium nemorosum | Frve | Fragaria vesca | Paqu | Paris quadrifolia | | |
| Sra1 | Sambucus racemosa | Sra2 | Sambucus racemosa | Sra3 | Sambucus racemosa | Arma | Arum maculatum | Galu | Gagea lutea | Phsc | Phyllitis scolopendriu | | |
| Sar1 | Sorbus aria | Sar2 | Sorbus aria | Sar3 | Sorbus aria | Aseu | Asarum europaeum | Gate | Galeopsis tetrahit | Phsp | Phyteuma spicatum | | |
| Sdo1 | Sorbus domestica | Sdo2 | Sorbus domestica | Sdo3 | Sorbus domestica | Asac | Aspidium aculeatum | Gaap | Galium aparine | Pima | Pimpinella major | | |
| Sto1 | Sorbus torminalis | Sto2 | Sorbus torminalis | Sto3 | Sorbus torminalis | Atfi | Athyrium filix - femina | Gaod | Galium odoratum | Plas | Plagiochila asplenioid | | |
| Tco1 | Tilia cordata | Tco2 | Tilia cordata | Tco3 | Tilia cordata | Bevu | Berberis vulgaris | Gapa | Galium palustre | Poch | Poa chaixi | | |
| Tpl1 | Tilia platiphyllos | Tpl2 | Tilia platiphyllos | Tpl3 | Tilia platiphyllos | Brpi | Brachypodium pinnatu | Gasy | Galium sylvaticum | Pone | Poa nemoralis | | |
| Ugl1 | Ulmus glabra | Ugl2 | Ulmus glabra | Ugl3 | Ulmus glabra | Brsy | Brachypodium sylvatic | Gero | Geranium robertianum | Pomu | Polygonatum multiflo | | |
| Umi1 | Ulmus minor | Umi2 | Ulmus minor | Umi3 | Ulmus minor | Brra | Bromus ramosus | Gesa | Geranium sanguineum | Pood | Polygonatum odoratu | | |
| Usc1 | Ulmus scabra | Usc2 | Ulmus scabra | Usc3 | Ulmus scabra | Cpal | Caltha palustris | Geur | Geum urbanum | Pofi | Polystichum filix-mas | | |
| | | | | | | Cper | Campanula persicaefol | Glhe | Glechoma hederacea | Posp | Polystichum spinulos | | |
| | | Clv2 | Clematis vitalba | Clv3 | Clematis vitalba | Ctra | Campanula trachelium | Hehe | Hedera helix | Post | Potentilla sterilis | | |
| | | Com2 | Cornus mas | Com3 | Cornus mas | CaIm | Cardamine Impatiens | Hefo | Helleborus foetidus | Prel | Primula elatior | | |
| | | Cos2 | Cornus sanguinea | Cos3 | Cornus sanguinea | Capr | Cardamine pratensis | Heno | Hepatica nobilis | Prof | Primula officinalis | | |
| | | Coa2 | Corylus avellana | Coa3 | Corylus avellana | Caac | Carex acutiformis | Hesp | Heracleum sphondyliu | Prve | Primula veris | | |
| | | Crl2 | Crataegus laevigata | Crl3 | Crataegus laevigata | Caal | Carex alba | Himu | Hieracium murorum | Ptaq | Pteridium aquilinum | | |
| | | Crm2 | Crataegus monogyna | Crm3 | Crataegus monogyna | Cabr | Carex brizoïdes | Hoeu | Hordelymus europaeus | Puob | Pulmonaria obscura | | |
| | | Dal2 | Daphne laureola | Dal3 | Daphne laureola | Cadi | Carex digitata | Hulu | Humulus lupulus | Raau | Ranunculus auricomus | | |
| | | Dam2 | Daphne mezereum | Dam3 | Daphne mezereum | Cafl | Carex flacca | Hyhi | Hypericum hirsutum | Rafi | Ranunculus ficaria | | |
| | | Eue2 | Euonymus europaeus | Eue3 | Euonymus europaeus | Cahu | Carex humilis | Hype | Hypericum perforatum | Rane | Ranunculus nemorosus | | |
| | | Liv2 | Ligustrum vulgare | Liv3 | Ligustrum vulgare | Camo | Carex montana | Hypu | Hypericum pulchrum | Saeu | Sanicula europaea | | |
| | | Lop2 | Lonicera periclymenun | Lop3 | Lonicera periclymenun | Camu | Carex muricana | Imno | Impatiens noli - tanger | Scbi | Scillia bifolia | | |
| | | Lox2 | Lonicera xylosteum | Lox3 | Lonicera xylosteum | Capa | Carex pallescens | Irps | Iris pseudacorus | Scaq | Scrofularia aquatica | | |
| | | Prs2 | Prunus spinosa | Prs3 | Prunus spinosa | Cape | Carex pendula | Isth | Isopyrum thalictroïdes | Scno | Scrofularia nodosa | | |
| | | Rhc2 | Rhamnus cathartica | Rhc3 | Rhamnus cathartica | Capi | Carex pilulifera | Laga | Lamiastrum galeobdol | Sefu | Senecio fushsii | | |
| | | Rhf2 | Rhamnus frangula | Rhf3 | Rhamnus frangula | Care | Carex remota | Laal | Lamium album | Seti | Serratula tinctoria | | |
| | | Ria2 | Ribes alpinum | Ria3 | Ribes alpinum | Casy | Carex sylvatica | Lama | Lamium maculatum | Seal | Sesleria albicans | | |
| | | Rir2 | Ribes rubrum | Rir3 | Ribes rubrum | Caum | Carex umbrosa | Lala | Laserpitium latifolium | Sodu | Solanum dulcamara | STRATE MUSCINALE | |
| | | Riu2 | Ribes uva-crispa | Riu3 | Ribes uva-crispa | Cemo | Centaurea montana | Lasq | Lathraea squamaria | Sovi | Solidago virga aurea | Atum | Atrichum undulatum |
| | | Roa2 | Rosa arvensi | Roa3 | Rosa arvensi | Ceda | Cephalanthera damaso | Lamo | Lathyrus montanus | Stof | Stachys officinalis | Disc | Dicranum scoparium |
| | | Roc2 | Rosa canina | Roc3 | Rosa canina | Cilu | Circaea lutetiana | Lave | Lathyrus vernus | Stsy | Stachys sylvatica | Esto | Eurhynchium stockesii |
| | | Ruc2 | Rubus caesius | Ruc3 | Rubus caesius | Ciol | Circium oleaceum | Leve | Leucoïum vernum | Stho | Stellaria holostea | Estr | Eurhynchium striatum |
| RECOUVREMENT % | | Rui2 | Rubus idaeus | Rui3 | Rubus idaeus | Coau | Colchicum automnale | Liov | Listera ovata | Taco | Tamus communis | Fita | Fissidens taxifolius |
| | ARBRES | Rus2 | Rubus saxatilis | Rus3 | Rubus saxatilis | Conm | Convallaria maialis | Lure | Lunaria rediviva | Taof | Taraxacum officinale | Hypn | Hypnum sp |
| | ARBUSTES 1 | Rsp2 | Rubus sp. | Rsp3 | Rubus sp. | Cobu | Corydallis bulbosa | Lulu | Luzula luzuloïdes | Tech | Teucrium Chamaedrys | Plun | Plagiomnium undulatum |
| | ARBUSTES 2 | Rut2 | Rubus tomentosus | Rut3 | Rubus tomentosus | Coso | Corydallis solida | Luma | Luzula maxima | Tesc | Teucrium scorodonia | Pofo | Polytrichum formosum |
| | HERBACEES | Vil2 | Viburnum lantana | Vil3 | Viburnum lantana | Dagl | Dactylis glomerata | Lupi | Luzula pilosa | Urdi | Urtica dioïca | Rhtr | Rhytidiadelphus triquetrus |
| | TOTAL | Vio2 | Viburnum opulus | Vio3 | Viburnum opulus | Depi | Dentaria pinnata | Lynu | Lysimachia nummulari | Vare | Valeriana repens | Thut | Thuidium tamariscinum |

## CLE DE DETERMINATION DES HUMUS DE PLAINE

**L = litière**

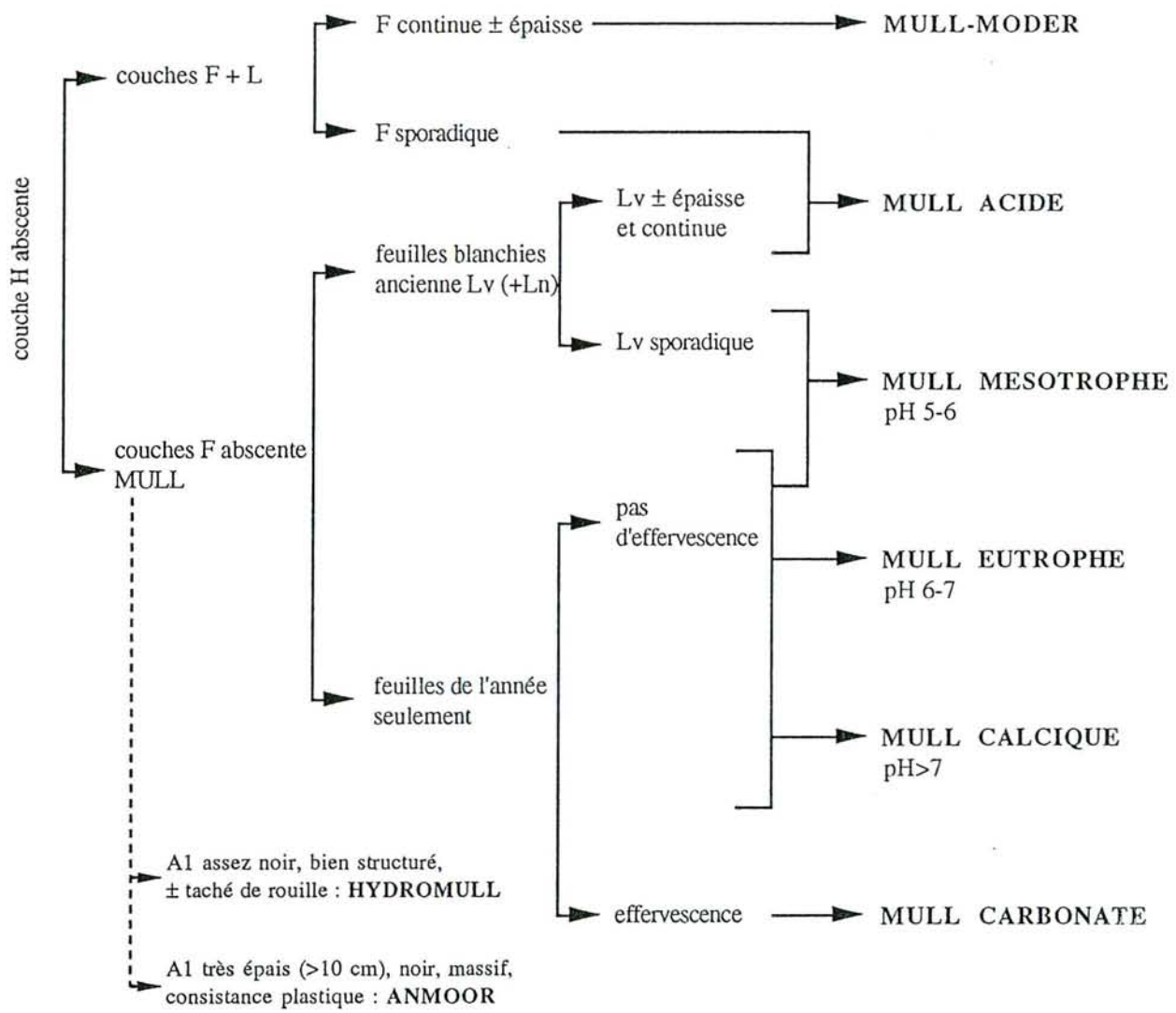
- Ln débris végétaux bruts (feuilles entières non dégradées)
- Lv feuilles ou débris avec pourritures blanches mais encore entières et reconnaissables
- Lt débrits végétaux ou feuilles fractionnées parfois réduites au squelette mais non blanchies

**F = fermentation ou fragmentation** : morceaux de feuilles + débris très morcelés noirs + petits agglomérats de matière humique noire (boulettes fécales de microarthropodes)

- Fr (OF1) dominance de débrits
- Fm (OF2) même quantité de débrits et de granules d'humus

**H = humus** : humus fin largement dominant. On ne distingue plus les débrits végétaux

- Hr 70 à 90% de l'ensemble est constitué de substances humifiées
- Hf plus de 90% de l'ensemble est constitué de boulettes fécales



## ORIGINE DE L'INTERDATATION

Léonard de Vinci fut probablement l'un des premiers à s'intéresser à l'origine et au déterminisme des largeurs de cernes. Il constatait en 1270 (*in* Patrone, 1952) :

> *"I circoli dei rami segati mostrano il numero dei loro anni e quali furono più umidi o più secchi, secondo la maggiore o minore loro grossezza. [...]"*.
>
> (Les anneaux concentriques, observables sur des troncs sciés, montrent le nombre de leurs années et lesquelles furent plus humides ou plus sèches, selon leurs plus grandes ou plus petites largeurs).

L'étude des largeurs de cernes d'un grand nombre d'arbres n'est cependant possible que grâce à l'interdatation et en ce sens, la communauté scientifique reconnait Andrew E. Douglass comme précurseur. Pourtant, Studhalter (1955) reconnaît que Douglass ne fut pas le premier à découvrir l'interdatation : "*That honor goes to the French naturalists Duhamel and Buffon*". Duhamel et Buffon (1737) furent les premiers à mettre en évidence, sur des sections d'arbres fraîchement abattus, des défauts "caractéristiques"communs à plusieurs arbres étudiés, dont l'origine semblait être les grands froids de 1709, soit 28 ans auparavant :

> *"Nous avons trouvé dans les forêts beaucoup d'arbres attaqués de défauts considérables, qui ont certainement été produits par les fortes gelées (dont nous venons de parler), et particulièrement par celle de 1709; car, quoique cette gelée commence à être ancienne, elle a produit, dans les arbres qu'elle n'a pas entièrement détruits, des défauts qui ne s'effaceront jamais. Ces défauts sont : 1° des gerces qui suivent la direction des fibres, et que les gens de forêts appellent gélivures ; 2° une portion de bois mort renfermée dans le bon bois, ce que quelques forestiers appellent gélivure entrelardée ; 3° enfin le double aubier, qui est une couronne entière de bois imparfait remplie et recouverte par du bon bois [...]. (Ce faux aubier) est plus faible, plus tendre et plus léger que le vrai aubier, quoiqu'il ait été formé 20 et 25 ans auparavant; ce que nous avons reconnu en comptant les cercles annuels, tant de l'aubier que du bois qui recouvre ce faux aubier: et cette observation que nous avons répétée sur nombre d'arbres prouve incontestablement que ce défaut est une suite du grand froid de 1709; car il ne faut pas être surpris de trouver toujours quelques couches de moins que le nombre des années qui se sont écoulées depuis 1709, non-seulement parce qu'on ne peut jamais avoir par le nombre des couches ligneuses l'âge des arbres qu'à trois ou quatre années près, mais encore parce que les premières couches ligneuses qui se sont formées depuis 1709 étoient si minces et si confuses, qu'on ne peut les distinguer bien exactement [...]. Disons maintenant un mot de cet autre défaut que nous avons appelé la gélivure entrelardée. En sciant horizontalement les pieds d'arbres, on aperçoit quelquefois un morceau d'aubier mort et d'écorce desséchée qui est entièrement recouvert par le bois vif [...] Par la profondeur où cet aubier se trouve dans le tronc, il paroît dans beaucoup d'arbre avoir péri en 1709, et nous croyons qu'il est dans toute une suite de grandes gelées d'hiver qui ont fait entièrement périr une portion d'aubier et d'écorce, qui ont ensuite été recouverts par le nouveau bois [...]"*

Un peu plus tard, Duhamel du Monceau écrit dans "la physique des arbres" (1758, tomes 1 et 2) :

> *"En examinant l'aire de la coupe transversale d'un tronc de Chêne, d'Orme, de Sapin, &c. on y voit donc des couches ligneuses très sensiblement distinctes les unes des autres, qui s'enveloppent & se recouvrent mutuellement : on croit communément que chacune de ces couches est le produit de l'accroissement du corps ligneux pendant une année"*
>
> *"Les couches ligneuses qu'on aperçoit si sensiblement sur la coupe de certains arbres, ne sont pas toutes d'une même épaisseur. Cette inégalité d'épaisseur dépend :*

*1° - de l'âge de l'arbre ; la sève d'un gros arbre ayant à se distribuer à un plus grand nombre de parties, les couches sont plus minces ;*

*2° - de la vigueur de l'arbre ; celui qui sera planté dans un terrain gras fournira des couches plus épaisses que celui qui le sera dans un terrain maîgre ;*

*3° - cette inégalité d'épaisseur dépend aussi souvent de l'état des saisons et de la durée de la sève. Dans une année favorable à la végétation, les couches seront une fois plus épaisse que dans les années ou très sèches ou très froides."*

Twinning fit des constatations semblables dans le Connecticut en 1827, ainsi que Babbage en 1838 en Grande Bretagne, Kuechler en 1859 au Texas, Henry en 1895 en Lorraine puis en 1898 dans toute la France. S'il est admis que Twinning fut le premier à saisir la pleine signification et le potentiel de l'interdatation, c'est Douglass qui considéra ce principe comme la base pour le développement de la dendrochronologie (Heizer, 1956 ; Dean, *in* Fritts, 1976).

## LISTE DES PRINCIPALES ESPECES RENCONTREES ET GROUPES ECOLOGIQUES
(selon Becker *et al.*, 1980)

**Groupe des xérocalcaricoles thermophiles (groupe 1)**
- Berberis vulgaris
- Carex alba
- Cephalanthera damasonium
- Cephalanthera longifolia
- Cephalanthera rubra
- Euphorbia cyparissias
- Frangula alnus
- Helleborus foetidus
- Melampyrum pratense
- Polygonatum odoratum
- Primula veris
- Quercus pubescens
- Rubus saxatilis
- Sesleria albicans
- Solidago virgaurea
- Sorbus domestica
- Tamus communis
- Teucrium scorodonia
- Vincetoxicum hirundinaria

**Groupe des xérocalcaricoles (groupe 2)**
- Bromus benekenii
- Bromus ramosus
- Buglossoides purpurocaerulea
- Clematis vitalba
- Daphne laureola
- Daphne mezereum
- Hepatica nobilis
- Malus sylvestris
- Pyrus pyraster
- Sorbus aria
- Tilia platyphyllos

**Groupe des calcaricoles (groupe 3)**
- Acer campestre
- Aquilegia vulgaris
- Brachypodium sylvaticum
- Campanula trachelium
- Cardamine heptaphylla
- Carex digitata
- Cornus mas
- Cornus sanguinea
- Crataegus laevigata
- Crataegus monogyna
- Euonymus europaeus
- Lathyrus vernus
- Ligustrum vulgare
- Lonicera xylosteum
- Melica nutans
- Mercurialis perennis
- Neottia nidus-avis
- Orchis mascula
- Prunus spinosa
- Pulmonaria montana
- Ribes alpinum
- Rosa arvensis
- Viburnum lantana
- Viola mirabilis

**Groupe des neutrophiles à large amplitude (groupe 4)**
- Carex flacca
- Carex montana
- Carpinus betulus
- Convallaria maialis
- Corylus avellana
- Dactylis glomerata
- Euphorbia amygdaloides
- Fagus sylvatica
- Fissidens taxifolius
- Fragaria vesca
- Fraxinus excelsior
- Galium odoratum
- Galium sylvaticum
- Hedera helix
- Hieracium murorum
- Hordelymus europaeus
- Hypericum perforatum
- Melica uniflora
- Platanthera bifolia
- Potentilla sterilis
- Prunus avium
- Quercus petraea
- Rubus sp.
- Sorbus torminalis
- Viburnum opulus
- Viola reichenbachiana

**Groupe des neutroacidoclines (groupe 5)**
- Angelica sylvestris
- Carex sylvatica
- Circaea lutetiana
- Deschampsia caespitosa
- Eurhynchium striatum
- Lamiastrum galeobdolon
- Luzula pilosa
- Milium effusum
- Oxalis acetosella
- Plagiomnium undulatum
- Poa chaixii
- Poa nemoralis
- Rhytidiadelphus triquetrus
- Scrophularia nodosa
- Stellaria holostea
- Thuidium tamariscinum
- Tilia cordata
- Veronica chamaedrys
- Vinca minor

**Groupe des acidoclines (groupe 6)**
- Athyrium filix-femina
- Atrichum undulatum
- Carex muricata
- Carex umbrosa
- Dryopteris carthusiana
- Dryopteris dilatata
- Dryopteris filix-mas
- Epilobium montanum
- Galeopsis tetrahit

Lapsana communis
Moehringia trinervia
Populus tremula
Rubus idaeus
Salix caprea
Veronica montana

**Groupe des acidophiles (groupe 7)**
Digitalis purpurea
Lonicera periclymenum
Luzula luzuloides
Polytrichum formosum
Pteridium aquilinum
Viola riviniana

**Groupe des neutronitroclines (groupe 8)**
Acer platanoides
Acer pseudoplatanus
Ajuga reptans
Anemone nemorosa
Arum maculatum
Asarum europaeum
Atropa bella-donna
Cardamine impatiens
Carpinus betulus
Euphorbia dulcis
Festuca heterophylla
Fraxinus excelsior
Geum urbanum
Heracleum sphondylium
Hypericum hirsutum
Mycelis muralis
Ornithogalum pyrenaicum
Paris quadrifolia
Phyteuma spicatum
Polygonatum multiflorum
Pulmonaria obscura
Quercus robur
Sanicula europaea
Stachys sylvatica
Taraxacum officinale
Ulmus glabra
Verbascum nigrum
Vicia sepium
Viola odorata

**Groupe des neutronitrophiles (groupe 9)**
Anemone ranunculoides
Arctium nemorosum
Cardamine pratensis
Geranium robertianum
Primula elatior
Ranunculus auricomus
Scilla bifolia

**Groupe des hygro-neutronitrophiles (groupe 10)**
Aconitum vulparia
Adoxa moschatellina
Aegopodium podagraria
Alliaria petiolata
Allium ursinum
Corydallis bulbosa
Glechoma hederacea
Ranunculus ficaria
Ribes rubrum
Ribes uva-crispa
Rubus caesius
Rumex acetosa
Sambucus nigra
Urtica dioica

**Groupe des neutrohygophiles (groupe 11)**
Agrostis stolonifera
Circium oleraceum
Eupatorium cannabinum
Ranunculus platanifolius
Valeriana officinalis

**Groupe des espèces à affinités montagnardes (groupe 12)**
Aconitum vulparia
Senecio nemorensis
Tilia platyphyllos
Ulmus glabra

Avant de débuter une thèse, l'étudiant doit disposer d'un sujet et d'un financement. Ces deux facteurs relèvent dans certains cas de processus distincts, mais ils peuvent également être très liés et leur adéquation peut prendre un certain temps. Par exemple, le futur thésard ne pourra pas étudier le pin à crochet dans les Pyrénées si la Région Lorraine investit quelque argent dans le projet. L'étudiant ne doit alors pas perdre courage. S'il peut avoir certaines idées concernant le sujet, le jeune Diplômé d'Etudes Approfondies n'est en général d'aucune utilité dans les démarches engagées pour l'obtention d'un financement. Cette tâche reste l'apanage des gens sérieux et des organismes compétents qui jugent ou non de l'intérêt de la chose.

**Exemple :**
*La Région Lorraine ainsi que la Direction de l'Espace Rural et de la Forêt peuvent accepter de co-financer une étude dendroécologique du hêtre sur les plateaux calcaires de Lorraine. Gilbert AUSSENAC, Michel BECKER, Guy LANDMANN et François LE TACON sont des personnes sur qui l'on peut compter pour défendre un tel projet et obtenir les financements nécessaires à sa réalisation.*

Le sujet et les financements étant acquis, l'étudiant doit se soumettre à un chef, appelé dans le milieu Directeur de Thèse. L'étudiant devra cependant faire attention à la qualité de son chef. Il est conseillé de prendre un chef compétent, expert en tout et enclin à supporter les frasques de l'étudiant ; un chef patient pouvant supporter sous son toit le thésard pendant trois longues années ; un chef compréhensif acceptant d'encadrer le travail du thèsard qui, impénitent, n'en fait toujours qu'à sa tête. Si l'étudiant hésite entre deux chefs, qu'il prenne les deux : ceci permet de fructueuses tempêtes de cerveaux.

**Exemple :**
*Dans le cas d'une étude dendroécologique du hêtre sur les plateaux calcaires de Lorraine, Michel BECKER et Jean-Luc DUPOUEY forment un duo de chefs correspondant au profil suggéré ; l'un rompu à tous les pièges de la dendroécologie et l'autre plein d'idées et toujours près à innover.*

L'étudiant doit rapidement prendre conscience que le matériel qu'il étudiera dépend fortement du sujet de thèse retenu, tant en qualité qu'en quantité. L'étudiant ne saurait espérer faire n'importe quoi, n'importe où et n'importe comment. Si l'étudiant n'aime pas aller dehors quand il pleut, il évitera de fréquenter un labo de phytoécologie. Dans le domaine forestier, deux arbres peuvent quelquefois êtres suffisants ; dans d'autres cas, au contraire, il faudra en prévoir un peu plus.

**Exemple :**
*Dans le cas d'une étude dendroécologique du hêtre sur les plateaux calcaires de Lorraine il faut compter :*
*- 3 kilos de carottes (soit 4 litres ou 207 mètres, c'est à dire 1025 arbres pour 93971 cernes) ;*
*- 33 mètres cubes de sol à retourner ;*
*- 4978 observations de 187 espèces végétales.*

En fonction du matériel à étudier, l'étudiant devra s'assurer du soutient logistique de quelques personnes.

**Exemple :**
*Dans le cas d'une étude dendroécologique du hêtre sur les plateaux calcaires de Lorraine, l'appui de l'Office National de Forêt est très appréciable, tant celui de Gilles BLANCHARD, Directeur Régional, qui fait confiance au laboratoire de phytoécologie en donnant les autorisations de*

*carottage ; tant celui de tout le personnel de l'ONF pour l'accueil et les informations qu'il ne manque pas de communiquer.*

*Toujours dans le cas d'une étude dendroécologique du hêtre sur les plateaux calcaires de Lorraine, l'aide de l'Inventaire Forestier National est très importante.*

S'il ne tient pas à trop se fatiguer lors de la collecte des données de base, le thésard doit s'adjoindre l'aide d'un technicien habile. En outre, si celui-ci sait cuisiner il est recommandé de ne pas négliger cette aptitude, surtout par temps froid.

**Exemple :**
*Dans le cas d'une étude dendroécologique du hêtre sur les plateaux calcaires de Lorraine il faut prévoir à peu près 24047 tours de tarrière, soit 30 kilomètres pour chaque main (sans compter les inévitables ratés) ; pas mal de coups de pioche ; pas mal d'embourbements ; pas mal de grossièretés ... Bref pour toutes les opérations de terrain qui ne sont pas toujours réjouissantes, Patrick BEHR se révèle un soutien efficace. Cet excellent technicien, un peu bourru mais ami de tous, n'a entre autre pas son pareil pour griller les steacks et les magrets de canard grâce aux trois stères de bois qu'il stocke en permanence dans la voiture de service. Il faut cependant se méfier de l'incrédulité et du sens géographique de Patrick BEHR et toujours lui conseiller de tourner à gauche si la placette est à droite.*

Dans l'élaboration d'une thèse, il est important de ne pas négliger les soutiens scientifiques et moraux. Ces soutients sont appelés de façon générique les Zamis.
Les amis se rangent dans deux catégories : les amis au boulot et les amis à la maison.

**1 - les amis au boulot**
L'étudiant devra choisir plusieurs amis, de compétence variée, pour pouvoir franchement rigoler ou discuter sérieusement. Les amis avec lesquels on discute sans rigoler sont des collègues (attention, il existe aussi des collègues avec lesquels on ne discute pas). Les amis avec lesquels on rigole et on discute sont de vrais Zamis.

**Exemples**
*- François GEREMIA, Christian KIEFFER et Roger SCHIPFER, Hommes De Terrain qui apprennent tous aux stagiaires et donnent toujours de bon cœur des coups de mains en cas de coup dur ;*
*- Laurence LE MAOUT et Jean-François PICARD, toujours de bon conseil, de bonne humeur, disponibles et incroyablement patients ;*
*- Guy Didier BERT, François LEBOURGEOIS, Anne THIMONIER, à utiliser pour une ambiance décapente dans un labo ;*
*- Nathalie BREDA, fraichement convertie à la dendro mais vieille routarde des rapports en retard ;*
*- Yves LEFEVRE, pour ses conseils en pédologie ;*
*- Jean BACHACOU, pour ses conseils en stat ;*
*- Simone DESJEUNES, pour son aide sur le SUN ;*
*- Michel DUMAS et Sylvie COCAUD, Capitaines de la Doc ;*
*- M / Mme / Mlle, ..... ....., mon / ma plus cher / chère ami / amie.* **(1)**
(prénom) (nom)

1 - Rayer les mentions inutiles et compléter.

**2 - les amis à la maison**

Les amis à la maison forment ce qui est classiquement appelé la Famille. Il faut distinguer la famille colocataire et la famille non colocataire.

Dans le cas de l'élaboration d'une thèse, l'étudiant n'aura qu'une amie colocataire pour éviter les discutions. Cette option est avantageuse à plusieurs points de vue : l'étudiant pourra parler avec sa femme d'autre chose que de boulot ; bien rigoler avec elle ; partir en vacances ; et de façon plus pragmatique il pourra se mettre les pieds sous la table en rentrant le soir et avoir une chemise repassée le lendemain matin. Les femmes douces, compréhensives et patientes sont donc recommandées.

Vivant avec une compagne l'étudiant s'expose à l'apparition d'amis néoformés communément appelés enfants. Bien que les enfants représentent de formidables moments de détente, l'étudiant ne doit pas oublier l'existence de quelques désagréments dus à sa condition de père-thèsard. A l'opposé de son amie, les enfants sont durs, incompréhensifs et impatients.

> **Exemple:**
> *Dans le cas d'une étude dendroécologique du hêtre sur les plateaux calcaires de Lorraine, Anne, Justin et Arthur sont de très bons exemples d'amis à la maison.*

La famille non colocataire qui s'intéresse de près à la vie de l'étudiant peut se résumer aux parents toujours angoissés car ne comprenant rien de rien à ce qui s'est passé après le Bac.

> **Exemple:**
> *Dans le cas d'une étude dendroécologique du hêtre sur les plateaux calcaires de Lorraine, Jean-Pierre et Geneviève sont à conseiller.*

Enfin, lorsque l'étudiant aura enfanté dans la douleur, il devra soumettre son travail à ses pairs, juges impartiaux qui forment ce qui est communément appelé un Jury.

> **Exemple:**
> *Dans le cas d'une étude dendroécologique du hêtre sur les plateaux calcaires de Lorraine, Jean-Michel FAVRE, Claude MILLIER, Lucien TESSIER, André GRANIER, Michel BECKER forment un très bon Jury.*

A vous tous qui avez contribué à la réalisation de ce travail,
qui m'avez apporté conseils et suggestions,
je dis merci.

Nom : BADEAU

Prénom : Vincent

DOCTORAT de l'UNIVERSITE HENRI POINCARE, NANCY-I

en BIOLOGIE FORESTIÈRE

BIBLIOTHÈQUE * UNIVERSITÉ NANCY

VU, APPROUVÉ ET PERMIS D'IMPRIMER

Nancy, le 22 JUIN 1995 - n°279

Le Président de l'Université

J.P. FINANCE

3C-F9

UNIVERSITÉ HENRI POINCARÉ · NANCY 1
24-30, rue Lionnois B.P.3069 54013 Nancy cedex
Tél : 83 32 81 81 Fax : 83 32 95 90
Adresse électronique : _____ @presn1.u-nancy.fr

**Etude dendroécologique du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) sur les plateaux calcaires de Loraine. Influence de la gestion sylvicole.**

De nombreuses études réalisées en Europe de l'ouest ont montré que plusieurs essences forestières présentaient, à long terme, des tendances de croissance positives. Afin de confirmer l'existence de telles dérives et d'analyser le rôle de la sylviculture, l'évolution de la croissance radiale du hêtre depuis le siècle dernier est comparée entre deux types de gestion sylvicole : la futaie et le taillis-sous-futaie. L'échantillonnage d'un millier d'arbres, de toutes les classes d'âges, sur une centaine de placettes permet de différencier deux signaux s'exprimant à basse fréquence : les effets relatifs à l'augmentation de l'âge des arbres et les effets environnementaux. Trois méthodes d'analyse permettent de séparer ces signaux et de mettre en évidence une dérive positive de la croissance radiale à long terme dans les deux types de peuplements. La tendance observée en taillis-sous-futaie est cependant moins accusée que celle de la futaie.Cette différence significative entre les deux types de gestion sylvicole implique que les tendances ne peuvent être expliquées uniquement par l'évolution des facteurs environnementaux globaux. La sylviculture intervient également, soit en jouant un rôle direct, soit en interagissant avec certains facteurs de l'environnement (augmentation du taux de $CO_2$ atmosphérique, changements climatiques, dépôts azotés atmosphériques). L'analyse de la croissance radiale en fonction des paramètres stationnels et les reconstructions climatiques à partir de variables synthétiques issues d'un modèle de bilan hydrique journalier montrent que la productivité des hêtraies est très corrélée à la disponibilité en eau dans le sol pendant la saison de végétation.

**Mots-clés** : *Fagus sylvatica*, hêtre, sylviculture, futaie, taillis-sous-futaie, dendrochronologie, dendroécologie, standardisation, tendances de croissance à long terme, reconstruction climatique de la croissance, bilan hydrique.

**Dendroecological study of beech (*Fagus sylvatica* L.) in north-eastern France. Role of the silvicultural management.**

Several recent surveys have shown an increasing long-term growth trend for different forest species in western Europe. In order to confirm these growth changes and to study the role of the silvicultural management, we compared radial growth trends of beech, during the last century, in two different silvicultural systems: high forest (high density stands) and coppice with standards (low density stands). The sampling scheme was based on one thousand trees, of all age classes, from one hundred sites. This allow the separation, in the low frequency signals, of effects related to the ageing of the trees from other effects. Three techniques were used for this purpose. They showed a significant increasing radial growth trend, since the last century, in both silvicultural systems. However this trend was steeper in high forest than in coppice with standard stands. This result implies that the current increasing growth trend is partly due to silvicultural effects or interactions between silviculture and environmental changes (atmospheric $CO_2$ concentration, climatic changes, nitrogen fertilization). The analysis of the annual basal area increments according to ecological stands features and climatic reconstructions of the radial growth showed that the productivity of beech is mainly controlled by the amount of available water in the soils during the growing season.

**Keywords** : *Fagus sylvatica*, beech, silvicultural management, high forest, coppice with standards, dendrochronology, dendroecology, standardization, growth tend, climatic reconstruction of the radial growth, water balance.